

Calcul des soufflets à ondes soudées pour tiges de commande
des écrans mobiles du système UHV de la machine AA à l'aide
du programme Safe Shell

A. Poncet

Introduction

La machine AA comporte quelques 20 membranes à ondes soudées et à course linéaire pour assurer l'étanchéité entre les tiges mobiles de commande des écrans et la chambre à vide. Ces membranes, actuellement en inox 304 (voir figure 1), ont une course de 60 mm en compression et effectuent un aller et retour en 250 ms ou moins. Leur durée de vie doit être pratiquement infinie ($> 10^7$ cycles).

Un certain nombre de membranes prototypes ont été cyclées sur machines de test (voir tableau figure 2) et, mis à part les problèmes apparus à la suite d'un changement de provenance de la matière première, les résultats de tenue à la fatigue sont encourageants.

Cependant, compte tenu du caractère critique qu'a la fiabilité des membranes pour la machine AA, et en l'absence de données actuelles à caractère plus statistique sur leur comportement à la fatigue, il apparaît nécessaire de continuer leur développement.

Cette note donne quelques axes de développement mécaniques possibles, basés sur l'analyse des contraintes et déformations mécaniques résultant des sollicitations.

A. Analyse des contraintes et déformations à l'aide du programme SAFE-SHELL¹⁾ (éléments finis)

La figure 3 représente le dessin de l'outillage utilisé pour former les ondulations. Ces dimensions ont été prises pour établir le modèle à 66 éléments représenté sur la figure 4.

Les figures 4 et 5 donnent, pour une pression de 1 atmosphère et une compression de 60%, la distribution méridionale des contraintes de flexion sur la surface intérieure (exposée au vide) de l'ondulation, pour les deux cas de calcul suivants:

1) Ondulation d'épaisseur 0,13 mm

courbe (a): distribution méridionale de la contrainte totale de flexion sur la face intérieure

courbe (b): distribution méridionale de la contrainte de flexion due à la pression

partie ombrée: zone de variation cyclique de la contrainte méridionale de flexion sur la face intérieure en cours du mouvement.

2) Ondulation composée d'une coupelle concave de 0,15 mm et d'une coupelle convexe d'épaisseur 0,13 mm (cas fictif destiné à assurer une répartition plus uniforme des contraintes)

Les courbes (a') et (b') sont les courbes correspondantes aux cas (a) et (b) ci-dessus.

Les figures 6 et 7 donnent les valeurs des différentes contraintes méridiennes et circonférentielles ainsi que la contrainte équivalente de Von Mises.

La valeur maximale de la contrainte équivalente τ_{eq} se situe dans la zone pliée près de l'axe de l'ondulation et vaut

$$\sim 52,6 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{dans le pli intérieur})$$

Le code EJMA²⁾ appliqué à cette ondulation soumise aux mêmes sollicitations, mais sans la forme pliée, donne une valeur de contrainte équivalente de

$$\sim 50 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{dans la soudure}).$$

La figure 8 représente la déformée de l'ondulation d'épaisseur 0,13 mm (p = 1 atm., compression 60%).

B. Rigidité d'une ondulation et première fréquence propre

La rigidité de l'ondulation donnée par Safe Shell pour la géométrie considérée est de

$$7,90 \text{ kg/mm.}$$

La rigidité mesurée sur 1 élément de 10 ondulations chacune (M. Maurer) varie de (voir figure 9) 5 kg/mm à 7,2 kg/mm en fonction de la charge (lorsque la flèche est grande et les ondulations se touchent, la rigidité bien entendu augmente). La rigidité mesurée sur une membrane de 80 ondulations telle que celles utilisées dans la machine AA est de

$$8 \text{ kg/mm par ondulation,}$$

valeur qui est très proche de celle calculée avec Safe Shell.

Anders BLOM³⁾ a vérifié expérimentalement et par éléments finis la formule de calcul de la première fréquence propre (formule également utilisée par le code EJMA):

$$f_{\text{Hertz}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

K = rigidité totale du soufflet en N/m

M = masse du soufflet en kg.

