

وزارة الجامعات  
Ministère aux Universités

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *Genie Mécanique*

PROJET DE FIN D'ETUDES *2e*

SUJET

*Réalisation d'un banc d'essai d'une  
pompe centrifuge, mise  
en évidence du phénomène de cavitation*

3 PLANCHES

Proposé par :  
*M<sup>r</sup> M. MADANI*

Etudié par :  
*M<sup>r</sup> S. OUAZENE*

Dirigé par :  
*M<sup>r</sup> M. MADANI*

PROMOTION  
*juin*  
1991



DEDICACES

**Je dédie cet ouvrage**

**à mes parents**

**à mes frères**

**à mes soeurs**

**à tous mes amis**

**Samir OUAZENE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes parents qui m'ont tant encouragé et monsieur MADANI qui m'a guidé pour réaliser mon projet, ainsi que mes amis de la promotion juin 90 : Boussad, Wahid, Smain, Abdelwahab Hakim, Rabah ...

## Résumé

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

sujet : Réalisation d'un banc d'essai d'une pompe centrifuge, pour la mise en évidence de la cavitation.

Résumé : Ce projet consiste à étudier un banc d'essai muni d'instruments et équipements nécessaires à la réalisation des conditions de la cavitation d'une pompe centrifuge pour nous permettre de tracer les différents graphes et de constater les perturbations dues à ce phénomène et leurs effets sur les caractéristiques de cette pompe.

## Summary

subject : realizing a testing bench of the centrifugal pump for displaying cavitation.

Abstract : This project, consist in realizing of a testing bench of one centrifugal pump wich is functioning with cavitation and studying her characteristics with instruments and equipments available in the work-shop of our département.

## ملخص

الموضوع : صناعة منصة تجارب لمضخة طاردة خارجية، لإظهار  
حادثة تقك داخل المضخة.

الملخص : هذا المشروع يتشرف في صناعة منصة تجارب لمضخة  
طاردة خارجية تعمل و بداخلها حادثة تقك مما يسبب  
لنا بدراسة تأثير هذا التقك على خصائص هذه المضخة.

S O M M A I R E

<u>I GENERALITES SUR LES POMPES CENTRIFUGES:</u>	<u>PAGE</u>
I-1 DEFINITIONS.....	2
I-2 NOTIONS SUR LA CAVITATION.....	2
I-3 BUT DE LA REALISATION DU BANC D'ESSAI.....	4
<u>II DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI</u>	
II-1 LA POMPE 40 N V A 150-5.....	5
II-1-1 LE DISTRIBUTEUR.....	5
II-1-2 LE ROTOR.....	5
II-1-3 LE DIFFUSEUR.....	6
II-1-4 LA VOLUTE.....	6
II-2 DESCRIPTION DU MOTEUR.....	6
II-3 ELÉMENTS CONSTRUCTIFS DU BANC D'ESSAI.....	7
<u>III REDIMENSIONNEMENT</u>	
III-1 ETALONNAGE DE LA SECTION ENTRE LE CONE ET LA CONDUITE D'ASPIRATION.....	8
III-2 DIMENSIONNEMENT DU MANOMETRE D'ASPIRATION.....	10
III-3 DIMENSIONNEMENT DU MANOMETRE INDICANT LA DEPRESSION CAUSEE PAR LE DIAPHRAGME .....	12
III-4 MESURE DE $p_p$ AU NIVEAU DU DIAPHRAGME.....	13
III-5 CALCUL DU DÉBIT THEORIQUE.....	44
III-6 CALCUL DU DIAMETRE D'ETRANGLEMENT D DU DIAPHRAGME .....	46
<u>IV REALISATION DU BANC D'ESSAI</u>	

IV-1	REALISATION DU CONE.....	18
IV-2	REALISATION DES AXES DE GUIDAGE.....	18
IV-3	REALISATION DES CYLINDRES DE GUIDAGES.....	19
IV-4	REALISATION DES BRIDES DE FIXATION.....	19
IV-5	REALISATION DU DIAPHRAGME.....	19
IV-6	REALISATION DES BLOCS FORMANT LE DEBIMETRE.....	20
IV-7	REALISATION DE SONDES DE PRISE DE PRESSION.....	20
IV-8	MONTAGE DU DISPOSITIF DE REGLAGE DE LA SECTION DE PASSAGE.....	20
IV-9	MONTAGE DU BANC D'ESSAI.....	21
IV-10	DESCRIPTION DU CLAPET ANTIRETOUR.....	21
IV-11	DESCRIPTION DU MANOMETRE INDIQUANT LA PRESSION DE REFOULEMENT.....	22
IV-12	DESCRIPTION DES TUBES D'ASPIRATION ET DE REFOULEMENT.....	23
IV-13	PROBLEME D'ETANCHEITE.....	23
<b>V- MESURES ET RESULTATS DU BANC D'ESSAI</b>		
<hr/>		
V-1	ORGANIGRAMME POUR LA PRISE DE MESURE ET LE TRACAGE DES COURBES.....	24
V-2	PRISES DE MESURES ET DEPOUILLEMENT DES MESURES PAR LA METHODE DES MOINDRES CARRES.....	25
V-3	INTERPRETATION DES COURBES.....	26
V-4	ORGANIGRAMME POUR TRAVAUX PRATIQUES.....	31
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>		<b>32</b>
<hr/>		
<b>ANNEXES</b>		
<hr/>		

## INTRODUCTION

Les pompes sont des machines, servant à faire circuler des fluides soit pour les extraire d'un gisement naturel, soit pour les transvaser, soit pour les refouler dans un autre récipient.

L'eau est utilisée dans plusieurs domaines (agriculture, alimentation en eau potable. etc...). C'est un des principaux facteurs de la production des récoltes, est sous certains climats, c'est celui qui a les conséquences économiques les plus importantes. Le pompage électrique de l'eau est couramment mis en oeuvre. Pour cela, on utilise donc des pompes, qui doivent être soumises aux essais de prototypes avant la fabrication en série, ainsi qu'aux essais d'homologation, et aux essais à la réception sur le site de fonctionnement final. Pour faire ces essais on a recouru aux bancs d'essais.

## I - GENERALITES SUR LES POMPES CENTRIFUGES

### I-1- DEFINITIONS

On dit qu'une pompe est centrifuge, si l'écoulement du fluide est radial et est engendré par l'action de la force centrifuge et de la force de coriolis.

Les pompes centrifuges se divisent en deux classes fondamentales :

a)-Le nombre de roue:

Pompes à "n" ou plusieurs étages

b)-Disposition de l'axe de l'arbre:

Vertical ou horizontal

c)-La forme de la roue:

Roue à simple aspiration (à une ouïe), ou roue à double aspiration (à deux ouïes).

d)-La position de la tubulure d'entrée:

Pompes à entrée axiale ou entrée latérale.

### I-2- NOTIONS SUR LA CAVITATION

La cavitation est un phénomène destructif, qui est provoqué par l'abaissement dans certaines régions de la pompe, de la pression au dessous de la valeur critique, qui est la tension de vapeur à la température donnée pendant le fonctionnement.

Ce phénomène consiste en la formation de bulles remplies d'air ou de gaz dans cette région, et qui se dirigent ensuite avec le courant autour de la roue, vers des régions de plus hautes pressions où elles sont écrasées (implosions).

La basse pression est plus où moins égale à la pression de saturation selon le degré de pureté de l'eau pendant l'implosion, qui se produit avec une très grande fréquence. Les surfaces exposées à la cavitation sont soumises à l'action d'ondes de chocs de hautes intensités.

Les chocs provoqués par la répétition des implosions arrachent de la matière aux endroits les moins résistants (pores, fissures, cassures etc...) ce qui provoque :

- Des vibrations.
- Des craquements et des bruits.
- Une réduction considérable de la hauteur d'élevation et du rendement de la pompe.

La cavitation est favorisée par les conditions de fonctionnement suivantes:

- a)-Une trop grande hauteur d'aspiration, ou trop petite charge à l'aspiration.
- b)-Dépassement du débit normal, d'où accroissement de la vitesse d'écoulement et baisse de pression.
- c)-Alimentation défectueuse de la roue et brusques modifications de la direction de l'écoulement.

### I-3- BUT DE LA REALISATION DU BAND D'ESSAI

La réalisation du banc d'essai avec les possibilités fournies par l'atelier du département de génie mécanique, permet d'étudier et de tracer les caractéristiques d'une pompe centrifuge; pour cela nous devons construire quelques appareils pour les prises de pressions, de débit et de puissance en plus du dispositif qui nous permettra de faire varier la section d'entrée de la conduite d'aspiration pour mettre en évidence le phénomène de cavitation et l'étudier.

Les caractéristiques hydrauliques de la pompe à déterminer sont :

- $H_m = f(Q)$       -Hauteur manométrique.
- $\eta = f(Q)$       -Rendement.
- $NPSHD = f(Q)$     -Charge nette à l'aspiration.

## II - DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

### II-1-LA POMPE 4 N V A 150-5

La pompe retenue est celle existant déjà dans le laboratoire de mécanique énergétique. C'est une pompe monocellulaire fabriquée par le complexe pompes et vannes de BEROUAGHIA. 40.N.V.A.150-5 signifie que :

- 40 - Désigne le diamètre de la conduite de refoulement.
- 150 - Désigne le diamètre de la roue centrifuge.
- 5 - Désigne l'épaisseur du canal de la roue centrifuge.

Cette pompe est constituée d'un distributeur, d'un rotor, et d'une volute.

### II-1-1-LE DISTRIBUTEUR

Il a pour fonction de conduire le liquide depuis la section d'entrée de la machine jusqu'à l'entrée du rotor en assurant une répartition uniforme des vitesses.

### II-1-2- LE ROTOR:

Sa fonction est de communiquer de l'énergie au liquide qui le traverse grâce aux aubages dont il est muni.

### II-1-3- LE DIFFUSEUR:

Situé entre le rotor et la volute il est constitué de sections croissantes, ce qui lui permet de transformer une certaine énergie cinétique en énergie de pression. On distingue des diffuseur lisse à parois parallèles ou divergentes ou des diffuseurs à ailettes.

### II-1-4-LA VOLUTE

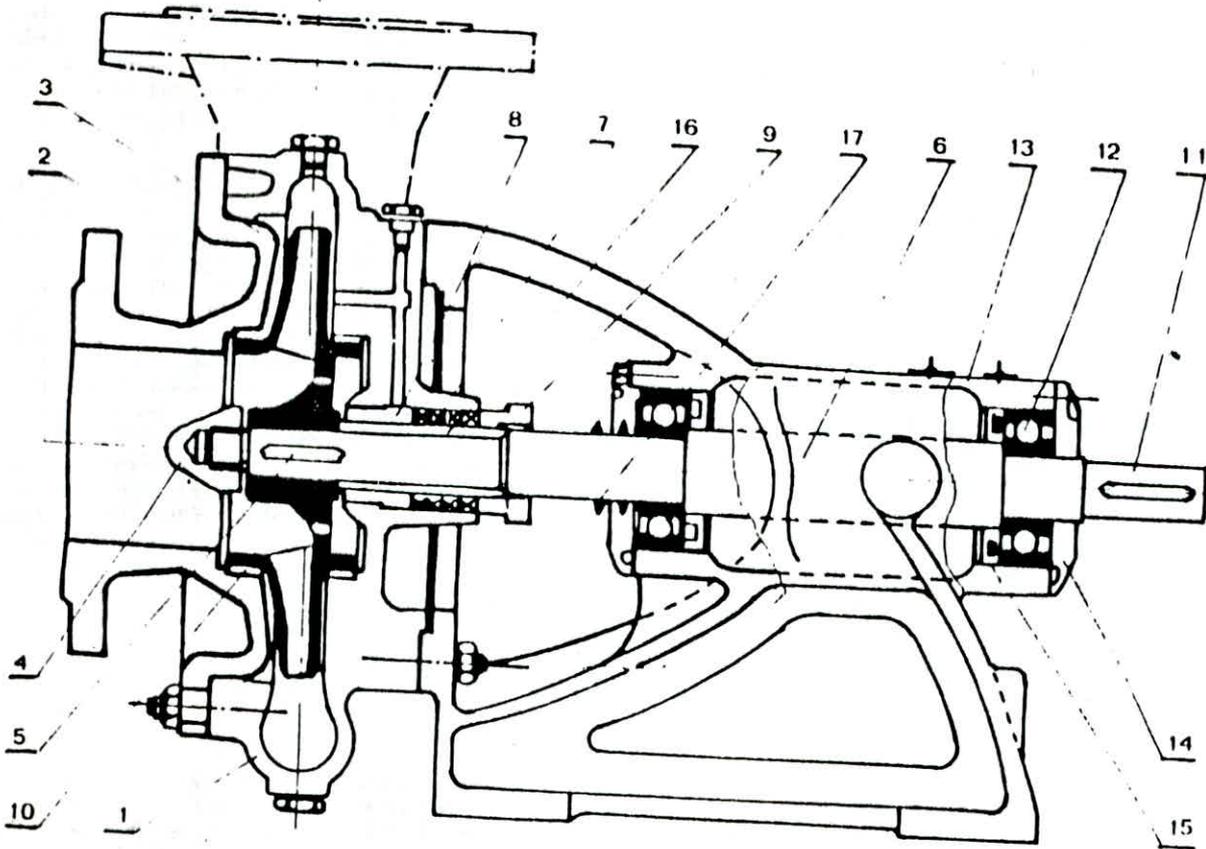
Elle collecte le liquide pompé à la sortie du diffuseur ou directement à la sortie du rotor si le diffuseur n'existe pas. la section de la volute croit depuis le bec initial jusqu'au divergent final; cette croissance de section dépend de l'évolution de la vitesse moyenne dans ces sections.

Les caractéristiques de cette pompe sont les suivantes :

Diametre nominal d'aspiration	$D_{asp} = 50 \text{ mm}$
Diametre nominal de refoulement	$D_{ref} = 40 \text{ mm}$
Débit nominal	$Q_{nom} = 18 \text{ m}^3/\text{s}$
Hauteur manometrique nominale	$H_m = 23.50 \text{ m}$
Puissance nominale	$P_{nom} = 1.85 \text{ kW}$
NPSH <sub>r</sub>	$NPSH_r = 2.70 \text{ m}$
Vitesse de rotation nominale	$N_{nom} = 2900 \text{ tr/mn}$
Masse	$m = 23.10 \text{ kg}$

### II-2-DESCRIPTION DU MOTEUR

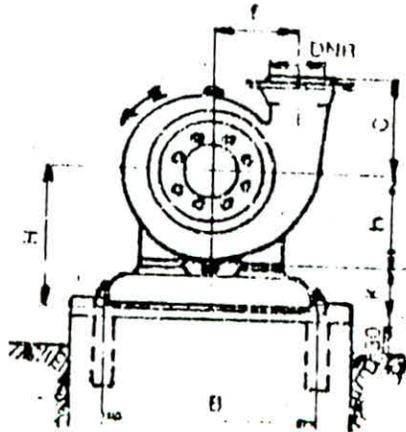
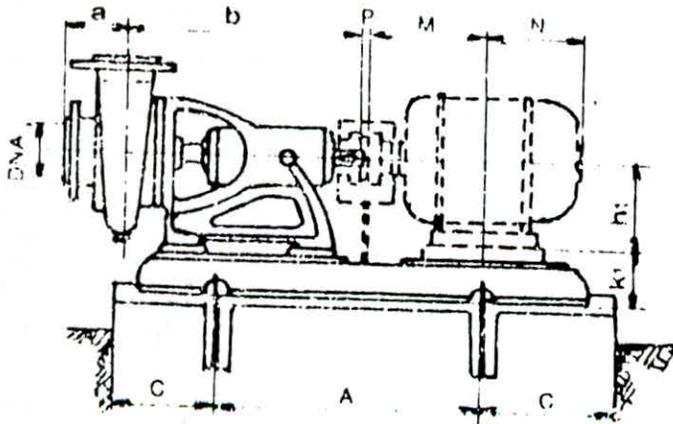
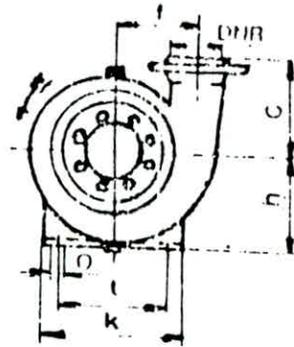
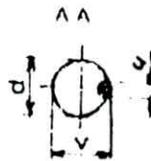
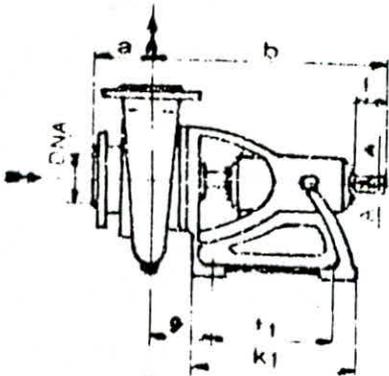
L'entraînement se fait à l'aide d'un moteur asynchrone se trouvant également dans le laboratoire énergétique de marque SEVER



- 1 - Corps de pompe
- 2 - Couvercle d'aspiration
- 3 - Roue centrifuge
- 4 - Ecrou de roue centrifuge
- 5 - Clavette de roue centrifuge
- 6 - Arbre
- 7 - Garniture de presse-étoupe
- 8 - Douille
- 9 - Couvercle de presse-étoupe