La figure 10 donne la première fréquence propre en fonction du nombre d'ondulations, la rigidité d'une ondulation variant de 5 kg/mm à 8 kg/mm et sa masse pour une épaisseur de 0,13 mm étant de 2,7 grammes.

C. Influence de la forme de l'onde et de la longueur libre du soufflet

Safe Shell a été utilisé afin de déterminer l'influence de la géométrie sur les contraintes et la rigidité du soufflet dans les cas suivants:

a) déplacement du pli (a) de l'onde de 0,8 mm vers l'intérieur du soufflet, afin de diminuer les contraintes de flexion dans la partie plate, qui prend la plus grande partie de la flexion

- + diminution de $\cong 27\%$ de la contrainte équivalente mais:
- + diminution de $\cong 15,2\%$ de la rigidité de l'onde.

b) déplacement du pli de l'onde (a) de 0,8 mm vers l'extérieur du soufflet (effet inverse du précédent)

- + augmentation de 15% des contraintes équivalentes
- + augmentation de 18,7% de la rigidité de l'onde.

c) Augmentation volontaire ou accidentelle de la longueur libre du soufflet:

Pas de l'onde = 1,5 mm au lieu de 1 mm

- + augmentation de 5% de la rigidité et de la contrainte équivalente.

D. Discussion

L'analyse avec Safe Shell des contraintes et déformations fait ressortir les points suivants:

1) La valeur maximum de la contrainte méridienne de flexion sur la face intérieure de la coupelle concave de 53 kg/mm^2 est peut être pessimiste pour les raisons suivantes:

- + le modèle en éléments finis rigidifie toujours une structure
- + les grandes flèches imposées à l'ondulation par rapport à l'épaisseur nécessiterait peut être une analyse non linéaire en grands déplacements, ce qui aurait probablement pour effet d'augmenter les contraintes de membranes et diminuer les contraintes de flexion.

Quoiqu'il en soit, le soufflet est très contraint et fonctionne probablement en partie en zone de plasticité conventionnelle ($> 0,2\%$ de déformation), comme semblent également l'indiquer les constatations suivantes:

- a) un soufflet non préalablement écroui (c'est à dire sortant de traitement thermique) et comprimé une fois à 60% perd quelques millimètres de longueur libre (c'est à dire est écroui de quelques %).
- b) un soufflet avant d'être monté sur machine de test pour épreuve à 10^6 manoeuvres est préalablement testé en étanchéité à spires jointives: il perd ainsi 10 à 15% de longueur libre, est donc écroui de 10 à 15%, et malgré cela, perd encore quelques % de longueur libre après 10^6 cycles!

2) Si quelques doutes sur l'intensité de contrainte réelle peuvent subsister, la distribution calculée des contraintes de flexion méridiennes est certainement réelle et montre que:

- + la flexion de l'élément est pratiquement entièrement absorbée par la partie plate;
- + la face concave de l'ondulation est plus contrainte que la face convexe.

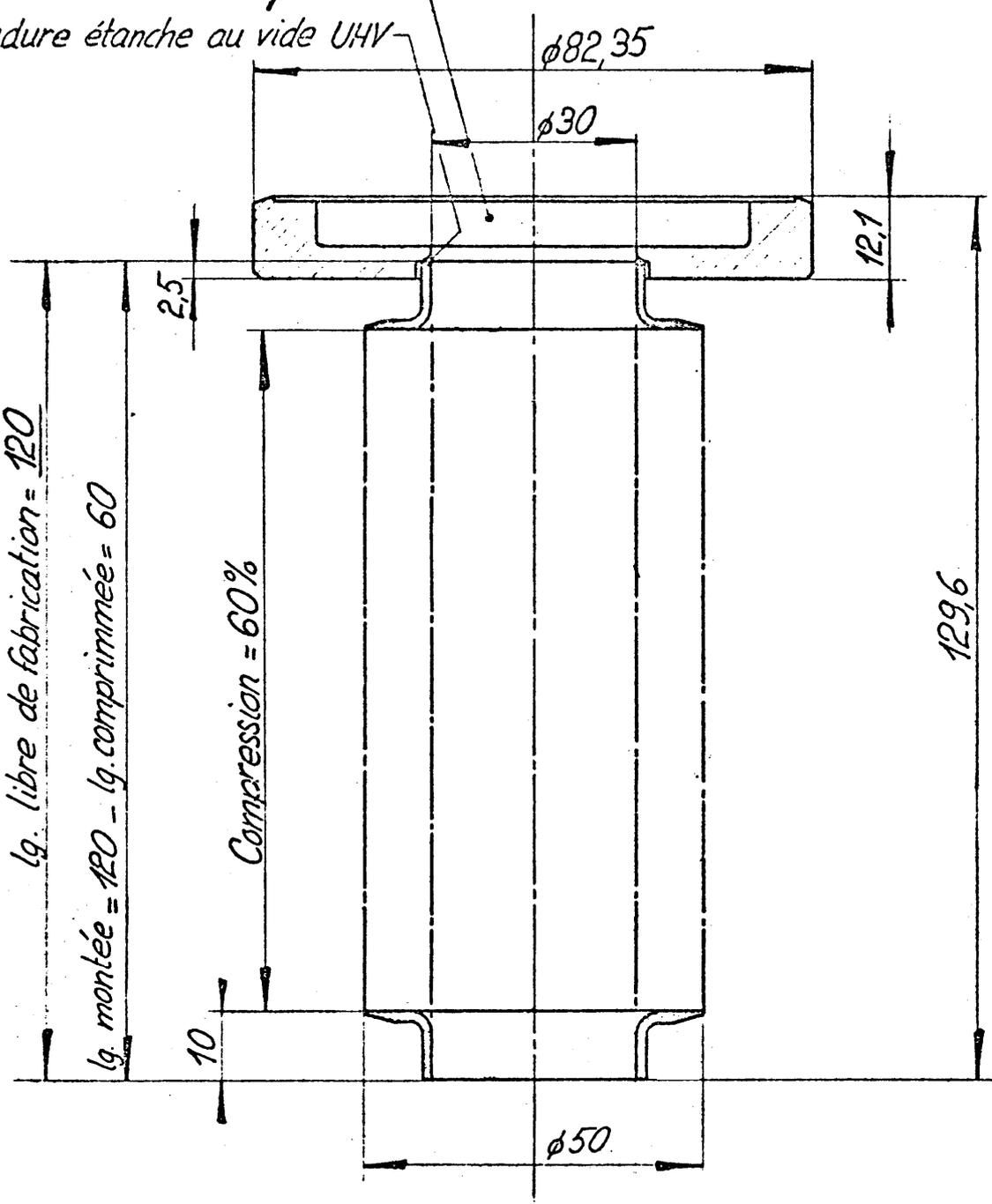
De ces remarques deux axes de développement se dégagent:

- a) refaire un outillage pour élargir la partie plate, 0,5 mm vers l'intérieur et l'extérieur par exemple. La diminution des contraintes sera plus forte que la diminution de la rigidité.
 - b) éventuellement fabriquer des soufflets prototypes à deux épaisseurs: élément concave de 0,13 mm et élément convexe de 0,10 mm par exemple.
- 3) Le calcul des premières fréquences propres en fonction du nombre d'ondulations montrent que pour une excitation à spectre dans la gamme 0,10 Hz il ne devrait pas y avoir de problèmes d'oscillations entretenues. Des essais de soufflets plus longs, 120 ondulations par exemple, devront être également entrepris.
- 4) Enfin, l'analyse des contraintes et déformations montre encore une fois à l'évidence que compte tenu du niveau de fatigue élevé de cette application, les précautions les plus serrées, aussi bien quand au choix de la matière de base (absence d'inclusions, état de surface parfait) que lors de la fabrication (état de surface de l'outil d'emboutissage, manipulations) doivent être adoptées.

- 1) Safe Shell - CERN/ISR-GE/78-8.
- 2) Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association EJMA 1975.
- 3) Microplasma Welded Bellows for UHV Applications, SB/AC/ST/227.