- 10 - Bague d'étanchéité
- 11 - Clavette d'accouplement
- 12 - Roulement à billes
- 13 - Corps du chevalet
- 14 - Couvercle de palier
- 15 - Tôle de recouvrement
- 16 - Douille de protection
- 17 - Racleur

Dimensions de la pompe	Dimensions de l'arbre	Dimensions de la tubulure
a = 95 mm	d = 20 mm	DNA = 50 mm
b = 332 mm	I = 50 mm	DNR = 40 mm
c = 140 mm	U = 6 mm	
f = 85 mm	V = 22.5 mm	
g = 635 mm		
h = 112 mm		
k = 160 mm		
k1 = 220 mm		
o = 11.5 mm		
t = 134 mm		



et du type ZK90L2 moteur triphasé de tension 380 v et ayant les caractéristiques suivantes :

Puissance	P = 2.20 kv
Vitesse de rotation	N = 2885 tr/mn
Frequence	F = 50 hz
Facteur de puissance	cos $\theta$ = 0.86

### II-3-ELEMENTS CONSTRUCTIFS DU BANC D'ESSAI

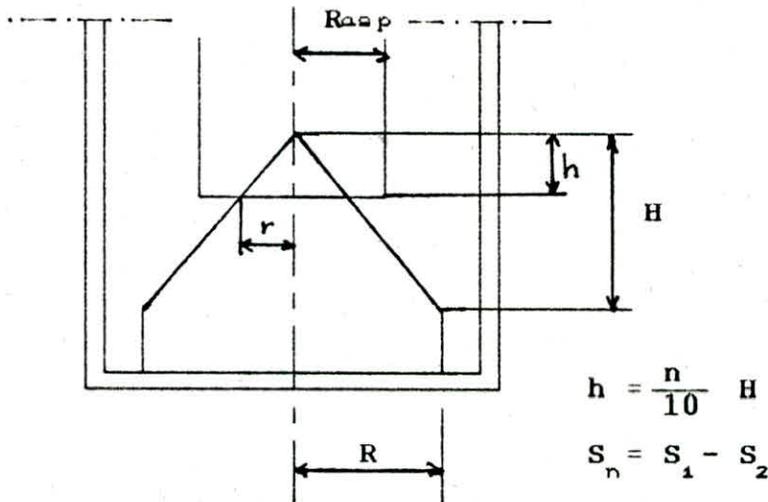
- 1°)-La pompe du type 40.N.V.A-150-5.
- 2°)-Le moteur entrainant la roue de la pompe
- 3°)-Le débit-mètre:  
C'est un diaphragme maintenu avec des brides de fixation sur la conduite.
- 4°)-Deux manomètres à mercure (en U) pour mesurer la pression à l'entrée de la pompe et la depression causée par le diaphragme.
- 5°)-Un manomètre à tube de bourdon (à cadran) mesurant la pression à la sortie de la pompe
- 6°)-La conduite d'aspiration de diametre D = 35 mm munit d'un coude à 90°.
- 7°)-La conduite de refoulement de diametre D = 35 mm munit de deux coudes à 90° et d'une vanne à volant.
- 8°)-Un bati sur lequel repose le groupe moto-pompe.
- 9°)-Le réservoir de moyenne capacité (environ 2.5 m<sup>3</sup>) banc d'essai à circuit fermé.
- 10°)-Le dispositif de réglage du débit à l'aspiration (pour la mise en évidence de la cavitation).

Redimensionnement

### III- REDIMENSIONNEMENT

La conception a été déjà faite avec des conduites d'aspiration et de refoulement de diamètres respectifs  $D_{asp} = 40 \text{ mm}$  et  $D_{ref} = 50 \text{ mm}$  qui sont introuvables sur le marché actuellement et qui ne sont pas disponibles au niveau du magasin de l'atelier, ce qui nous a forcé à les remplacer par des conduites de diamètre  $D = 35 \text{ mm}$ . Ce qui nous oblige à refaire quelques calculs de dimensionnement.

#### III-1- ETALONNAGE DE LA SECTION ENTRE LE CONE ET LA CONDUITE D'ASPIRATION



$S_1$  : Section de la conduite d'aspiration.

$S_2$  : Section de la base du cône de rayon  $r$  qui a pénétré dans la conduite d'aspiration pour l'obturer.

$S_n$  : Section de passage correspondant à une remontée de  $n$  dixième de  $H$

$$h = \frac{n}{10} \quad (1)$$

$$S_n = S_1 - S_2 \quad (2)$$

$$S_1 = \pi (R_{asp})^2 \quad (3)$$

$\frac{R}{H} = \frac{r}{h}$  (4) en substituant (1) dans (4) on aura:

$$r = \frac{n}{10} R \quad (5)$$

en substituant (5) et (3) dans (2)  $S_n$  devient:

$$S_n = \pi [ R_{asp}^2 - \frac{n^2}{100} R^2 ] \quad (6)$$

$$R_{asp} = \frac{D_{asp}}{2} = 17.5 \text{ mm} \quad \text{et} \quad R = \frac{R_{cone}}{2} \quad \text{d'où}$$

$$\frac{R_{asp}}{R} = 0.875 \quad (7)$$

en remplaçant (7) dans (6) on aura donc:

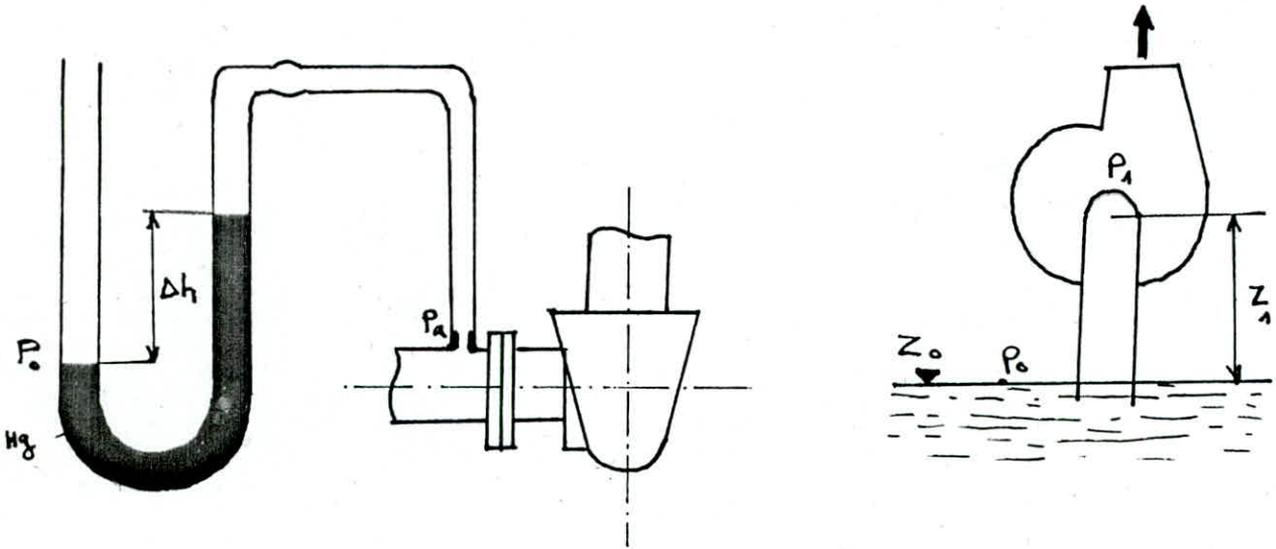
$$S_n = \pi R_{asp}^2 \left[ 1 - \frac{n^2}{76.56} \right]$$

Donc si la règle graduée est partitionner en dix parties, alors pour chaque graduation  $n$ , la section de passage de l'eau est donnée par la formule de  $S_n$  ci dessus.

pour prendre dix mesures on divise la règle entre la position max et la position min en dix partitions tel que :

$$n = 1, 1.5, 2, 2.5, \text{ etc...}$$

III-2-DIMENSIONNEMENT DU MANOMETRE D'ASPIRATION



Appliquons le théorème de BERNOULLI entre 0 et 1.

0 : indique le niveau de la surface libre du réservoir.

1 : indique l'entrée de la pompe.

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{C_0^2}{2g} + Z_0 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} + Z_1 + \Delta h_{01} \quad (1)$$

$$\Delta h_{01} = \Delta h_{\text{coude}} + \Delta h_{\text{linéaire}} + \Delta h_{\text{e}} \quad (2)$$

$$C_{1 \text{ max}} = \frac{Q_{\text{max}}}{S} \rightarrow C_{1 \text{ max}} = 5.17 \text{ m/s} \quad \text{avec } Q_{\text{max}} = 0.0065 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta h_{\text{coude}} = \xi \frac{C_1^2}{2g} \quad \text{avec} \quad \xi = 0.3 \quad \rightarrow \quad \Delta h_{\text{coude}} = 0.409 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{linéaire}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{C_1^2}{2g} \quad \text{avec} \quad L = L_1 + L_2$$

$$L_1 = 1.20 \text{ m} \quad \text{et} \quad L_2 = 0.5 \text{ m}$$

$$Re_d = \frac{C_{\text{max}} D}{\nu} = \frac{4 Q_{\text{max}}}{\pi D \nu} \quad \text{d'où} \quad Re_d = 236458.77 > 10^5$$

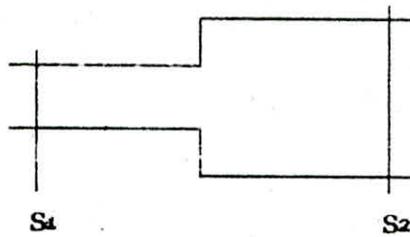
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log ( R \sqrt{\lambda} ) - 0.8 \quad (\text{formule de KARMAN})$$

Résolution par la méthode de NEWTON-RAPHSON on a :

$$\lambda = 0.015$$

$$\Delta h_{\text{linéaire}} = 0.992 \text{ m}$$

•  $\Delta h_p$  due à la variation de section en amont de la pompe



$$\Delta h_m = \frac{C_1^2}{2g}$$

$$\xi = (1 - S_1 / S_2)^2$$

$$\Delta h_m = 0.35 \text{ m}$$

$$\text{alors } \Delta h_{O_1} = 1.751 \text{ m}$$

$$\frac{P_0 - P_1}{\rho_{\text{eau}} g} = 4.313 \text{ m}$$

$$P_0 - P_1 = 42310.53 \text{ pas}$$

La différence de hauteur de mercure est de : 317.1 mm de Hg  
d'où la longueur minimale des tubes sera  $L = 0.32 \text{ m}$

### III-3-DIMENSIONNEMENT DU MANOMETRE INDIQUANT LA DEPRESSION CAUSEE PAR LE DIAPHRAGME

C'est le meme manomètre que celui de la conduite d'aspiration , sachant que :

$$Q_{\text{max}} = C E S \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_{\text{eau}}}} \quad \text{alors}$$

$$\Delta P_{\text{max}} = \frac{\rho_{\text{eau}}}{2} \left[ \frac{Q_{\text{max}}}{C E S} \right]^2$$

$$\text{or } \beta = 0.764 \quad \text{donc}$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} = 1.2315$$

$$C = 0.5959 + 0.0312 \beta^{2.1} - 0.1840 \beta^8 + 0.0029 \left[ \frac{10^6}{Re d} \right]^{0.75}$$

$$Re d = 236458.77 \quad d'ou \quad C = 0.5966$$

$$Q_{max} = 0.0065 \text{ m}^3/\text{s} \quad ; \quad d = 26.7 \text{ mm}$$

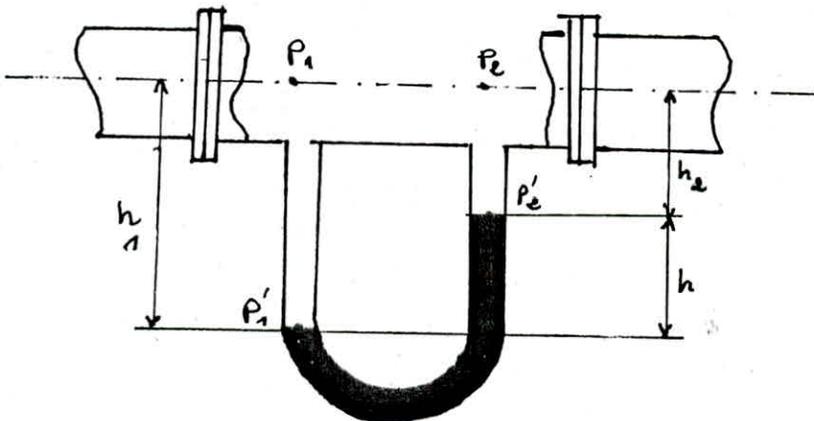
$$\Delta P_{max} = \frac{10^3}{2} \left[ \frac{0.0065 \cdot 4}{0.5966 \cdot 1.2315 \cdot \pi (26.74 \cdot 10^{-3})^2} \right]^2$$

$$\Delta P_{max} = 124089.8 \text{ pas}$$

Donc la différence de hauteur minimale de mercure est

$$L = 930 \text{ mm}$$

#### III-4-MESURE DE $\Delta P$ AU NIVEAU DU DIAPHRAGME



$$P'_1 = P_1 + \rho_0 gh_1 \quad \rightarrow \quad P_1 = P'_1 - \rho_0 gh_1$$

$$P'_2 = P_2 + \rho_0 gh_2 \quad \rightarrow \quad P_2 = P'_2 - \rho_0 gh_2$$

Or 
$$P'_1 = P'_2 + \rho_{hg} gh$$

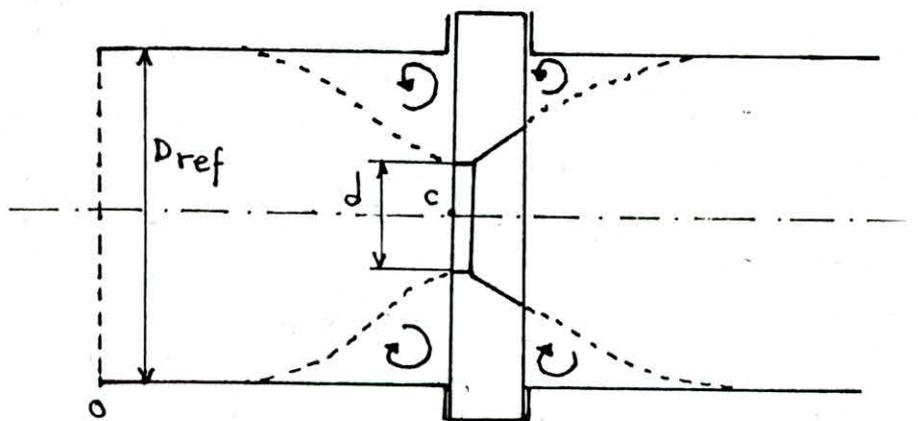
D'où

$$P_1 - P_2 = P'_1 - P'_2 - \rho_0 gh_1 - \rho_0 gh_2$$

$$= \rho_{hg} gh - \rho_0 gh$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (\rho_{hg} - \rho_0) gh$$

### III-5-CALCUL DU DEBIT THEORIQUE



Soit  $\rho_0$  la masse volumique du fluide et  $P_0, C_0$  la pression statique et la vitesse à l'amont de l'appareil en un endroit où la

veine de fluide occupe toute la conduite (section S)  $P_o$ ,  $C_o$  la pression statique et la vitesse dans la région où la section de la veine est minimale (section s).

On pose :

$$m = \frac{s}{S} = \frac{C_o}{C_c} = \frac{d^2}{D^2} = \beta^2 \quad (\beta = \frac{d}{D})$$

Appliquons le théorème de BERNOUILLI entre "o" et "c"

$$\frac{C_o^2 - C_c^2}{2} = \frac{P_o - P_c}{\rho_o} \quad \rightarrow \quad C_c^2 = \frac{2(P_o - P_c)}{\rho_o (1 - m^2)}$$

On pose

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \quad (\text{coefficient de vitesse d'approche})$$

D'où

$$C_c = E \sqrt{\frac{2(P_o - P_c)}{\rho_o}}$$

Le débit volumique théorique est alors

$$q_v = s C_c = E s \sqrt{\frac{2(P_o - P_c)}{\rho_o}}$$

Le débit réel est alors

$$q_v = C E s \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_o}}$$

$$C = 0.5959 + 0.0312 \beta^{2.4} - 0.1840 \beta^8 + 0.0029 \beta^{2.5} \left[ \frac{10^6}{Re_d} \right]^{0.75}$$

(expression de STOLZ)

Où C est le coefficient de débit avec  $\beta = \frac{d}{D}$

### III-6-CALCUL DU DIAMETRE D'ETRANGLEMENT d DU DIAPHRAGME

Sachant que  $Q_{nom} = 18 \text{ m}^3/\text{h} = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$

Et que  $Q_{max} = 1.3 Q_{nom} = 0.0065 \text{ m}^3/\text{s}$

Fixons  $\Delta h_d = 1 \text{ m}$

D'où  $\Delta P = P_1 - P_2 = g (\rho_{hg} - \rho_{eau}) \Delta h_d$

AN  $\Delta P = 9.81 (13600 - 1000) 1 \rightarrow \Delta P = 123606 \text{ pas}$

Sachant que le diamètre de la conduite de refoulement est  $D=35 \text{ mm}$  et que la viscosité cinématique de l'eau à  $T = 20^\circ \text{ c}$  est  $\nu = 10^{-6}$

$$Re_d = \frac{4Q_{max}}{\pi D \nu} = \frac{4 \cdot 6.510^{-3}}{\pi \cdot 35 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_d = 236458.77$$

$$500 \leq Re_d \leq 10^8 \quad \text{donc} \quad 0.23 \leq \beta \leq 0.8$$

Déterminons les valeurs du produit C E  $\beta^2$  pour 7 ou 8 valeurs de  $\beta$  successives, sachant la formule de STOLZ et la formule des coefficients de vitessed'approche. Nous dressons le tableau suivant :

$\beta$	0.23	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$\beta^2$	0.05	0.09	0.16	0.25	0.36	0.49	0.64
E	1.0014	1.0041	1.0131	1.0328	1.0719	1.1471	1.3014
C	0.5976	0.5988	0.6013	0.6041	0.6061	0.6039	0.5899
$CE\beta^2$	0.0299	0.0541	0.0975	0.1560	0.2339	0.3394	0.4913

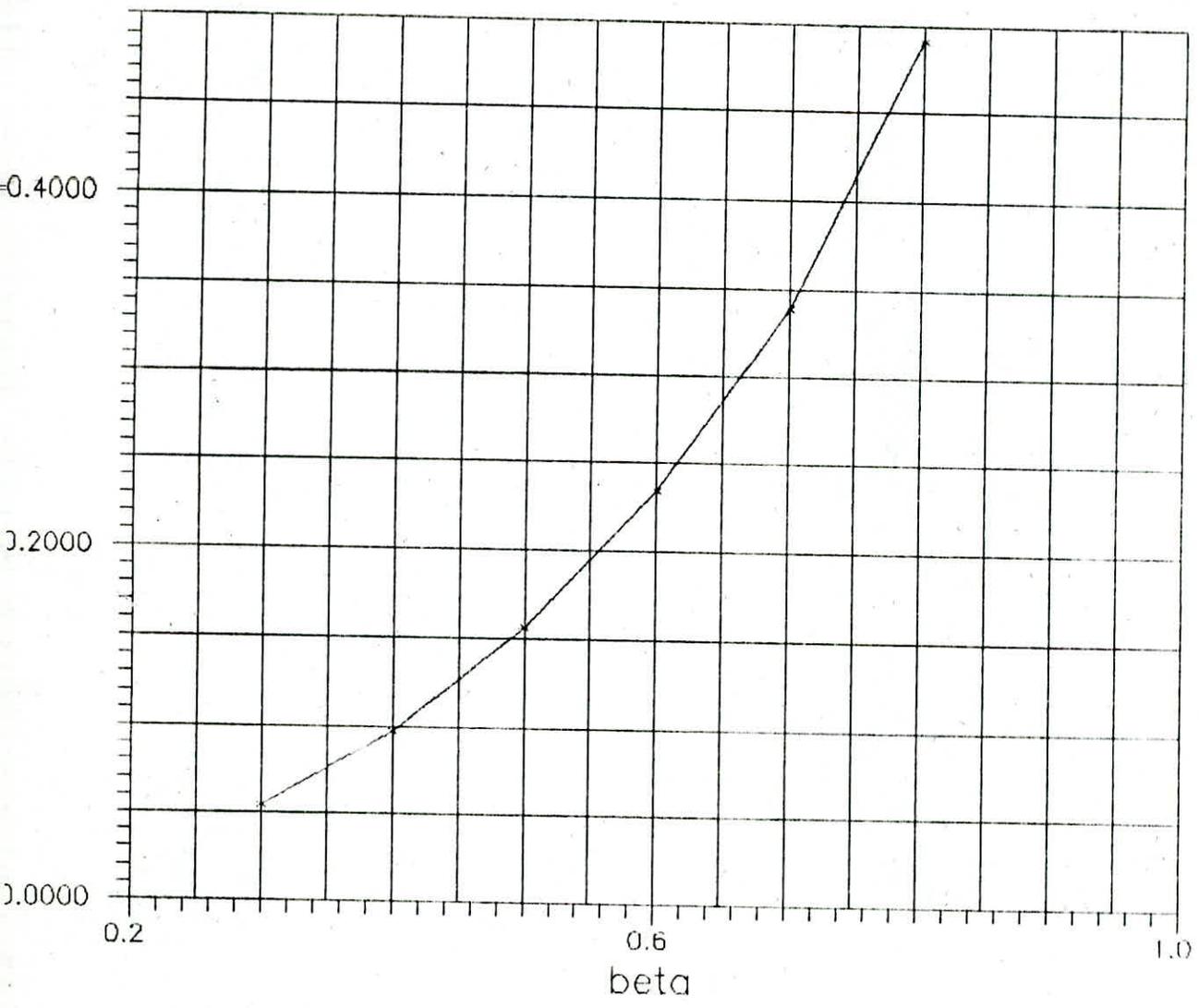
A l'aide de ces valeurs nous tracons le graphe de  $CE\beta^2 = f(\beta)$

$$CE\beta^2 = \frac{Q_{\max}}{(\pi D^2/4) \sqrt{2 DP/\rho_0}} = \frac{4 \cdot 6.5 \cdot 10^{-3}}{\pi (35 \cdot 10^{-3}) \sqrt{2 \cdot 123606/1000}}$$

$CE\beta^2 = 0.4297$  qui correspond graphiquement à  $\beta = 0.764$

sachant que  $\beta = \frac{d}{D} \rightarrow d = \beta D = 0.764 \cdot 35 \cdot 10^{-3}$

$d = 26.7 \text{ mm}$
-----------------------



Realisation

## IV- REALISATION DU BANC D'ESSAI

Notre réalisation présente beaucoup de modifications tendant soit à :

- S'assurer de la disponibilité des pièces d'usures.
- Rendre le banc d'essai plus pratique.

Voici les principales étapes de réalisation :

### IV-1-REALISATION DU CONE

Il a été conçu pour l'obturation de la conduite d'aspiration afin de faire varier la section de passage de l'eau à l'entrée de la pompe. On a abandonné la réalisation du cône en tôle car il est difficile à conserver au niveau de l'atelier vu ses petites dimensions, et il pose aussi un problème d'étanchéité, donc on s'est orienté à le faire en polyméthacrylate de méthyle (plexiglass). Sa température d'utilisation maximale est de 60 à 90° C. Sa résistance à la traction est de 5 à 78 daN/mm<sup>2</sup>. Sa résistance à la compression est de 7 à 13 daN/mm<sup>2</sup>. Son module d'élasticité est de 270 à 300 daN/mm<sup>2</sup>. Il présente une très bonne usinabilité.

### IV-2-REALISATION DES AXES DE GUIDAGES

C'est des barres de diamètre 11 mm en acier étiré à froid

N F A 47-411 matière habituelle E 24- A 60 coupées à la longueur désiré avec une cissaille manuelle, et filtrées au bout à l'aide d'une filière à pas normalisé diamètre 8 mm.

#### IV-3-REALISATION DES CYLINDRES DE GUIDAGES

C'est une barre de diamètre 20 mm en acier étiré à froid N F A 47- 411 E 24- A 60 . A travers sa longueur on a effectué un perçage au tour avec un foret de diamètre 11 mm en passant par des avants trous, puis coupé en quatre morceaux de cylindres de longueurs 40 à l'aide d'un outil à trançonner.

#### IV-4-REALISATION DES BRIDES DE FIXATIONS

Vue la pression nominale dans les conduites ainsi que le diamètre nominale, le nombre de brides se réduit donc à une bride de fixation pour la conduite d'aspiration de diamètre 160 mm et 5 brides de fixation pour la conduite de refoulement de diamètre 145 mm. On a pensé à les réaliser à l'aide de ronds qui sont des barres cylindriques en acier laminé à chaud normalisées, et dont le diamètre varie de 10 à 130 mm ce qui ne nous arrange pas vue les dimensions des brides voulues. Alors on a découpé à l'aide du chalumeau découpeur des formes circulaires qu'on a usiné au tour et percer à la perceuse radiale les quatres trous qui donnent l'emplacement des boulons.

#### IV-5-REALISATION DU DIAPHRAGMME

On a pas pu le réaliser en fonte car elle n'est pas disponible au niveau du magasin de l'atelier sous forme de blocs cylindriques de longueur 60 cm (des chutes), or réaliser un diaphragme en fonte avec une épaisseur < 1 mm est difficile au

Lour car en tenant compte de l'effort de coupe, il casse vue la fragilité de la fonte. Alors on a pris un morceau de tôle d'aluminium qu'on a découpé sous une forme circulaire à l'aide de la grignoteuse. L'aluminium à une bonne résistance aux agents atmosphériques et s'usine très bien.

#### IV-6-REALISATION DES BLOCS FORMANT LE DEBITMETRE

Ce sont des blocs cylindriques contenant chacun une rainure circulaire. La réalisation de la rainure circulaire nous a été difficile vue la manque d'outils au niveau de l'atelier. Il nous a fallu alors emprunter de l'extérieur un outil dit outil pelle pour réaliser cette dernière.

#### IV-7-REALISATION DE SONDE DE PRISE DE PRESSION

C'est des tubes cylindriques réalisés en laiton cu zn 15 3/4 dur utilisé surtout dans la robinetterie.

#### IV-8-MONTAGE DU DISPOSITIF DE REGLAGE DE LA SECTION DE PASSAGE

Son rôle consiste à faire varier la section d'entrée de la conduite d'aspiration, donc à faire varier le débit grâce au cône fixé à la fin de la conduite. Ce cône est maintenu à l'aide de deux tiges opposées qui sont elles mêmes solidaire à un bras (dispositif de centrage du haut). Lorsqu'on fait tourner le volant, donc la vis sans fin, l'ecrou se trouvant sur le bras se déplace verticalement à l'aide des glissière, et les tiges (assemblées au bras par des écrous) se déplacent aussi verticalement guidées par d'autres glissières tout en entraînant le cône. Le déplacement du cône est directement lié

(grâce aux bras) a une règle graduée en plexiglass dont la graduation est proportionnelle à cette ouverture. Le guidage ainsi que le centrage du cône nous a été très délicat vue les opérations de soudures effectuées sur ce dernier.

#### IV-9-MONTAGE DU BANC D'ESSAI

Après avoir fait le montage du banc d'essai (dispositif de réglage de la section, pompe, moteur, débitmètre, vanne de refoulement ainsi que les conduites d'aspiration et de refoulement) on s'est aperçu que la pompe ne veut pas s'amorcer car ce n'est pas pompe autoamorçante. Ce genre de pompe fonctionne avec une crépine d'aspiration.

Le montage de la crépine d'aspiration est impossible car ceci nous modifie tout le dispositif de réglage de la section de passage. On a donc redémonté le dispositif et on a intercalé dans la conduite d'aspiration un clapet antiretour immergé dans l'eau du réservoir afin d'empêcher l'eau de s'échapper à travers la conduite d'aspiration, et de retourner dans le réservoir, tout ceci en gardant la même hauteur à la conduite d'aspiration. Ainsi l'eau restera bloqué dans la conduite d'aspiration jusqu'à la sortie de la pompe.

En actionnant la pompe, l'hélice tournante crée une dépression dans la conduite d'aspiration, le clapet antiretour s'ouvre et la pompe s'amorce automatiquement.

#### IV-10-DESCRIPTION DU CLAPET ANTIRETOUR

Appelé parfois clapet de non retour ou clapet à battantes, ils sont destinés à empêcher le passage du fluide en sens inverse du sens normale de circulation. ils sont Utilisés surtout pour les conduites de fluides à faibles vitesses et dans lesquelles les pertes de charges ne doivent pas être trop importantes.

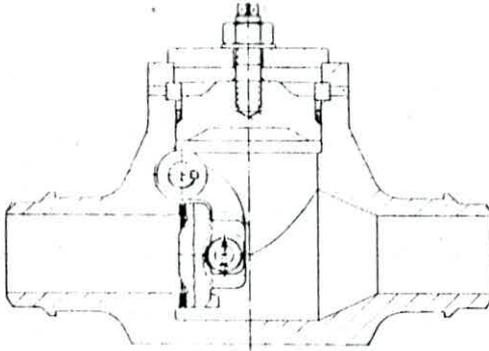


Fig. VIII-100 — Clapet de retenue à battant articulé; corps en acier forgé; contacts en stellite (K.S.B.)

orifices de petites dimensions, on emploie un clapet sphérique (fig. VIII-101) ou clapet à bille.

#### IV-11-DESCRIPTION DU MANOMETRE INDIQUANT LA PRESSION DE REFOULEMENT

C'est un manometre à tube de bourdon qui n'est pas disponible au niveau des départements de nôtre école; il nous a fallu alors le ramener de l'extérieur (SONAREM d'EL HARRACH).

Il est constitué d'un tube métallique TF de section ovale centré en forme de C. Une des extrémités du tube est fixée à un bloc pourvu d'un raccord fileté (pas WITHWORTH ou pas gaz), et ouverte recoit la pression à controler. L'autre extrémité obturéé est libre de se redresser ou se courber sous l'effet de la

pression appliquée à l'intérieur du tube. Le mouvement de déformation est transmis à l'aiguille indicatrice par l'intermédiaire d'un levier L, et d'un ensemble secteur denté et pignon. La déformation est proportionnelle à la pression à contrôler donc, il existe un coefficient de proportionnalité qui dépend de :

- La longueur du tube.
- Son rayon de courbure.
- L'épaisseur de ses parois.
- Son degré d'ovalisation.
- Le module d'élasticité du matériau du tube.

Les caractéristiques du mécanisme sont:

- $1 \text{ bar} \leq \Delta P \leq 0 \text{ bar}$  pour les dépressions.
- $0 \text{ bar} \leq \Delta P \leq 10000 \text{ bars}$  pour les pressions positives.
- Précision comprise entre 1 % et 1.6 % de la limite supérieur. Sachant que la pompe à une hauteur d'élévation de 23.5 m, il ne serait pas pratique d'utiliser un manomètre à mercure car cela nous demanderait une colonne de mercure très longue à la sortie de la pompe, il est donc commode d'utiliser un manomètre du type à tube de Bourdon.

#### IV-12-DESCRIPTION DU TUBE D'ASPIRATION ET DE REFOULEMENT:

C'est des tubes en acier galvanisé enrobé d'une fine couche de plomb qui constitue donc une protection contre la corrosion de diamètre 33-42 où:

33- désigne le diamètre intérieur du tube.

42- désigne le diamètre extérieur du tube.

coupé à la longueur désirée à l'aide d'un coupe tube et fileté au bout par une filière pas Withworth (pas gaz ou pas anglais), puis

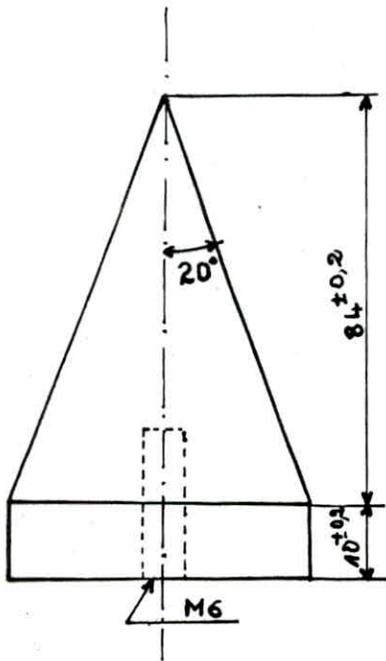
assemblé par filetage.

#### IV-13-PROBLEME D'ETANCHEITE:

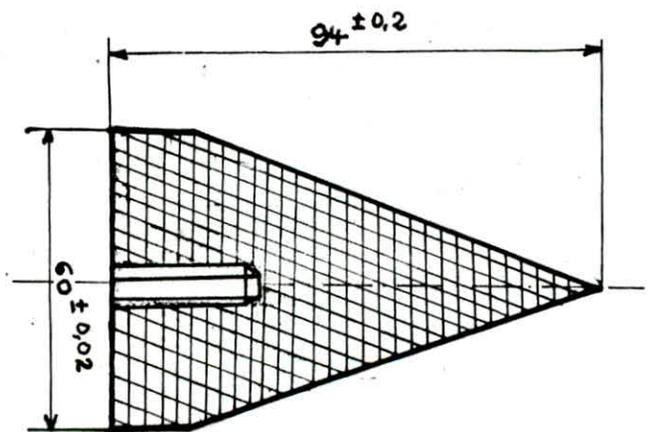
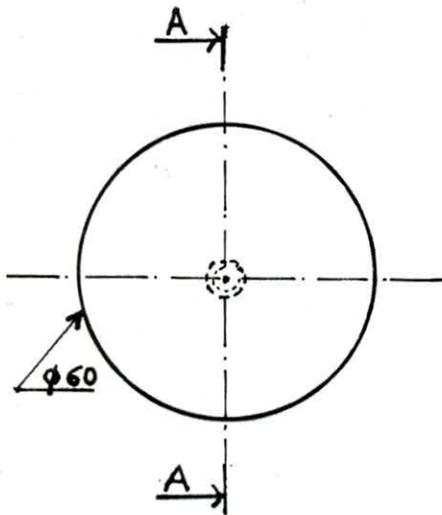
Le problème d'étanchéité est d'une extrême importance. Le bloc de la pompe constitué de fonte est moulé et supposée étanche, malgré qu'il y'a de très légère fuite au niveau de la garniture de prés~~er~~ étoupe. Entre les brides, on a intercalé des joints en caoutchouc colé sur l'une des brides. Pour le montage des tubes, avec les cordes, on a utilisé de la filasse ainsi que du mastic. en ce qui concerne le débit-mètre, on a fait intercalé des joints en caoutchouc entre le diaphragme et les blocs du débit-mètre de part et d'autre. Ces procédés nous ont permis d'assurer une étanchéité satisfaisante.