Figure 1

A.22.3067.2 pos.1
 Soudure étanche au vide UHV



lg. libre de fabrication = 120

lg. montée = 120 - lg. comprimée = 60

Compression = 60%

DIMENSION	> 1	> 30	> 120	> 315	> 1000	> 2000
USINAGE	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2
MÉCANO-SOUDURE	±0.5	±0.8	±1	±2	±3	±4

TOLERANCES GÉNÉRALES

DESSIN, RUGOSITÉ, TOLERANCES SELON NORMES ISO

Nettoyage ultra-vide et emballage



Projection européenne
 First angle projection

Ce dessin ne peut être utilisé à des fins commerciales sans autorisation écrite.
 This drawing may not be used for commercial purposes without written authorisation.

NOMBRE PAR UNITÉ	DESCRIPTION	POS.	MATIÈRE	COTES BRUTES	FOURNISSEURS No SCEM	
	ENSEMBLE		S. ENSEMBLE		NOM	DATE
Mécanisme shutter Tige de Cde				ECHELLE SCALE 1:1	DESSINÉ	19.3.79 <i>[Signature]</i>
Soufflet (Etuvable)					CONTROLÉ	S. Julien 17.6.79
					REPLACE	
				REPLACÉ PAR		
				RÉDUCTION		
ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH CERN				TEL. : (022) 83 61 11 TELEX: GENEVE 2 36 98		INDICE
				A.22.3101.4		

TESTS SOUS VIDE DE MEMBRANES Ø 30 x 50

Début test	Fin test	Matière	EP	N. élém.	lg étend. mm	lg comp. mm	course mm	cycle sec	Nombre de cycle	
17.11.78	21.11.78	PHYNOX	variable 0.20-0.15 0.13-0.10	90	100	50	50	4	400.000	fuite sur élém. 0,10
17.11.78	23.11.78	"	"	90	100	50	50	4	1.000.000	fuite élém. 0,10
17.11.78	27.11.78	"	"	90	100	50	50	4	2.300.000	cassure élém. 0,10
5.12.78	8.12.78	"	variable 0.20-0.15 0.13	80	100	50	50	4	1.000.000	fuite élém. 0,13
8.12.78	20.12.78	"	"	80	100	50	50	4	3.000.000	fuite élém. 0,13
11.12.78	15.12.78	"	"	80	100	50	50	4	1.373.000	cassure élém. 0,13
20.12.78	16.6.79	304 USA	variable 0.20-0.15 0.13	80	100	50	50	4	48.000.000	suite 8 cycles sec.
	30.6.79	"	"	80	100	50	50	8	10.000.000	suite lg 120 4 cy's sec
	8.11.79	"	"	80	120	70	50	4	9.914.000	suite lg 100 8 cy's sec
	13.12.79	"	"	80	100	50	50	8	9.692.000	vide OK arrêt test
	13.12.79	"	"	80					77.606.000	cycles total
22.1.79	16.6.79	304 USA	variable 0-20-0.15 0.13	80	100	50	50	4	38.000.000	suite 8 cycles sec
	30.6.79	"	"	80	100	50	50	8	10.000.000	suite lg. 120 4 cy sec
	18.12.79	"	"	80	120	70	50	4	9.914.000	suite lg 100 - 8 cy sec
	13.12.79	"	"	80	100	50	50	8	9.692.000	vide OK arrêt test
	13.12.79	"	"	80					67.606.000	cycles total
14.11.79	15.11.79	304 G.B.	variable 0-20-0.15 0.13	80	100	50	50	4	217.488	fuite élém. 0,13
14.11.79	15.11.79	"	"	80	100	50	50	4	217.488	fuite élém. 0,13
14.11.79	15.11.79	304 G.B.	variable 0.20-0.15 0.13	80	100	50	50	4	2.665.000	suite 8 cycles sec
	20.12.79	"	"	80	100	50	50	8	15.335.000	vide OK arrêt test
	20.12.79	"	"	80					18.000.000	cycles total
21.11.79	22.11.79	304 G.B.	variable 0.20-0.15 0.13	80	100	50	50	4	115.000	fuite élém. 0,13
22.11.79	23.11.79	304 G.B.	"	80	100	50	50	4	104.000	fuite élém. 0,13
29.11.79	20.12.79	{ 304 G.B. 304 USA	0.20-0.15 0.13	80	100	50	50	4	14.000.000	vide OK arrêt test
1.12.79	16.12.79	304 USA	0.13	80	100	40	60	8	11.600.000	suite 4 cycles sec
	17.01.80	"	"	80	100	40	60	4	1.400.000	suite 6 cycles sec
	11.03.80	"	"	80	100	40	60	6	27.500.000	vide OK arrêt test
	11.03.80	"	"	80	100	40	60		40.500.000	cycles total
1.12.79	16.12.79	304 USA	0.13	80	100	40	60	8	11.600.000	cassure fatigue
10.01.80	10.01.80	{ 304 G.B. 304 USA	0.20-0.15 0.13	100	120	70	60	6	500.000	fuite 0,13
11.01.80	11.03.80	304 USA	0.13	80	100	40	60	6	29.500.000	cassure fatigue
31.03.80		304 USA Calorstat Ø32x46	0.13	100	120	70	60	4		10.4.80 (4.000.000)
17.03.80	17.03.80	AM 350 Calorstat Ø32x46	0.13	80	100	40	60	4	19.000	cassure 35eme élém.
17.03.80	19.03.80	AM 350	0.13	100	120	70	60	4	70.600	cassure 50eme élém.