Dessins de définition,



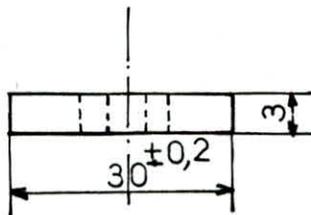
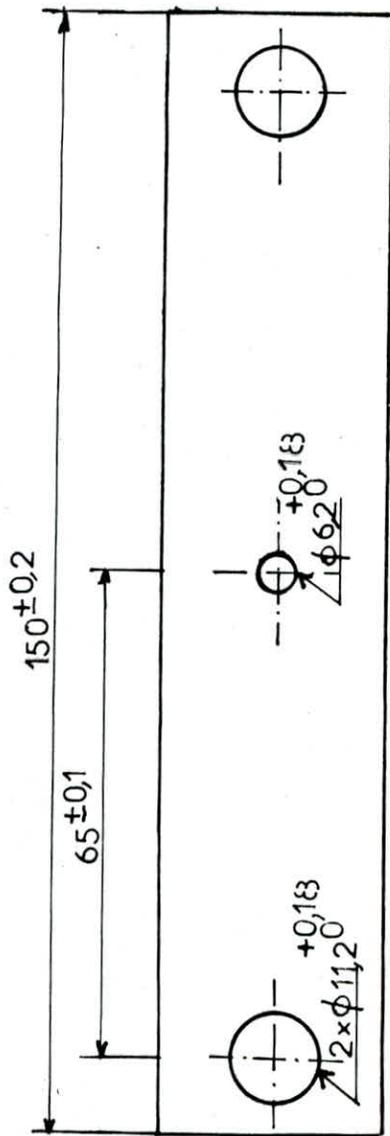


COUPE AA



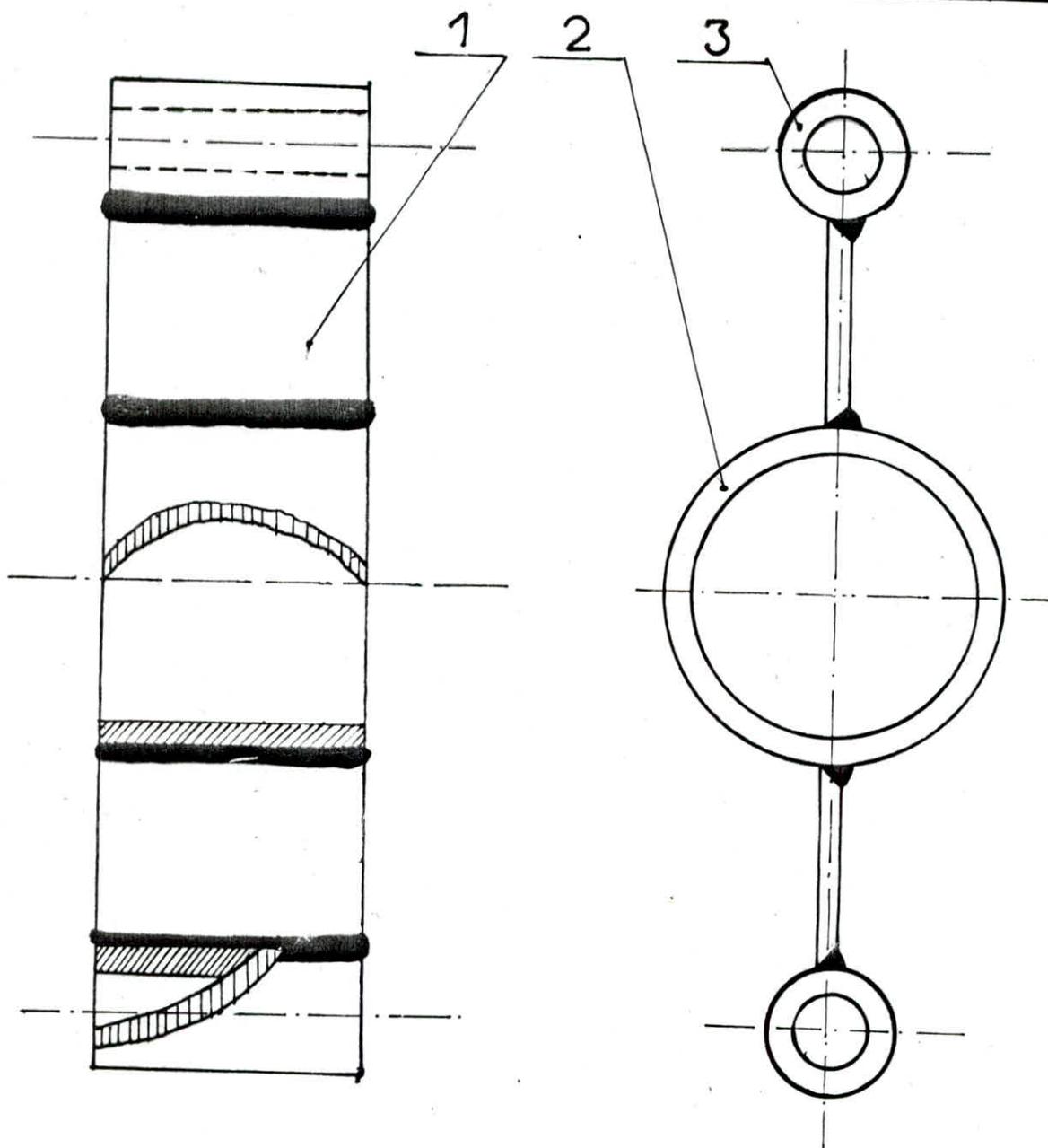
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Échelle	Masse			<p>CONE</p>	<p>E.N.P.A</p> <p>Dép. MEC</p> <p>TR2.01.00</p>
1/1					
Étudiant	OUAZENE		09.08.91		
Promoteur	MADANI				
Prof. dépt	RECHEK				
rés. Jury					



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

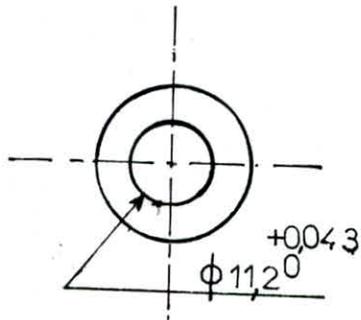
Échelle	Masse		PLAQUE DE CENTRAGE DU BAS	E.N.P.A Dép. MEC
1/1				
Étudiant	OUAZENE			
Promoteur	MADANI			
Chéf. dépt	RECHEK			
Prés. Jury				TR2.02.00



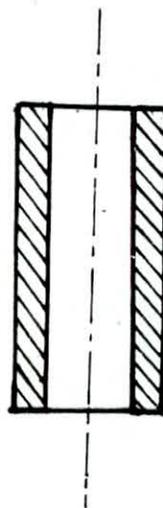
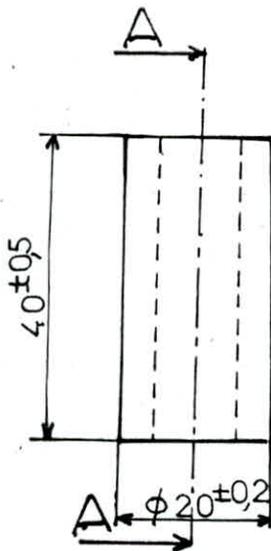
	PLAQUE SUPPORT	2				
	CYLINDRE (2)	1				
	CYLINDRE (1)	2				
N° Dessin	Désignation	Nb	Unit Masse	Total Masse	Mat.	Observ

COLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

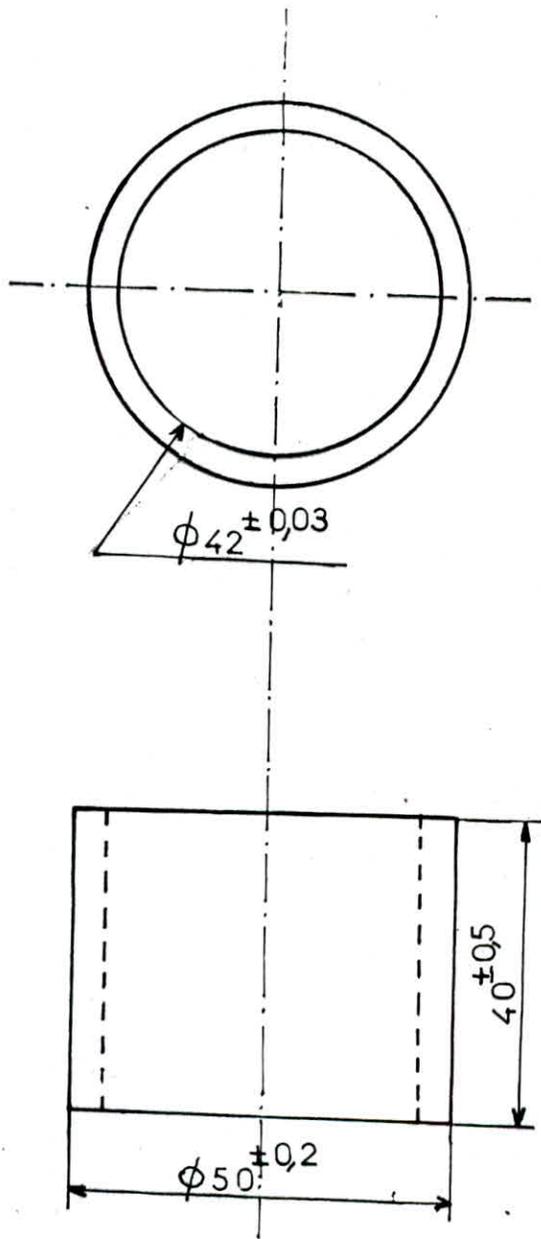
échelle	Masse		DISPOSITIF DE CENTRAGE INTERMEDIAIR	E.N.P.A Dép. MEC
1/1				
Étudiant	OUAZENE	09 08 91		
Prof. moteur	MADANI			
Prof. dépt	RECHEK			
Prés. jury				TR2.03.00



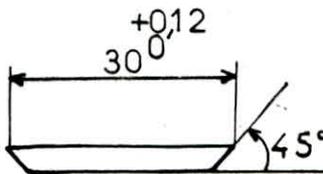
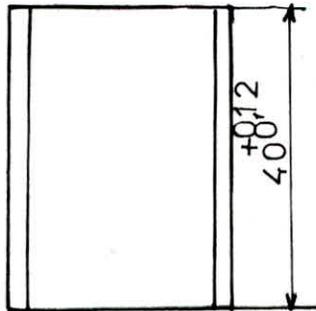
COUPE AA



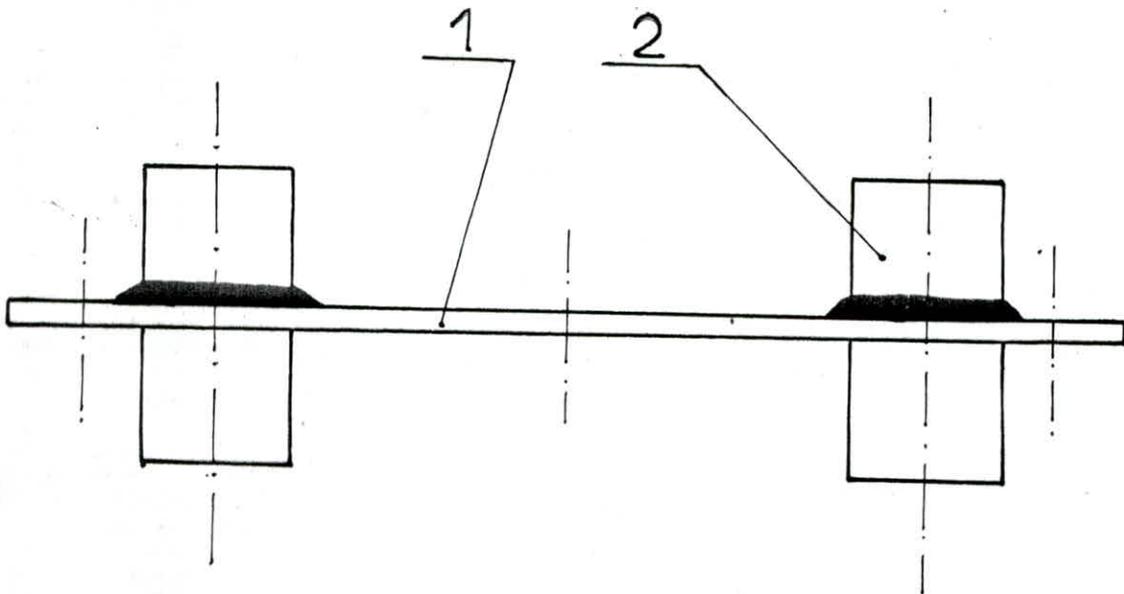
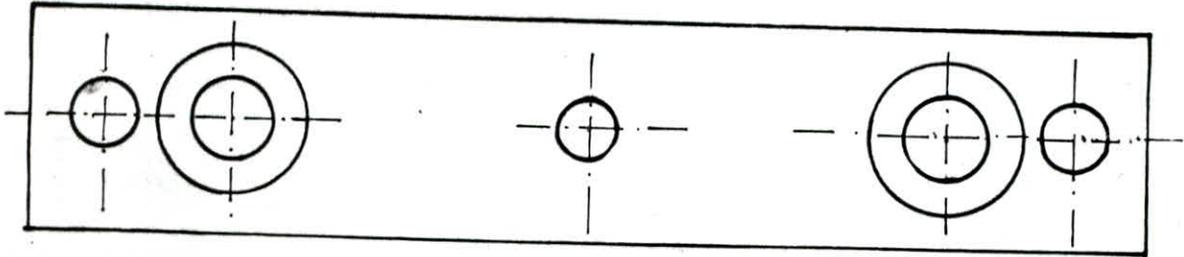
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			
Échelle	Masse		
1/1			
Étudiant	OUAZENE		09.08.94
Pro moteur	MADANI		
Ref. dépt	RECHEK		
Prés. jury			
CYLINDRE (1) GLISSIÈRE			E.N.P.A Dép. MEC TR2.03.01



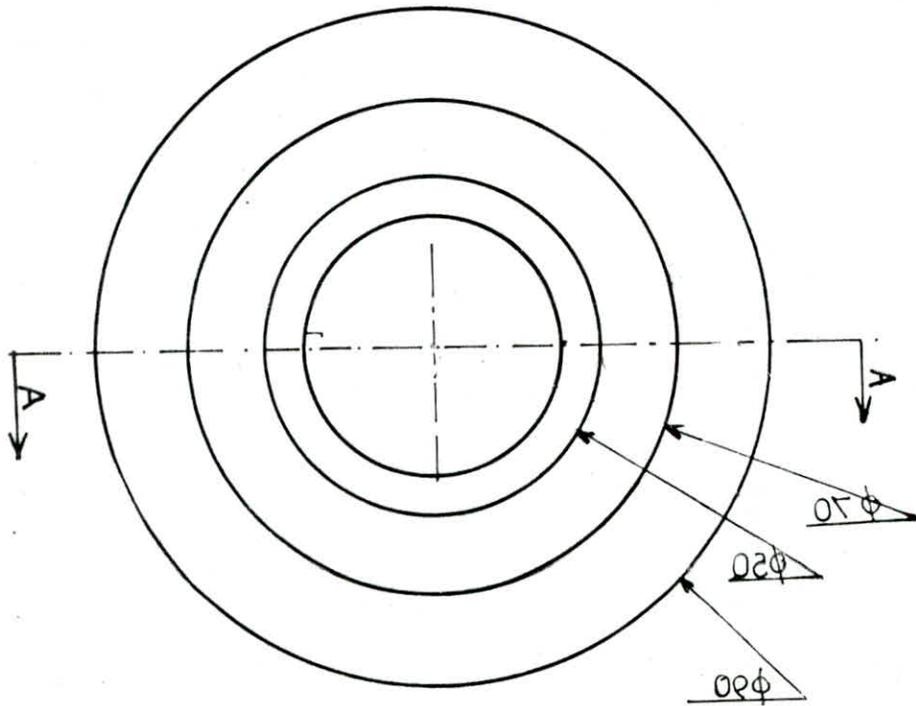
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE				
Echelle		Masse		
1/1				
Étudiant	OUAZENE	09.08.94	CYLINDRE (2)	E.N.P.A
Professeur	MADANI			
Éf. dépt	RECHEK			
És. jury				
				TR2.03.02



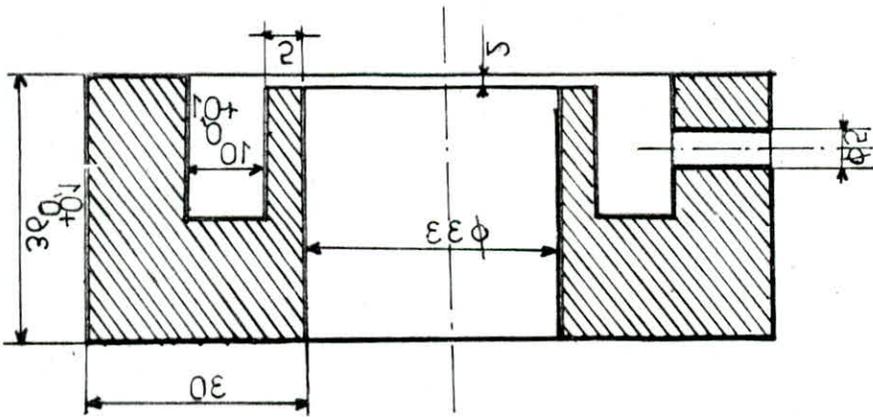
COLE NATIONALE POLYTECHNIQUE					
échelle	Masse			PLAQUE SUPPORT	E.N.P.A Dép. MEC
1/1					
étudiant	OUAZENE		09.08.91		TR20303
promoteur	MADANI				
réf. dépt					
prés. jury					



1		SUPPORT	1				
2	TR2.03.01	CYLINDRE	2				
Rep	N° Dessin	Désignation	Nb	Unit	Total	Mat	Observ
				Masse			
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE							
Echelle	Masse			DISPOSITIF DE CENTRAGE DU HAUT BRAS		E.N.P.A Dép. MEC	
1/1							
Étudiant	OUAZENE		09.08.91				
Promoteur	MADANI						
Ref. dépt	RECHEK						
Prés. jury						TR2.04.00	



COUPE AA



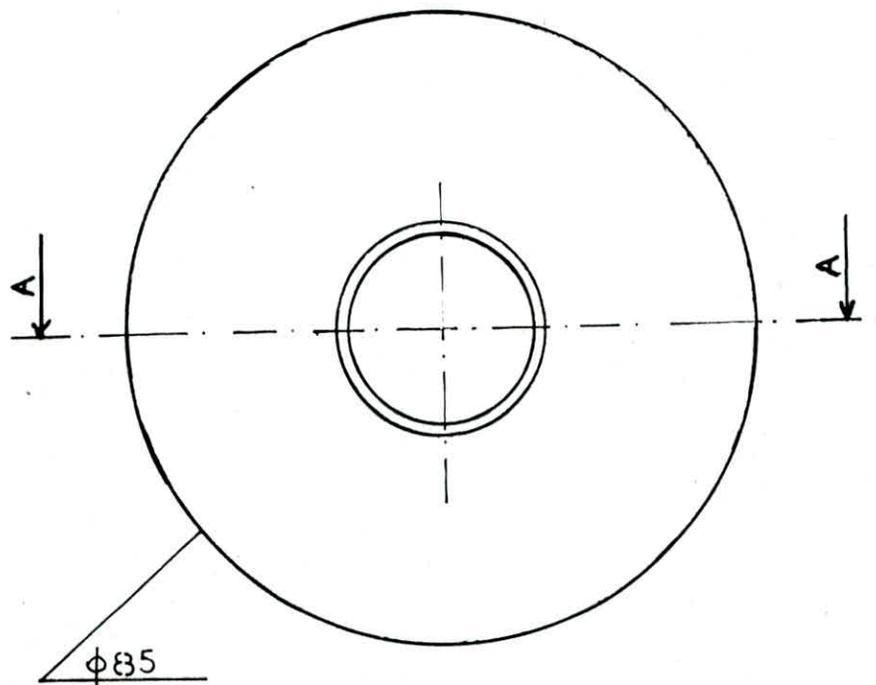
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Échelle	Masse		BLOC DU	
Étudiant	OUAZENE		DEBIMÈTRE	
Promoteur	MADANI			
Chef d'ép	RECHK			
Prés jury				

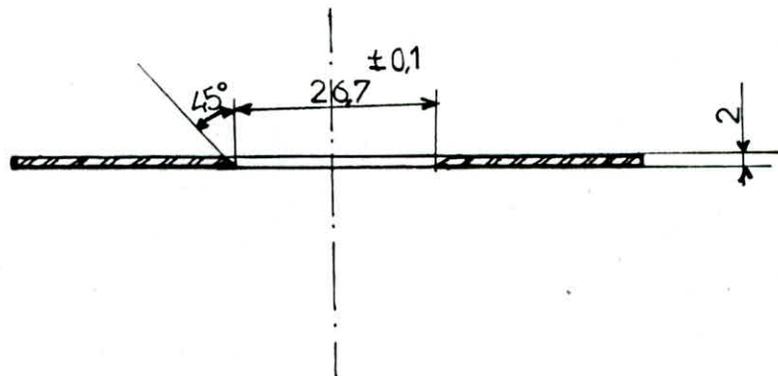
E.N.P.A

Dép. MEC

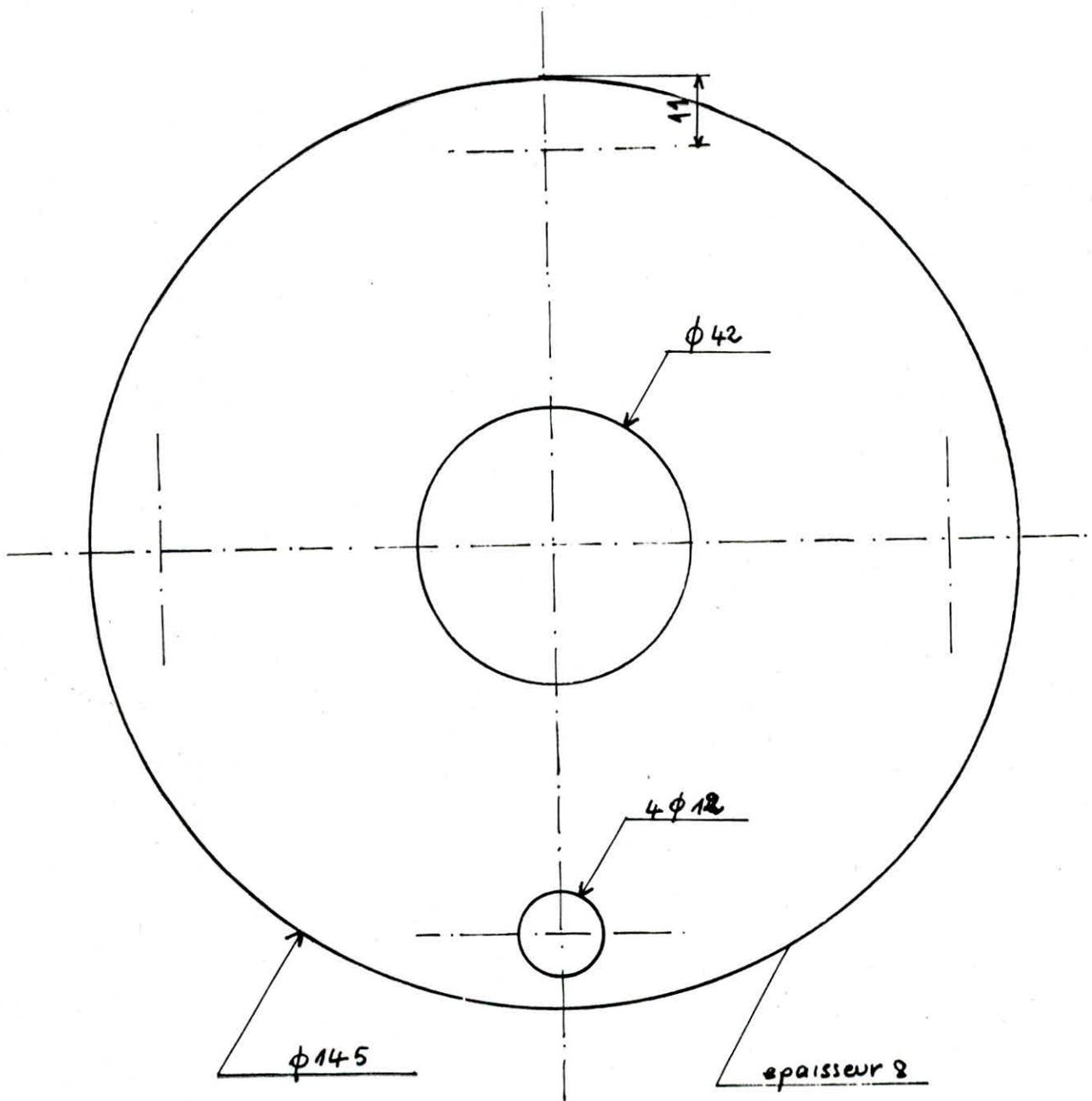
TR50200



COUPE AA

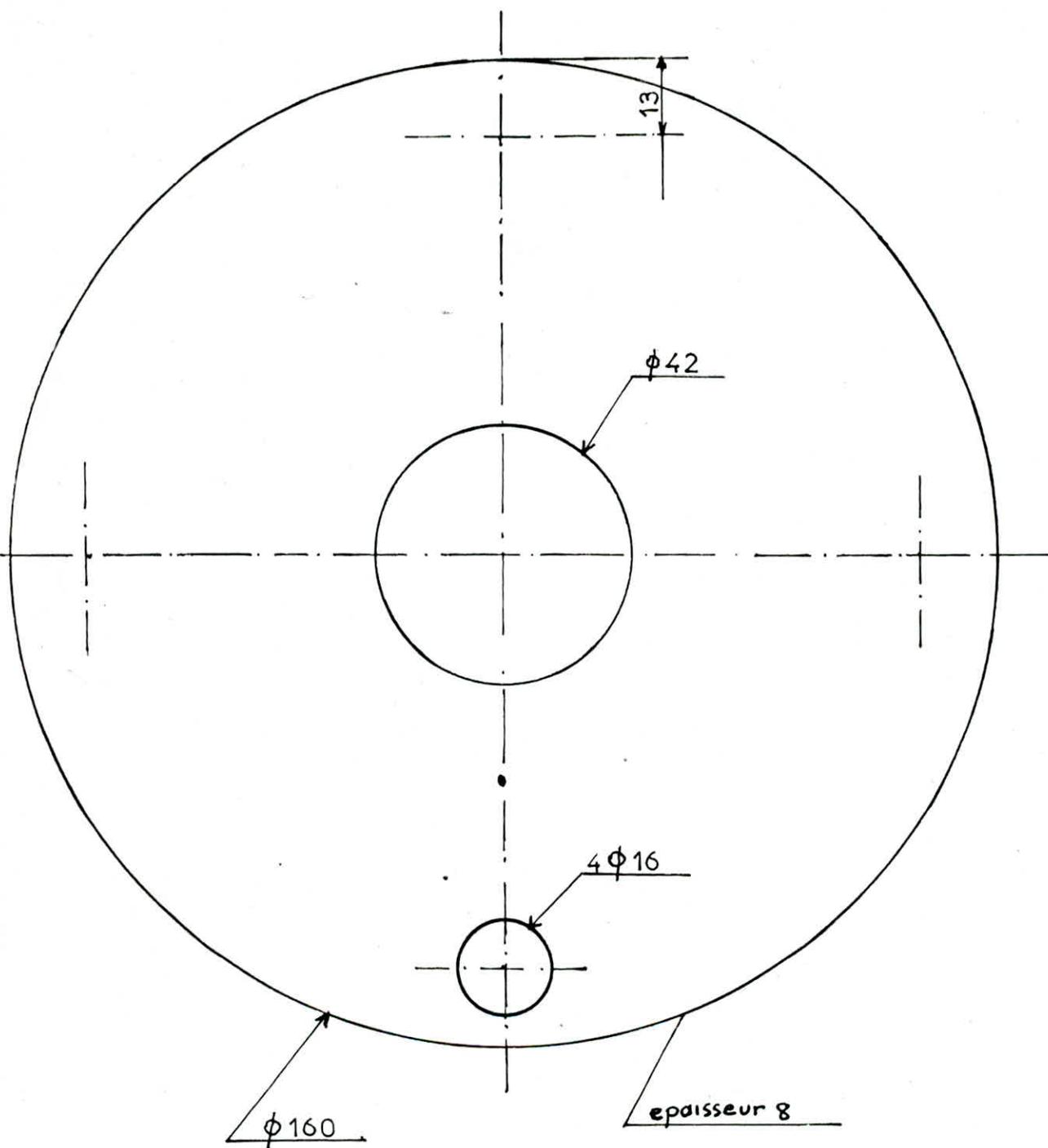


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			
Échelle	Masse		DIAPHRAGME
1/1			
Étudiant	OUAZENE	09.08.90	E.N.P.A
Promoteur	MADANI		Dép. MEC
Chef. dép	RECHEK		
Prés jury			TR2.06.00



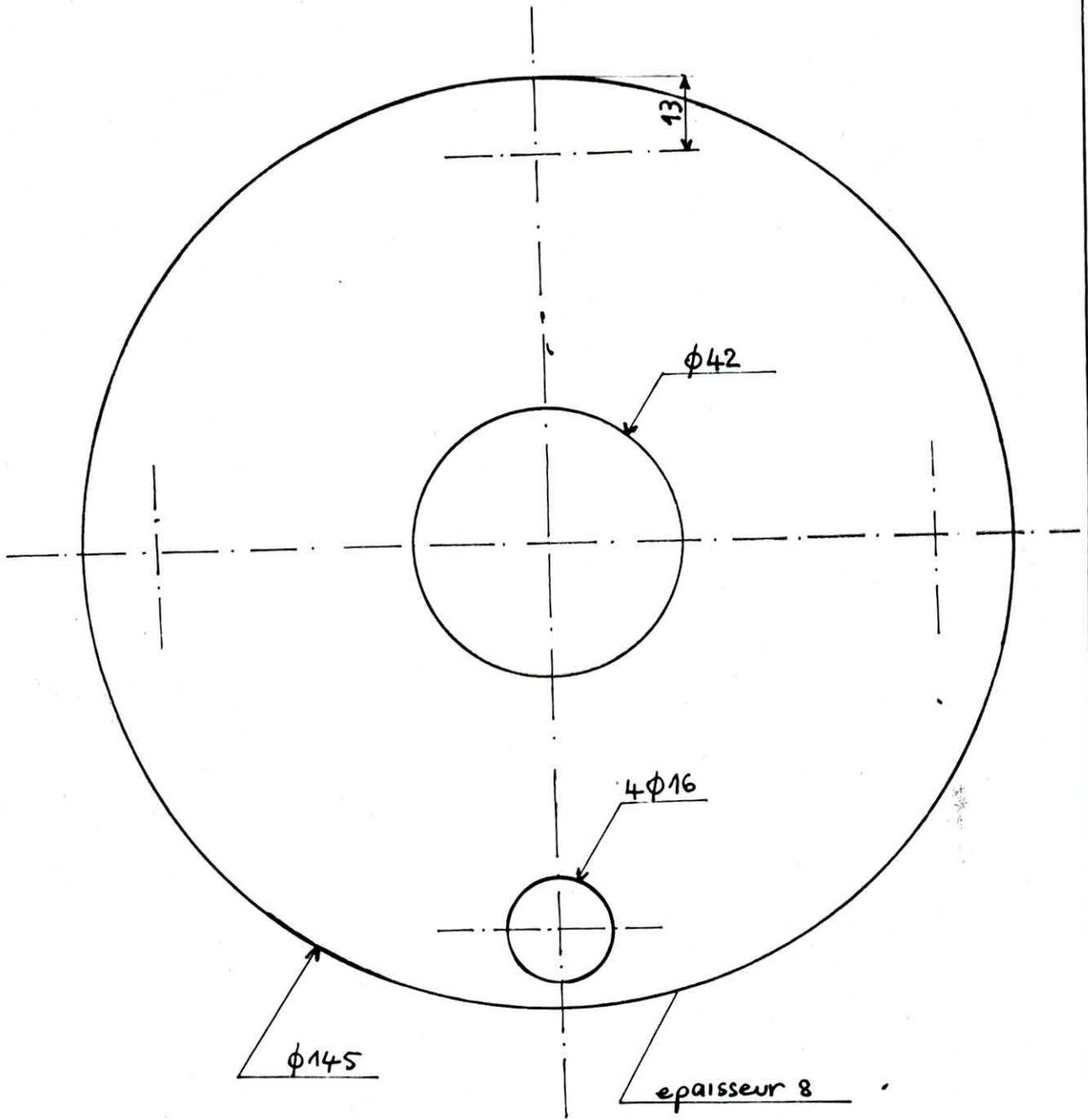
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		BRIDE DU DEBITMETRE	E.N.P.A
1/1				
Radiant	OUAZENE			Dép. MEC
Promoteur	MADANI			
Chef. dép	RECHEK			
Membres jury				
			TR207.00	



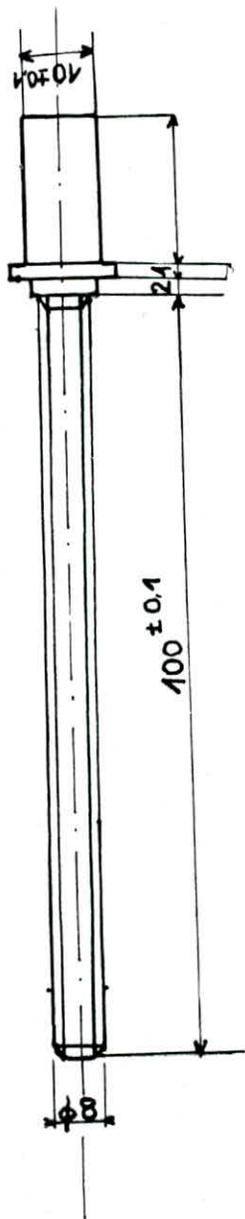
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Échelle	Masse		BRIDE D'ASPIRATION	E.N.P.A
1/1				
Étudiant	OUAZENE	09.09.94		Dép. MEC
Promoteur	MADANI			
Chef.dép	RECHEK			
Prés jury				TR2.08.00