Figure 3

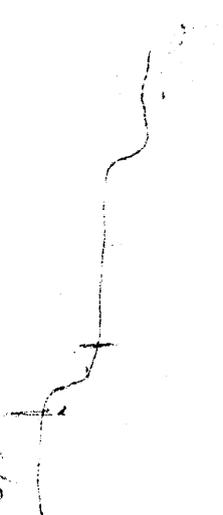
46,4
46,4
46,4
46,4
46,4

302
302
302

46,4

0,8

15



$$\frac{46,4 \times 2}{12} = 7,73$$

$$\frac{46,4 \times 2 \times 3,2}{12} = 25,2$$

$$\frac{22,4 \times 36,2}{12} = 67,2$$

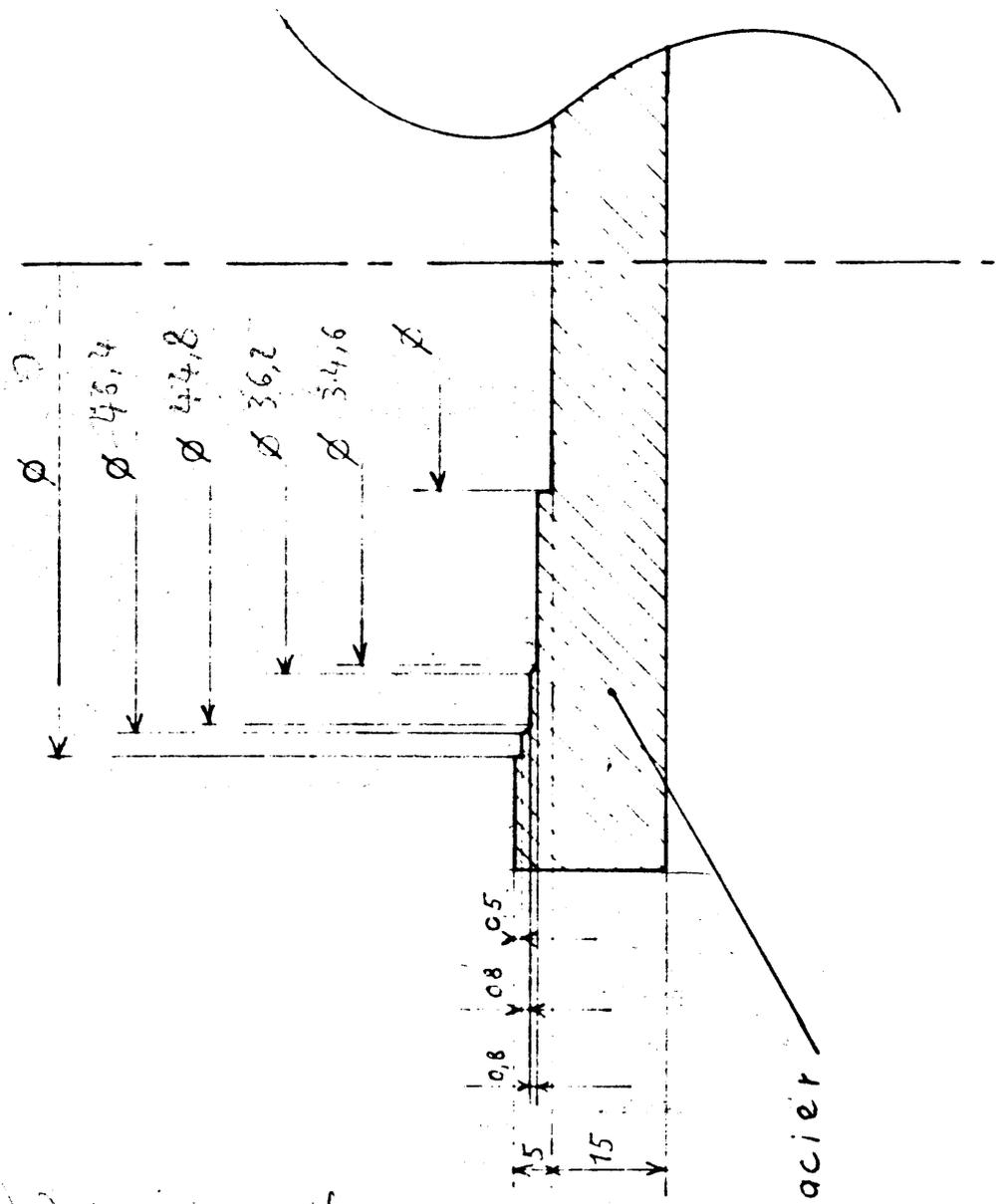
$$\frac{11,2 \times 18,1}{12} = 16,8$$

$$\frac{34,0 \times 2}{12} = 5,67$$

$$\frac{17,3}{5} = 3,46$$

16

94



acier

Distribution ~~mesurée~~ des contraintes de flexion médianales sur la face interne (exposée au vide) de l'ondulation concave.

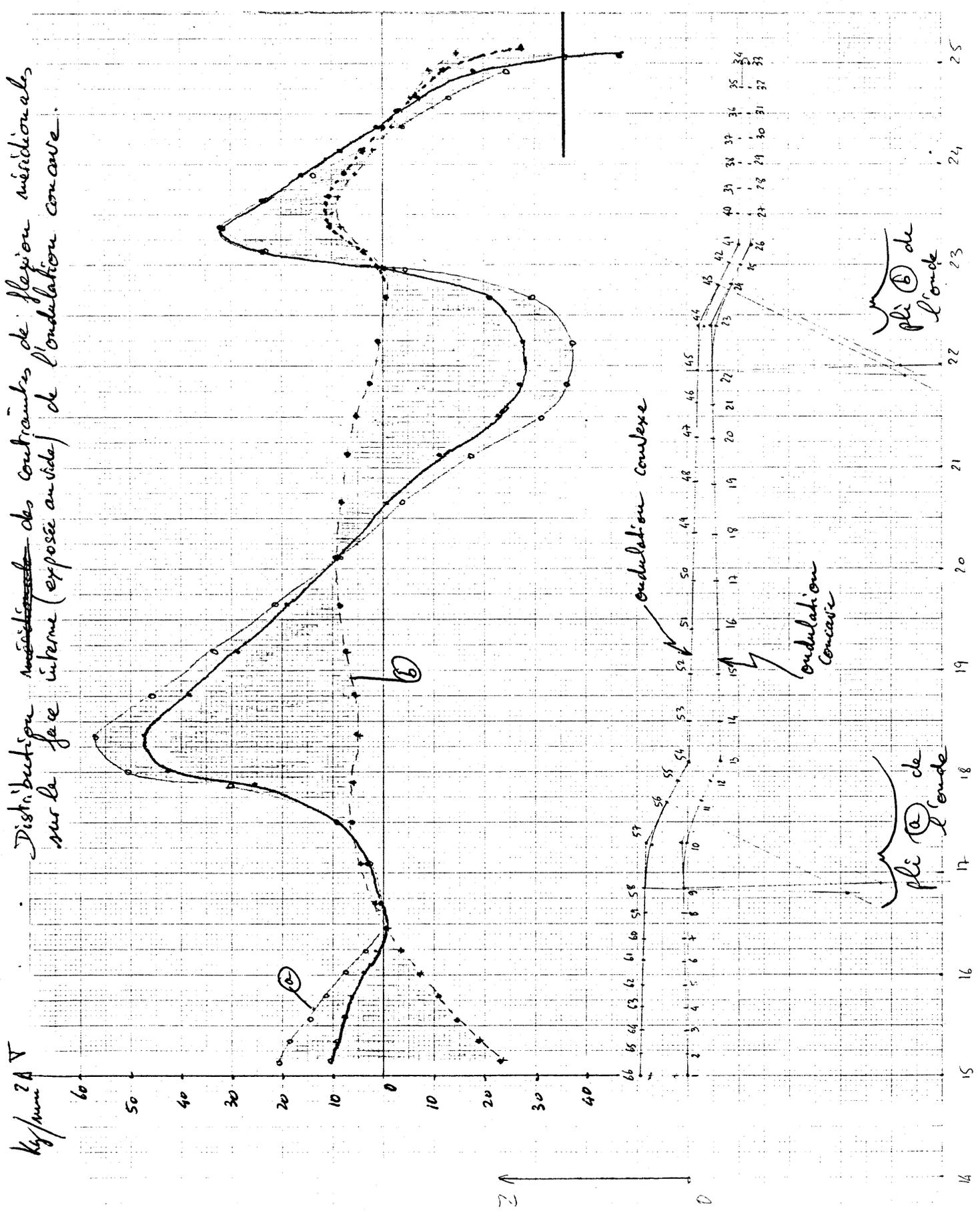


Figure 4

Distribution des contraintes de flexion méridiennes sur la face interne (exposée au vide) de la coupelle conique.