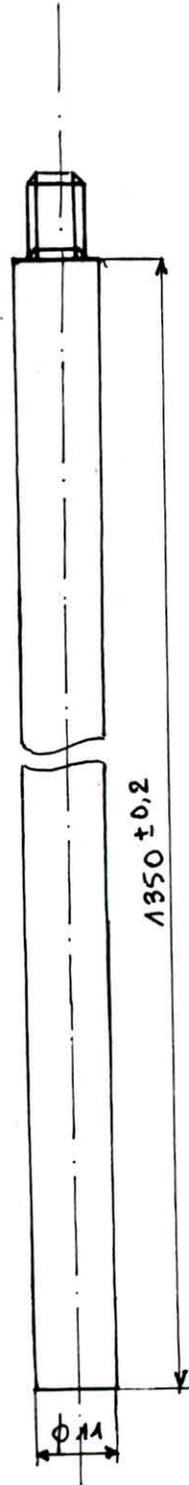
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Échelle	Masse			BRIDE DE REFOULEMENT	E.N.P.A
Étudiant	OUAZENE		09.09.99		
Prof. moteur	MADANI			TR2.09.00	
Ref. dép	RECHEK				
Prés. jury					



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		AXE FILETE DU VOLANT	E.N.P.A Dép. MEC
1/1				
Étudiant	OUAZENE		TR210.00	
Promoteur	MADANI	09.08.91		
chef.dép	RECHEK			
Prés jury				



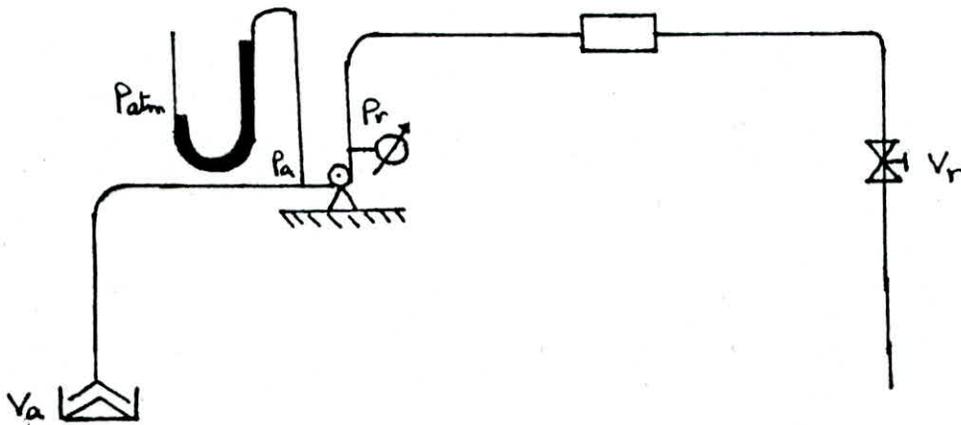
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		AXE DE GUIDAGE	E.N.P.A Dép. MEC
1/1				
Étudiant	OVAZENE	09.08.91		TR2.11.00
Promoteur	MADANI			
chef.dép	RECHEK			
Prés jury				

Manipulation

## V- MESURES ET RESULTATS DES ESSAIS

### V-1 ORGANIGRAMME POUR LA PRISE DE MESURES ET LE TRACAGE DES COURBES:



- 1; Vérifier l'état de marche de l'installation.
- 2; Purger les appareils de mesure.
- 3; On ouvre la vanne  $V_a$  au maximum, la dixième graduation de la règle correspond à cette ouverture maximale, où la section de passage entre les deux cônes est égale à la section de la conduite d'aspiration.

- 4; On règle le débit à la valeur  $Q_{max}$  à l'aide de la vanne  $V_1$  de la conduite de refoulement.
- 5; On ferme la vanne  $V_a$  du dixième de sa section maximale quand le flux est uniforme dans toute la section, on relève les pressions  $P_{asp}$  et  $P_{ref}$  et la dénivellation du mercure causée par la dépression au niveau du diaphragme pour calculer les valeurs de  $Q$ ,  $H_m$ ,  $\eta$  et  $NPSHD$ .
- 6; On porte ces valeurs sur les graphes des fonctions  $H_m(Q)$ ,  $\eta(Q)$  et  $NPSHD(Q)$ .
- 7; On ferme la vanne  $V_a$  d'un autre dixième et on reprend les étapes 5 et 6 jusqu'à atteindre la pression d'aspiration  $P_{asp} = P_{sat}$  (apparition de la cavitation).

V-2 PRISES DE MESURES ET LEURS DEPOUILLEMENT PAR LA METHODE DES MOINDRES CARREES:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{asp}$ (en Hg)	50	570	670	610	540	510	490	480	477	475	470
$P_{ref}$ (en eau)	0	0	0	6.2	6.8	7	7	7	7	7	7
$H_m$ (en Hg)	65	125	265	630	660	670	675	680	682	685	690

Utilisons le programme de calcul des différentes caractéristiques d'une pompe centrifuge du type 40-NVA-150-5 illustré dans le projet de fin d'étude " Etude du banc d'essai d'une pompe centrifuge en vue de la mise en évidence de la cavitation " étudié

par H.METAHRI, proposé par M.MADANI promotion Juin 1990 (voir annexe).

1- Calcul de la hauteur manométrique [m] en fonction du débit:

Q(I) *E+03	Hm(I)	Y	S(I)
0.1673211	10.734321	10.123216	.23235
2.294521	17.812562	18.114325	.31456
3.345621	19.303403	17.936023	.527754
5.152364	12.156249	11.210245	.621950
5.271052	10.593160	10.485673	.920061
5.310043	9.9906321	10.223629	.945234
5.331205	9.726503	10.095603	
5.350012	9.589302	9.963061	
5.361581	9.542613	9.903450	
5.370029	9.510029	9.831260	
5.391534	9.443260	9.713201	

Y: valeurs estimées de la hauteur manométrique.

S(I): erreur quadratique (sigma) sans dimension.

2- Calcul du rendement de la pompe en fonction du débit:

P <sub>p</sub>	R <sub>p</sub>	Y	SCID
1865.227	0.0110	-0.0230	.518923
1855.639	0.2506	0.2250	.423610
1840.378	0.3691	0.3442	.415366
1836.856	0.3479	0.3023	.398075
1826.273	0.3055	0.2931	.360269
1812.573	0.2871	0.2893	.360269
1792.025	0.2783	0.2882	
1764.41	0.2737	0.2865	
1712.962	0.2725	0.2356	
1595.346	0.2699	0.2848	
1595.348	0.2676	0.2831	

P<sub>p</sub>: Puissance de la pompe.

R<sub>p</sub>: Rendement de la pompe.

Y: Valeur estimé du rendement.

SCID: Erreur quadratique (sigma) sans dimension.

3- Calcul du NPSHD [m] en fonction du débit:

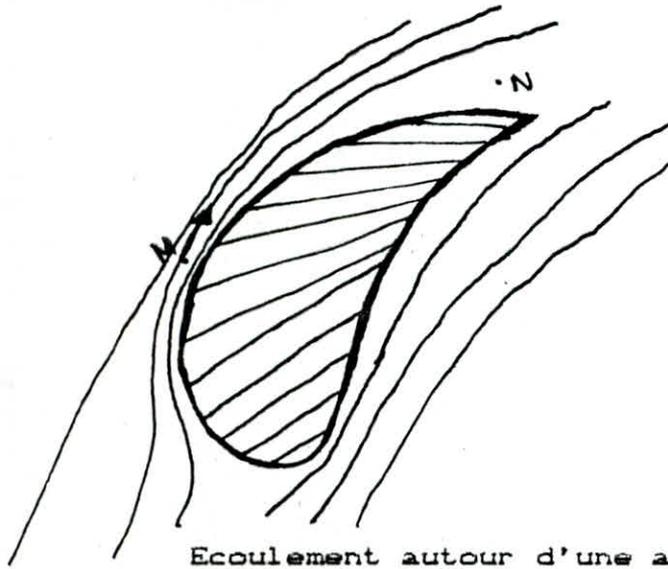
NPSHDCID	Y	SCID
4.703213	4.093216	1.174201
5.283210	5.960326	1.204201
7.345621	5.510328	1.329869
7.378926	5.340369	1.436422
6.492130	5.311156	1.573522
6.102321	5.308321	1.759251
5.843213	5.296632	
7.726921	5.286989	
5.694328	5.286632	
5.663621	5.285613	
5.611132	5.276324	

### V-3 INTERPRETATION DES COURBES:

Lorsque  $P_{asp} = P_{at} = 23369.12$  Pa, on a deux valeurs de débit  $Q_1 = 5.58 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  et  $Q_2 = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  qui correspondent à la hauteur  $H_n = 12.7$  m. On remarque donc que le débit  $Q_2$  est obtenu pour une graduation de la règle comprises entre la 2 et la 3<sup>ème</sup> graduation. Dans cette intervalle, on a pu constater les vibrations et des craquements, ainsi que des bruits continus à l'intérieur de la pompe; et enfin, tout le banc d'essai se mettait à vibrer avec une fréquence considérable. En regardant les courbes, on remarque qu'il y'a une chute du rendement de la pompe et de la hauteur d'élévation.

L'analyse de l'installation montre que le point de plus faible pression est le point M sur l'extrados de l'aube, et le point de plus haute pression est le point N du même côté de l'aube ( voir

schéma ci dessous).



Ecoulement autour d'une aube

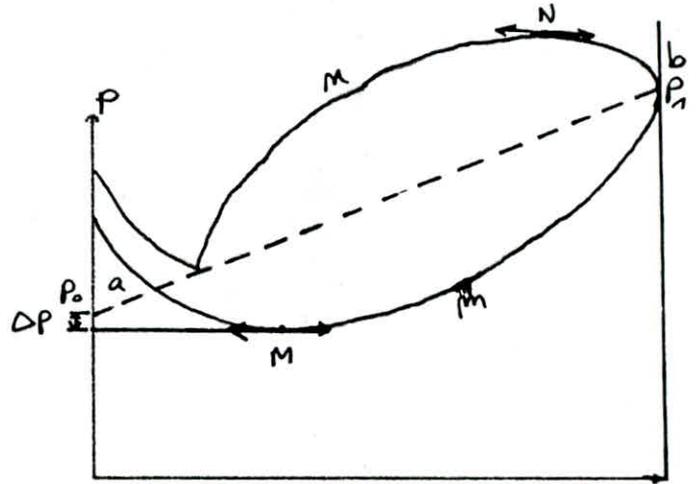


Diagramme des pressions

Sur une aube, la pression évolue de  $P_0$  à l'entrée jusqu'à  $P_1$  à la sortie avec une surpression (  $a \rightarrow b$  ) et une dépression (  $b \rightarrow a$  ), donc la pression la plus basse où il y'a apparition de bulles de vapeur est la pression  $P_M$  (  $< P_0$  ) et la pression la plus haute où il y'a implosion de bulle de vapeur, et la pression  $P_N$  (  $> P_1$  ).

Le point de rendement maximale correspond théoriquement à un débit légèrement différent du débit d'adaptation, mais, pratiquement il est difficile sinon impossible dans la plupart des cas de différencier ces deux points, donc au régime d'adaptation correspond le point  $Q_0$ ,  $Q_0 = 3.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Lorsque  $Q = 4.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  ie  $P_{asp} = P_{sat}$ ,  $NPSHD = 5.4 \text{ m}$  et  $R_p = 0.9246$ .

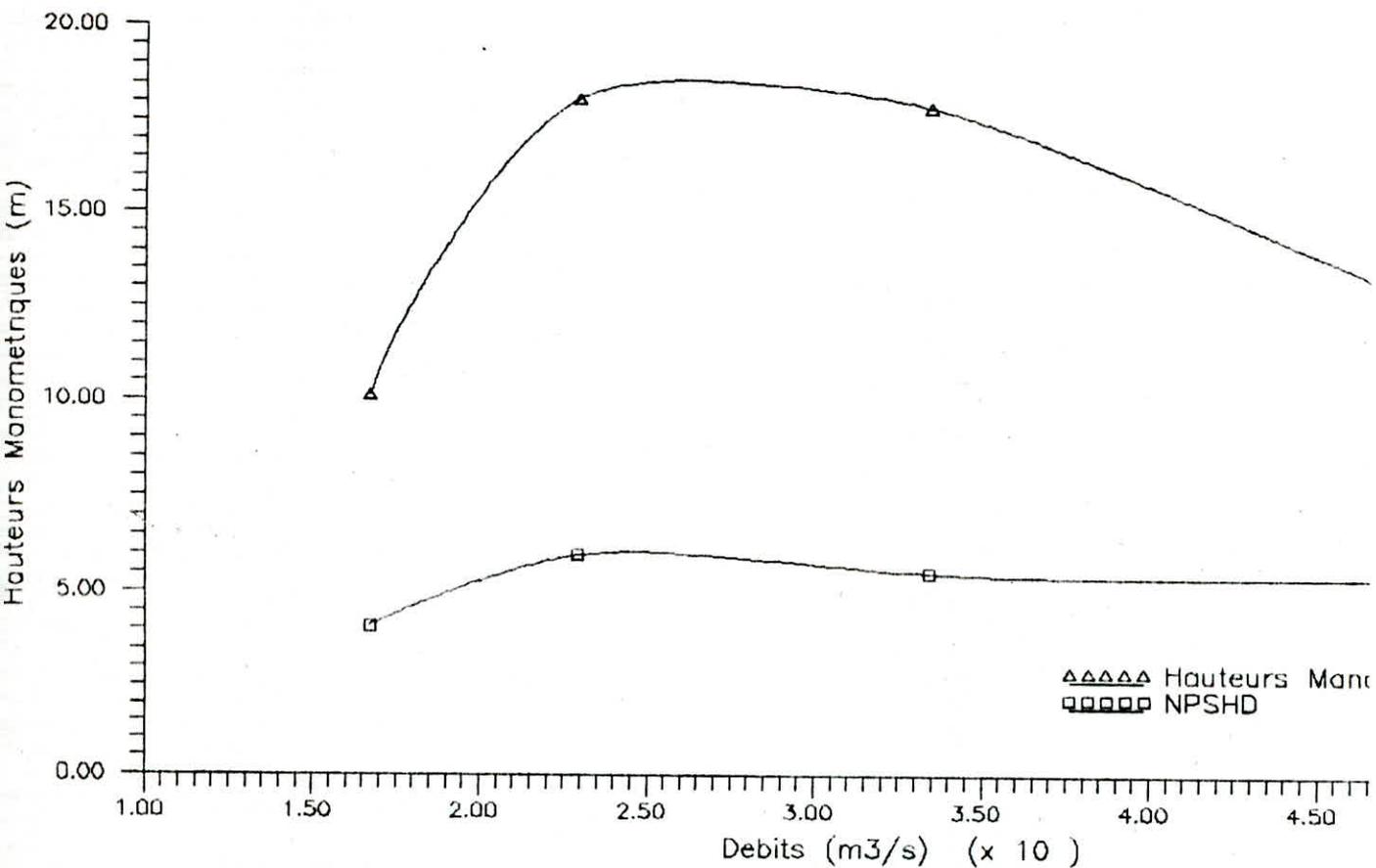


Fig 1 : Variations de la hauteur manométrique et du NPSHD en fonction du débit

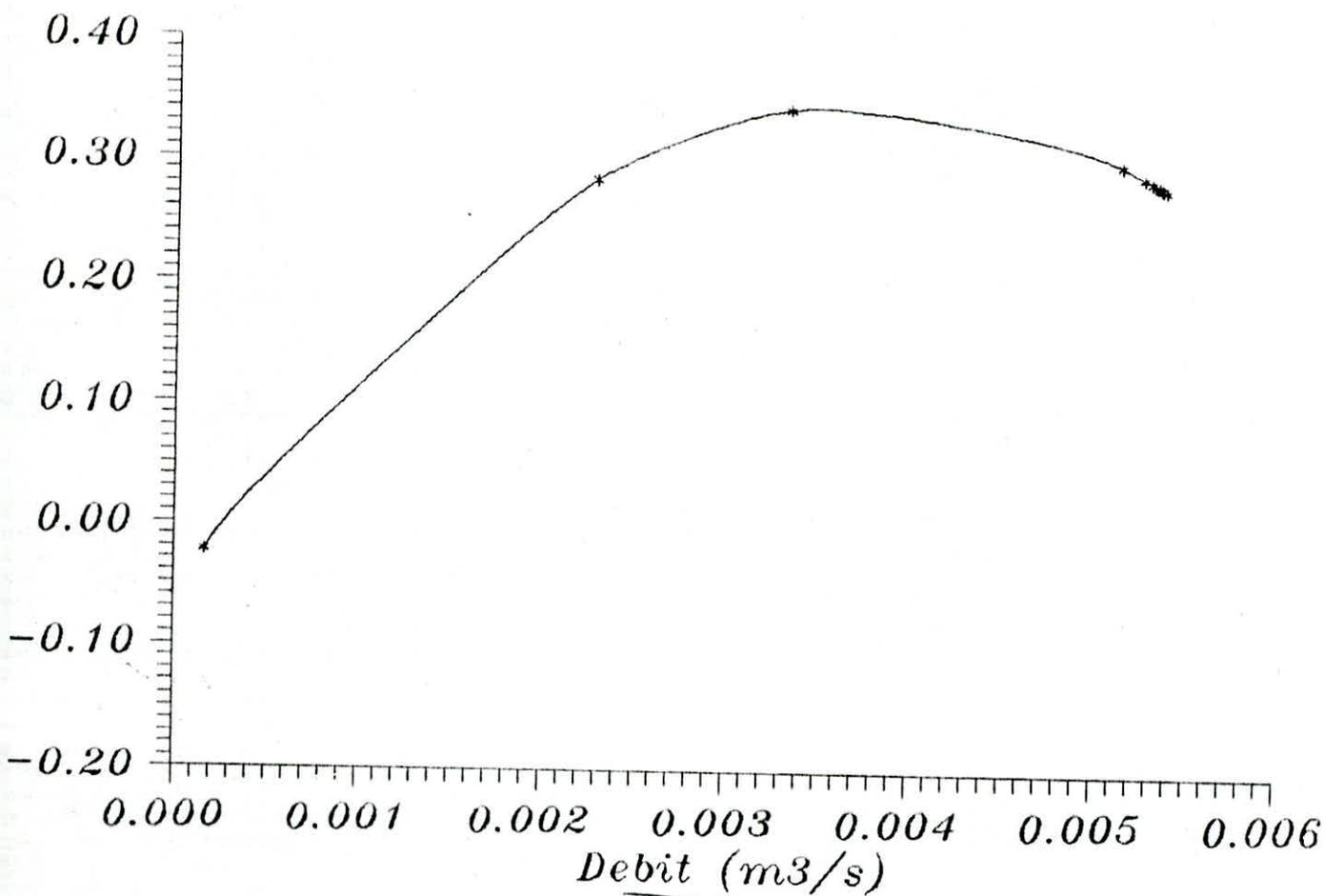


FIG2: VARIATIONS DU REND<sup>ment</sup> EN FONCTION DU DEBIT

V-4 ORGANIGRAMME POUR TRAVAUX PRATIQUES:

A) PARTIE THEORIQUE:

- Qu'est ce que le phénomène de cavitation?
- Etablir le calcul de  $H_{MCID}$ ,  $Q_{CID}$ ,  $R_{pCID}$ ,  $NPSHDCID$ .

B) DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI ( + SCHEMA).

C) MANIPULATION:

- Explication des différentes étapes de la manipulation.
  - \* Prélever pour chaque section de passage de la conduite d'aspiration les mesures suivantes:  $P_{asp}$ ,  $P_{ref}$ ,  $\Delta H$ .
- Compléter le tableau suivant:

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q											
HM											
$R_p$											
NPSHD											

- Etablir un programme de dépouillement de mesures par la méthode des moindres carrées.
- Tracer les courbes  $H_{MCQ}$ ,  $R_{pCQ}$ ,  $NPSHDCQ$ .
- Interpretation des résultats tout en mettant en évidence  $P_{asp} = P_{ref}$ .
- Conclusion.

## CONCLUSION GENERALE

La réalisation de ce banc d'essai, nous a permis de faire plus ample connaissance avec les pompes centrifuges, leurs caractéristiques et l'influence du phénomène de cavitation sur elles et par la même de mieux maîtriser des techniques d'usinage et d'assemblage des pièces ainsi que leurs dessins techniques. Il convient de dire que cette réalisation est très importante pour les manipulations de travaux pratiques qui sont toujours un complément du cours.

## BIBLIOGRAPHIE

1). Cours de turbomachines .

de Mr: KHEMIS

2). Turbomachines hydrauliques et thermiques: tome 2

de M.SEDILLE

3). Turbopompes: Théorie , tracé , et construction .

de A.T.TROSKOLANSKI

4). Technique de l'ingénieur .

Annexe

A1)

Débit sortant:

$$Q(I) = \frac{0.4279 \pi D_2^2}{4} \left[ \frac{2g(\rho_1 - \rho_2) \Delta h}{\rho_2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Avec:

- $D_2$  = Diamètre de la conduite de refoulement.
- $g = 9.81$  usi.
- $\rho_1$  = masse volumique du mercure ( $\rho_1 = 13600 \text{ kg/m}^3$ ).
- $\rho_2$  = masse volumique de l'eau ( $\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).
- $\Delta h$  = la dénivellation du mercure causée par la dépression du débitmètre.

Hauteur manométrique:

$$H_m(I) = \frac{P_{ref}(I) - P_{asp}(I)}{\rho_2 g} + Z + \frac{C_2^2(I)}{2g} - \frac{C_1^2(I)}{2g}$$

Avec:

- $P_{ref}$  = pression de refoulement en aval de la pompe.
- $P_{asp}$  = pression d'aspiration en amont de la pompe.
- $Z$  = distance entre l'orifice d'aspiration et celui de refoulement de la pompe. ( $Z = 0.14 \text{ m}$ ).
- $C_1$  = vitesse de l'eau à l'entrée de la pompe.

$$C_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi D_1^2}$$

- $C_2$  = vitesse de l'eau à la sortie de la pompe.

$$C_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi D_2^2}$$

Charge nette à l'aspiration (NPSHD):

$$\text{NPSHD}(\text{I}) = \frac{P_{\text{asp}}(\text{I})}{\rho_2 g} + \frac{C_1^2(\text{I})}{2g} - \frac{P_{\text{sat}}}{\rho_2 g}$$

Avec:

$P_{\text{sat}}$  = pression de saturation.

Rendement de la pompe:

$$P_p(\text{I}) = R_m(\text{I}) \cdot P_m(\text{I})$$

$$R_p(\text{I}) = \frac{Q(\text{I}) \cdot \rho_2 \cdot g \cdot H_m}{P_p(\text{I})}$$

Avec:

$R_m$  = Rendement du moteur.

$P_m$  = puissance du moteur.

$R_p$  = rendement de la pompe.

$P_p$  = puissance de la pompe.

- 8). Dans le cas de  $P_{asp} = P_{sat}$ , on calcule la vitesse d'aspiration  $C_1$  en fonction du débit  $Q$  correspondant et du diamètre  $D$ . On calcule le NPSH correspondant qu'on reporte sur le graphique fonction  $NPSH = NPSH(D)$ .
- 9). On trace les courbes qu'on interprète ensuite. On peut en évidence les variations brusques de ces courbes qui sont dues à la cavitation (voir § VIII-5.3).

#### IX) METHODE DES MOINDRES CARRÉS POUR LE DEPOUILLEMENT DES MESURES :

On suppose qu'on peut représenter la fonction  $f$  sous forme d'une combinaison linéaire finie des fonctions d'un système:

$$\begin{aligned} & \varphi_0(x), \varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots : \\ & f(x) = \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(x) \end{aligned} \quad (a)$$

mais on ne connaît ni le nombre  $m$  ni les coefficients  $a_j (j=0, \dots, m)$ . A partir des valeurs approchées (mesurées)  $\bar{f}_i$  de  $f(x_i), i=1, \dots, n$ , où  $n$  est suffisamment grand, on veut déterminer le nombre  $m$  et les coefficients  $a_j \approx a_j (j=0, 1, \dots, m)$ .

$$y_m(x) = \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(x) \quad (b)$$

Soit une bonne approximation de la fonction  $f$  (dans un intervalle) selon la méthode des moindres carrés on détermine les coefficients  $a_j$  ( $j=0, 1, \dots, m$ ) à partir de la condition:

$$H(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n w(x_i) \left[ \bar{f}_i - \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(x_i) \right]^2 \rightarrow \min \quad (c)$$

où  $x \rightarrow w(x)$  est une fonction positive connue, nommée pondération

l'on mesure les valeurs  $\bar{f}_i$  avec une même précision, alors:  $w(x)=1$ .

La méthode des moindres carrés permet de déterminer aussi le nombre  $m$ .

La condition nécessaire pour que la fonction  $H$  admet un maximum est:

$$\frac{\partial H}{\partial \alpha_k} = -2 \sum_{i=1}^n w(x_i) \left[ \bar{f}_i - \sum_{j=0}^m \alpha_j \varphi_j(x_i) \right] \varphi_k(x_i) = 0 \quad (d)$$

(  $k = 0, 1, \dots, m$  )

le système (d) est un système linéaire de  $m+1$  équations à  $m+1$  inconnues.

On peut démontrer que, si le système (d) possède une solution unique, alors, la fonction  $H$  admet pour cette solution la valeur maximale.

Le système (d) s'écrit sous forme (en remplaçant les paramètres inconnues par leurs estimations):

$$(e) \left\{ \begin{array}{l} a_0 \sum w_i \varphi_0 \varphi_0 + a_1 \sum w_i \varphi_1 \varphi_0 + \dots + a_m \sum w_i \varphi_m \varphi_0 = \sum w_i \bar{f}_i \varphi_0 \\ a_0 \sum w_i \varphi_0 \varphi_1 + a_1 \sum w_i \varphi_1 \varphi_1 + \dots + a_m \sum w_i \varphi_m \varphi_1 = \sum w_i \bar{f}_i \varphi_1 \\ \vdots \\ a_0 \sum w_i \varphi_0 \varphi_m + a_1 \sum w_i \varphi_1 \varphi_m + \dots + a_m \sum w_i \varphi_m \varphi_m = \sum w_i \bar{f}_i \varphi_m \end{array} \right.$$

où:  $\sum w_i \varphi_l \varphi_k = \sum_{i=1}^n w(x_i) \varphi_l(x_i) \varphi_k(x_i) ;$

$\sum w_i \bar{f}_i \varphi_k = \sum_{i=1}^n w(x_i) \bar{f}_i \varphi_k(x_i) ; \quad k = 0, 1, \dots, m$

Pour éliminer l'influence des erreurs des coefficients du système (e) sur sa solution, on étudiera désormais le système (e) pour

l'hypothèse que les fonctions  $\varphi_0(x), \dots, \varphi_m(x)$  forment un système orthogonal sur l'ensemble des points  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

**DEFINITION:**

1°) Les fonctions  $\varphi_k(x)$  et  $\varphi_j(x), (k \neq j)$ , sont dites orthogonales par rapport au poids  $w(x)$  sur l'ensemble des points  $x_1, x_2, \dots, x_n$  si:

$$\sum_{i=1}^n w_i \varphi_k(x_i) \varphi_j(x_i) = \sum_{i=1}^n w(x_i) \varphi_k(x_i) \varphi_j(x_i) = 0 \quad (f)$$

2°) Le système  $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$  est dit système orthogonal des fonctions par rapport au poids  $w(x)$  sur l'ensemble des points  $x_1, x_2, \dots, x_n$  s'il y a lieu la condition (f) pour  $k \neq j$  ( $k, j = 0, 1, \dots, m$ ).

Le système  $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$  étant un système orthogonal par rapport au poids  $w(x)$  sur l'ensemble des points  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , le système linéaire (e) admet la forme :

$$a_k \sum_{i=1}^n w_i \varphi_k^2(x_i) = \sum_{i=1}^n w(x_i) \bar{f}_i \varphi_k(x_i) ; \quad (k = 0, 1, \dots, m)$$

D'où:

$$a_k = \frac{1}{\lambda_k} \sum_{i=1}^n w(x_i) \bar{f}_i \varphi_k(x_i) \quad (g)$$

$$\text{où : } \lambda_k = \sum_{i=1}^n w(x_i) \varphi_k^2(x_i) ; \quad k = 0, 1, \dots, m$$

La formule (g) montre que le coefficient  $a_k$  ne dépend pas des autres coefficients  $a_0, a_1, \dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots, a_m$ .

Si, donc on ajoute un système orthogonal  $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$  encore une fonction  $\varphi_{m+1}(x)$  il suffit de calculer le coefficient  $a_{m+1}$  (selon la formule (g), avec " $m$ " = " $m+1$ "). Les coefficients  $a_0, a_1, \dots, a_m$

restent sans changement .C'est une propriété importante de la méthode étudiée.

Construction d'un système orthogonal des polynômes:

$$Q_k(x) = 1 x^k + \alpha_k^{(1)} x^{k+1} + \dots + \alpha_k^{(k-1)} x + \alpha_k^{(k)} \quad (k=0, 1, \dots)$$

par rapport au poids  $w(x)$  sur l'ensemble des points  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Un tel système se construit de la manière suivante :

Tout polynôme  $Q_k(x)$  est de degré  $k$  dont le coefficient de  $x^k$  est égal à 1. On a donc :  $Q_0(x) = 1$

Et  $Q_1(x)$ , on peut le mettre sous la forme:

$$Q_1(x) = x - C_1 \quad Q_0(x) = x - C_1$$

Comme:  $\sum w_i Q_1 Q_0 = 0 \iff \sum w_i (x_i - C_1) = 0 \iff \sum w_i x_i = C_1 \sum w_i$

On a:

$$C_1 = \frac{\sum_{i=1}^n w(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w(x_i)}$$

Et si l'on mesure  $f_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) avec une même précision, alors,  $w_i = w(x_i) = 1$  ( $i=1, \dots, n$ ) et on a:

$$C_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Ainsi on a:

$$Q_0(x) = 1, \quad Q_1(x) = x - C_1 \quad (n)$$

où:  $C_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  (on suppose  $w(x)=1$ )

Le polynôme suivant se met sous la forme :

$$Q_2(x) = (x - C_2^{(1)}) \cdot Q_1(x) - C_2^{(2)} \cdot Q_0(x)$$

Et pour déterminer les coefficients  $C_2^{(1)}$  et  $C_2^{(2)}$  on a les deux conditions :

$$\sum Q_2 \cdot Q_0 = 0 \quad \text{et} \quad \sum Q_2 \cdot Q_1 = 0 \quad (\text{en supposant } Q_0 = 1)$$

On peut établir des formules de récurrence exprimant  $Q_{k+1}$  par  $Q_k(x)$  et  $Q_{k-1}(x)$ :

On obtient ces formules en se servant du théorème suivant:

**THEOREME:**

Si  $Q_r(x)$ , ( $r=0,1,\dots,m$ ) est un système orthogonal des polynômes sur l'ensemble des points  $x_1, x_2, \dots, x_n$  on a:

$$\sum_{i=1}^n x_i^k Q_r(x_i) = 0 \quad \text{pour } k = 0, 1, \dots, r-1 \quad (i)$$

Il en résulte de ce théorème que si  $\Psi(x)$  est un polynôme de degré  $k < r$  on a:

$$\sum_{i=1}^n \Psi(x_i) Q_r(x_i) = 0 \quad (j)$$

**THEOREME:**

Si les polynômes  $Q_0(x), Q_1(x), \dots, Q_k(x)$  forment un système orthogonal sur l'ensemble des points  $x_1, \dots, x_n$ , alors le polynôme

$$Q_{k+1}(x) = (x - C_{k+1}^{(1)}) \cdot Q_k(x) - C_{k+1}^{(2)} \cdot Q_{k-1}(x) \quad ; \quad k=1, 2, \dots \quad (k)$$

Où:

$$C_{k+1}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot Q_k^2(x_i)}{\sum_{i=1}^n Q_k^2(x_i)} \quad ; \quad C_{k+1}^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot Q_{k-1}(x_i) \cdot Q_k(x_i)}{\sum_{i=1}^n Q_{k-1}^2(x_i)} \quad (l)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

Est orthogonal par rapport à chaque polynôme  $(x)^r$ , ( $r=0,1,\dots,k$ ) sur l'ensemble des points  $x_1, \dots, x_n$ .

REMARQUE:

Si  $x_{i+1} = x_i + n$  ( $i=1, \dots, n-1$ ), le calcul des coefficients  $C_{k+1}^{(1)}$  et  $C_{k+1}^{(2)}$  se simplifie si on fait un changement de la variable  $x$ ;

$$u = \frac{x - \bar{x}}{n}, \quad \text{où} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

ERREURS COMMISES SUR L'EVALUATION DES VALEURS APPROCHEES  $a_j$  DES PARAMETRES  $\alpha_j$  ( $j=0,1,\dots,m$ ):

Si les mesures des valeurs approchées  $\bar{f}_i$  de  $f(x_i)$  ( $i=1, \dots, n$ ) ont les propriétés suivantes:

- 1°) Elles sont indépendantes
- 2°) Elles sont faites avec une même précision
- 3°) On ne commet pas d'erreurs systématiques
- 4°) Les erreurs inévitables suivent la loi normale d'un écart quadratique  $\sigma$  (qui caractérise l'erreur de mesure)

On a alors:

$$\sigma^2 \approx s_m^2 = \frac{1}{n-m-1} \sum_{i=1}^n \left[ \bar{f}_i - (a_0 \cdot \varphi_0(x_i) + a_1 \cdot \varphi_1(x_i) + \dots + a_m \cdot \varphi_m(x_i)) \right]^2 \quad (10)$$

L'erreur moyenne quadratique  $\delta_{a_j}$  de l'évaluation  $a_j$  du paramètre inconnu  $\alpha_j$  est donnée par la formule :

$$s = \frac{\sigma}{\sqrt{\lambda_j}} ; \quad \text{où} \quad \lambda_j = \sum_{i=1}^n (\varphi_j(x_i))^2 \quad (11)$$

$$j = 0, 1, \dots, m$$

et pour l'erreur moyenne quadratique  $\sigma$  de la mesure, on a la formule approchée:

$$\sigma \approx s_m \quad (12)$$

où  $s_m^2$  est donné par la formule (11).

**DETERMINATION D'UN DEGRE OPTIMAL  $m_0$  DU POLYNOME (b):**

On fait les calculs pour  $m=1$ , puis pour  $m=2$ , etc...., en calculant chaque fois  $s_m^2$  suivant la formule (11).

Si  $m < m_0$ , la valeur de  $s_m^2$  dépend non seulement des erreurs inévitables des mesures (de  $f_i$ ) mais surtout du fait que  $m$  est trop petit. C'est pourquoi, si  $m$  croit, alors  $s_m^2$  diminue sensiblement. Lorsque  $m$  atteint la valeur optimale  $m_0$ , la valeur  $s_{m_0}^2$  sera à peu près égale à  $\sigma^2$ , les erreurs inévitables de mesures étant prises en considération (elles sont en général inférieures à  $\sigma$ ). Si  $m$  continue de croître, la valeur  $s_m^2$  conservera pratiquement la même valeur. Il en résulte qu'on détermine le degré optimal  $m_0$  du polynôme (b) en se servant de la condition :

$$s_{m_0}^2 \approx s_{m_0+1}^2 \approx \sigma^2 \quad (13)$$



```

20 PRINT
22 PRINT "*****"
226 PRINT "2*) calcul du rendement de la pompe en fonction du débit:"
227 PRINT "
9000 FOR I=1 TO 10
9010 READ RM(I),PM(I)
9011 NEXT I
9020 DATA .9533,1956.6,.9484,1956.6,.9406,1956.6,.9388,1956.6,.9332,1957,
9021 PRINT TAB(12)"Pp";TAB(35);"Rp"
9025 FOR I=1 TO N
9030 PP(I)=RM(I)*PM(I)
9050 RP(I)=Q(I)*R2*G*HM(I)/PP(I)
9060 PRINT TAB(8);(STR$(PP(I))+ " ");TAB(31);(STR$(RP(I))+ " ")
9070 F(I)=RP(I)
9075 X(I)=Q(I)
9090 F(I)=F(I)/B2
9095 REM F(I) sans dimension
9096 NEXT I
9097 GOSUB 9000
9110 PRINT "Représentation D'une fonction F(X) établi par une mesure"
9115 PRINT "Degré";J+1
9116 PRINT"x : valeurs mesurées du débit."
9117 PRINT"f : valeurs mesurées du rendement."
9118 PRINT"y : valeurs estimées du rendement."
9120 PRINT TAB(15);"x";TAB(35);"f";TAB(55);"y"
9130 FOR I=1 TO N
9140 Y(I)=A*H(I)
9150 FOR K=1 TO J+1
9160 Y(I)=Y(I)+(A(K)*G(K,I))
9170 NEXT K
9175 PRINT TAB(8);STR$(X(I))+ " ";TAB(31);STR$(F(I)*B2)+ " ";TAB(50);
STR$(Y(I)*B2)+ " "
9180 NEXT I
9190 PRINT "Erreur quadratique (sigma) sans dimension"
9191 PRINT "S( 0 )=";SQR(S)
9192 FOR I=1 TO J+1
9195 PRINT "S( ";I; " )=";SQR(S(I))
9196 NEXT I
9200 PRINT
9205 PRINT "*****"
9211 PRINT "3*) calcul du NPSHd [m] en fonction du débit:"
9212 PRINT "
93010 PRINT TAB(10)"NPSHd(I)"
94020 FOR I=1 TO N
94025 NPSHD(I)=PASP(I)/(R2*G)+(C1(I)^2/(2*G))-(PSAT/(R2*C))
94030 PRINT TAB(8);(STR$(NPSHD(I))+ " ")
94040 F(I)=NPSHD(I)
94050 X(I)=Q(I)
94060 F(I)=F(I)/B3
94065 REM F(I) Sans dimension
94070 NEXT I
94075 GOSUB 9000
94090 PRINT "Représentation D'une fonction F(X) établi par une mesure"

```

```

4095 PRINT "Degré";J+1
4096 PRINT "x : valeurs mesurées du débit."
4097 PRINT "f : valeurs mesurées du NPSHd."
4098 PRINT "y : valeurs estimées du NPSHd."
4100 PRINT TAB(15);"x";TAB(35);"f";TAB(55);"y"
4110 FOR I=1 TO N
4120 Y(I)=A*H(I)
4130 FOR K=1 TO J+1
4140 Y(I)=Y(I)+A(K)*G(K,I)
4150 NEXT K
4155 PRINT TAB(8);STR$(X(I))+ " ";TAB(31);STR$(F(I)*B2)+ " ";TAB(50);
STR$(Y(I)*B3)+ " "
4160 NEXT I
4170 PRINT "Erreur quadratique (Sigma) sans dimension"
4171 PRINT "S( 0 )=";SQR(S)
4172 FOR I=1 TO J+1
4175 PRINT "S(";I;")=";SQR(S(I))
4176 NEXT I
4190 PRINT "*****"
5000 STOP
9000 REM *****
9001 REM Sous programme pour la méthode des moindres carrés:
9002 REM -----
9010 REM
9020 REM Représentatif d'une fonction établi par une mesure
9030 REM Méthode des moindre carrés
9040 REM Représentation par un système orthogonal des polynômes
9050 REM
9060 REM *****
9090 LET A=0
9100 FOR I=1 TO N
9110 H(I)=1
9120 A=A+F(I)
9130 NEXT I
9140 A=A/N
9150 S=0
9160 FOR I=1 TO N
9170 E(I)=F(I)-(A*H(I))
9180 S=S+(E(I)^2)
9190 NEXT I
9200 S=S/(N-1)
9210 M=0
9220 FOR I=1 TO N
9230 M=M+X(I)
9240 NEXT I
9250 C1=M/N
9260 M=0
9270 M1=0
9280 FOR I=1 TO N
9290 G(1,I)=X(I)-C1
9300 M=M+G(1,I)*F(I)
9310 M1=M1+G(1,I)*G(1,I)
9320 NEXT I

```

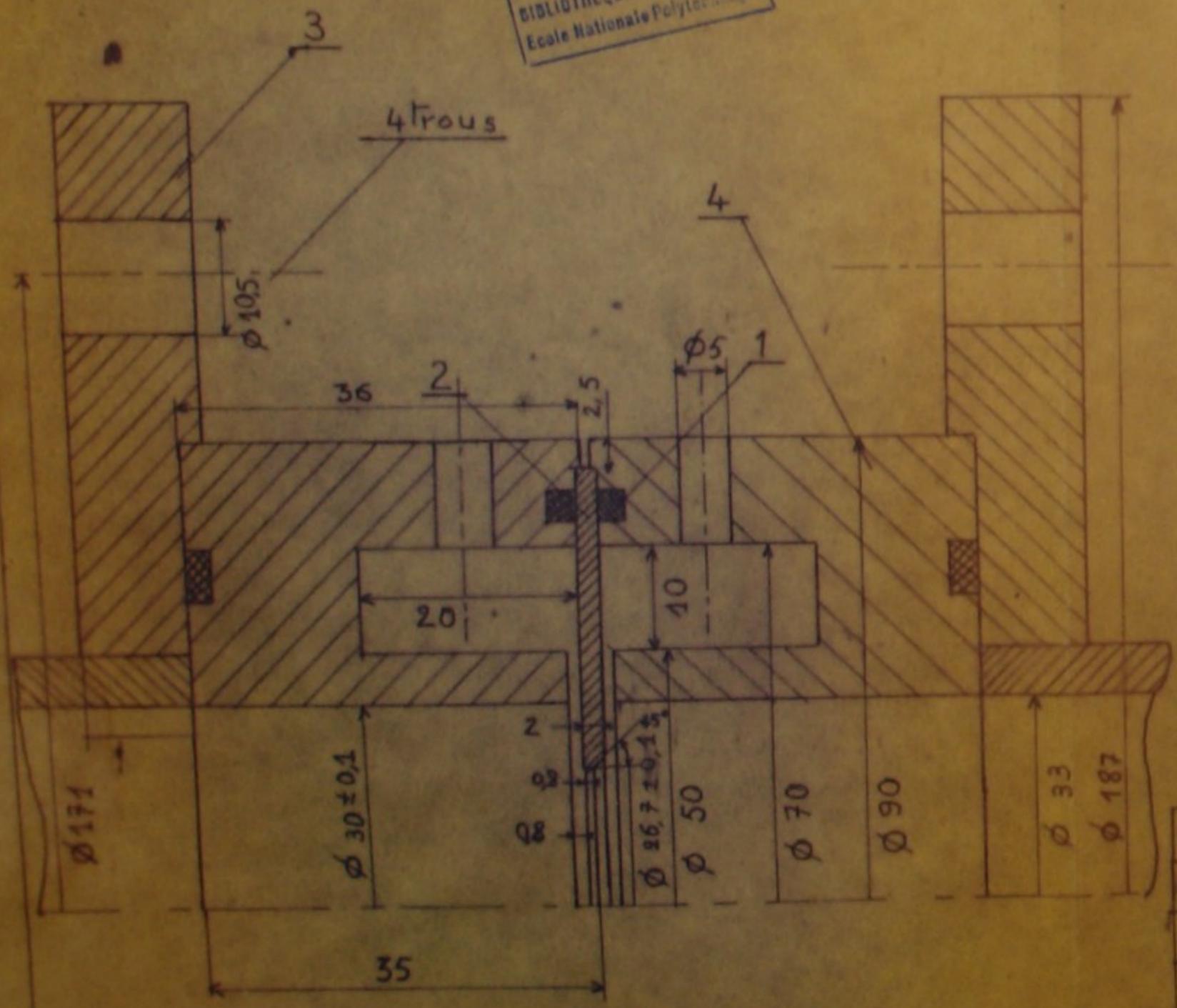
```

9330 A(I)=M/M1
9340 M=0
9350 FOR I=1 TO N
9360 E(I)=E(I)-A(1)*G(1,I)
9370 M=M+E(I)*E(I)
9380 NEXT I
9390 S(1)=M/(N-1)
9400 FOR K=1 TO N-1
9410 M1=0
9420 M2=0
9430 M3=0
9440 M4=0
9450 FOR I=1 TO N
9460 M1=M1+X(I)*G(K,I)*G(K,I)
9470 M2=M2+G(K,I)*G(K,I)
9475 IF K=1 THEN LET M5=H(I)
9476 IF K>1 THEN LET M5=G(K-1,I)
9480 M3=M3+X(I)*M5*G(K,I)
9490 M4=M4+M5*M5
9500 NEXT I
9510 C1=M1/M2
9520 C2=M3/M4
9530 M1=0
9540 M2=0
9550 FOR I=1 TO N
9555 IF K=1 THEN LET M5=H(I)
9556 IF K>1 THEN LET M5=G(K-1,I)
9560 G(K+1,I)=(X(I)-C1)*G(K,I)-C2*M5
9570 M1=M1+G(K+1,I)*G(K+1,I)
9580 M2=M2+G(K+1,I)*G(K+1,I)
9590 NEXT I
9600 A(K+1)=M1/M2
9610 M=0
9620 FOR I=1 TO N
9630 E(I)=E(I)-(A(K+1)*G(K+1,I))
9640 M=M+(E(I)^2)
9650 NEXT I
9655 IF K=N-2 THEN LET S(K+1)=M:GOTO 9670
9660 S(K+1)=M/(N-K-2)
9670 IF K=1 THEN INPUT "Degré";J:LET J=J-1
9680 IF J=K THEN GOTO 9710
9690 NEXT K
9710 FOR I=1 TO N
9720 Y(I)=A*H(I)
9730 FOR K=1 TO J+1
9740 Y(I)=Y(I)+A(K)*G(K,I)
9750 NEXT K
9770 NEXT I
9790 RETURN

```

المكتبة الوطنية المتعددة التقنيات  
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
 Ecole Nationale Polytechnique

المكتبة الوطنية المتعددة التقنيات  
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
 Ecole Nationale Polytechnique



PM 16 9A  
 -1-

4	TR2.05.00	2	Fonte	Fabriquée ENP
3	TR2.07.00	2	Acier	Fabriquée ENP
2	TR2.06.00	1	Fonte	"
1	Joint d'étanchéité	4	Caoutchouc	Acheté
N:	Désignation	Nbre	Matière	Observation

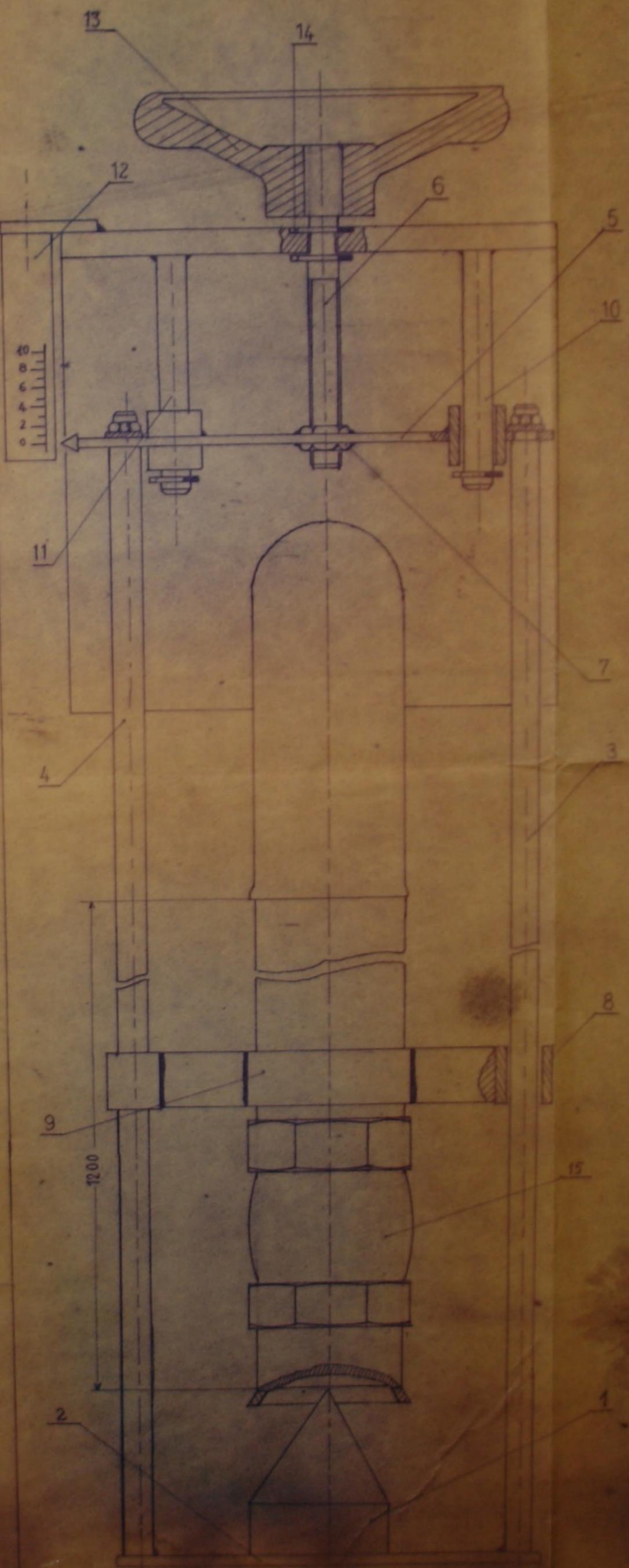
Echelle 2:1 -

Etudiant: S. OUZENE  
 Promoteur: M. MADANI

Débit-mètre

ENPA  
 Génie Mécanique  
 Promo: Juin 1991

مكتبة جامعة القاهرة  
BIBLIOTHEQUE - القاهرة  
Ecole Nationale Polytechnique



مكتبة جامعة القاهرة  
BIBLIOTHEQUE - القاهرة  
Ecole Nationale Polytechnique

PM 01631  
- 2 -

15	Clapet non-retour	1	XC35	Acheté
14	Anneau élastique 10x1	4	XC35	Acheté
13	Volant plein de 420 Alésage 40	1	XC35	Acheté
12	Règle graduée	1	Flexiglass	Fabrique EXP
11	Même axe que 10	1	"	"
10	Axe	1	XC35	"
9	TR2 03 00	1	ACIER	"
8	Cylindre Creu, ép: 4 mm	1	ACIER	Fabrique EXP
7	Ecrou H, M.B.	1	ACIER	Acheté
	TR2 10 00	1	XC35	Fabrique EXP
5	TR2 04 00	1	XC35	Fabrique EXP
4	Même axe que 3	1		
3	TR2 11 00	1	XC35	Fabrique EXP
2	TR2 02 00	1	ACIER	Soudé
1	TR2 01 00	1	Réglage	Fabrique EXP

N°	Désignation	Mat.	Observations
1	Dispositif de réglage	ENPA	
2	De la Cavité	Une Mécanique	
3			

Dessiné par : S. OUAZENE  
 Vérifié par : M. MADINE  
 Date : Juin 1981