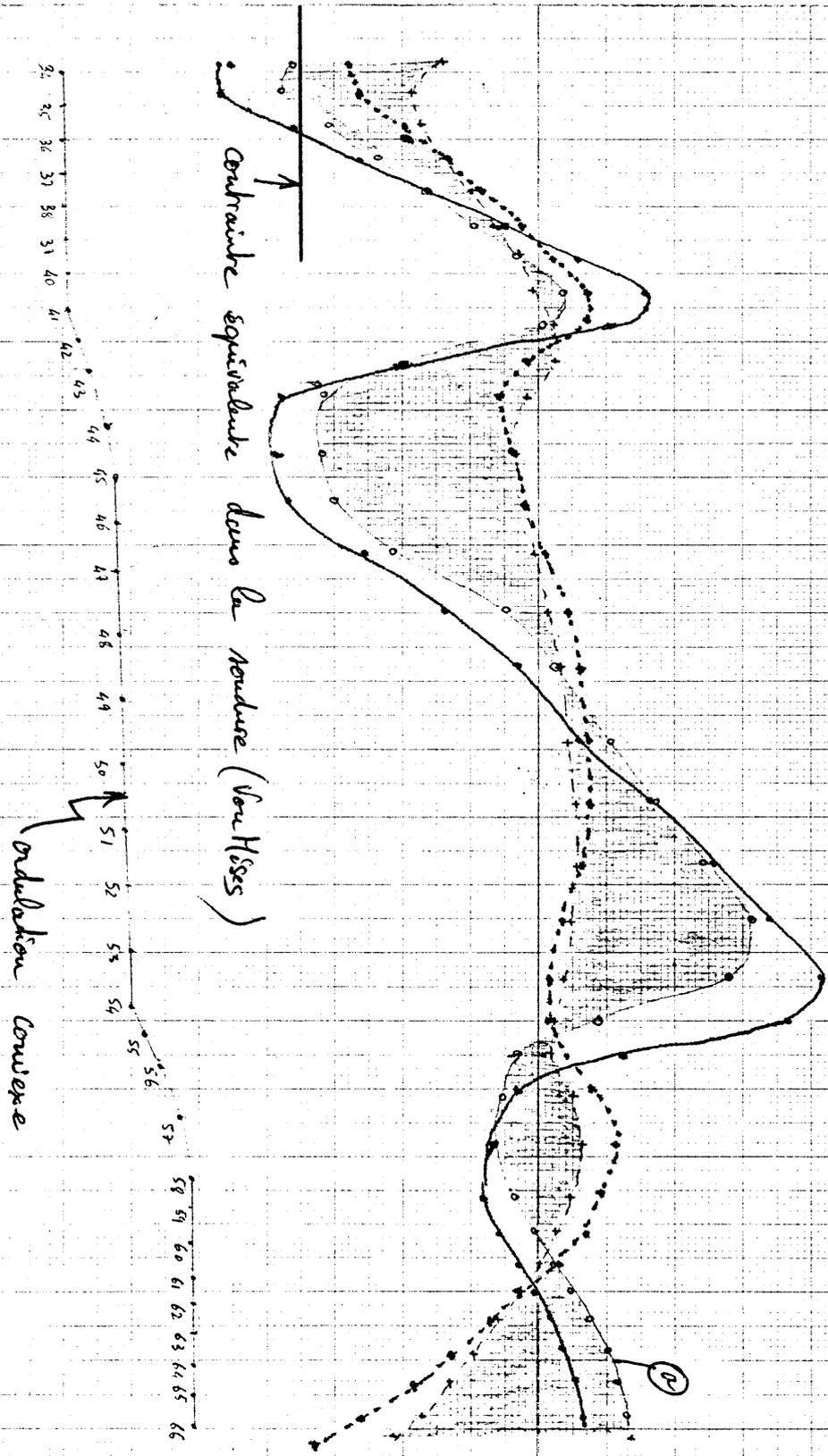


Figure 5 -

Case D'An-d'An-d'An

8888 AN SHUTTER ROD BELLOW

LOADING CONDITION 1

ELEMENT	MERIDIONAL STRESS	HOOP STRESS	MERIDIONAL BENDING	HOOP BENDING	SHEAR STRESS	EBULMENT	STRESS
1	1318	187050	207180	6336	-2334	18	8209
2	4114	187050	178630	5791	-2334	18	8209
3	6798	187050	147380	4940	-2334	18	8209
4	9383	187050	11490	3880	-2334	18	8209
5	11878	187050	-181951	2664	-2334	18	8209
6	14292	187050	-37834	1329	-2334	18	8209
7	16630	187050	-58209	0	-2334	18	8209
8	18932	187050	-8173	1185	-2334	18	8209
9	21284	187050	8946	7849	-2334	18	8209
10	23610	187050	9772	9827	-2334	18	8209
11	25910	187050	9722	9645	-2334	18	8209
12	28232	187050	9645	9413	-2334	18	8209
13	30577	187050	9413	9128	-2334	18	8209
14	32930	187050	9128	8720	-2334	18	8209
15	35282	187050	8720	8218	-2334	18	8209
16	37682	187050	8218	7649	-2334	18	8209
17	40131	187050	7649	7020	-2334	18	8209
18	42628	187050	7020	6336	-2334	18	8209
19	45173	187050	6336	5597	-2334	18	8209
20	47768	187050	5597	4811	-2334	18	8209
21	50413	187050	4811	3974	-2334	18	8209
22	53108	187050	3974	3095	-2334	18	8209
23	55853	187050	3095	2174	-2334	18	8209
24	58648	187050	2174	1218	-2334	18	8209
25	61493	187050	1218	225	-2334	18	8209
26	64388	187050	225	-164	-2334	18	8209
27	67333	187050	-164	-501	-2334	18	8209
28	70328	187050	-501	-905	-2334	18	8209
29	73373	187050	-905	-1306	-2334	18	8209
30	76468	187050	-1306	-1704	-2334	18	8209
31	79613	187050	-1704	-2099	-2334	18	8209
32	82808	187050	-2099	-2491	-2334	18	8209
33	86053	187050	-2491	-2880	-2334	18	8209
34	89348	187050	-2880	-3266	-2334	18	8209
35	92693	187050	-3266	-3649	-2334	18	8209
36	96088	187050	-3649	-4029	-2334	18	8209
37	99533	187050	-4029	-4406	-2334	18	8209
38	103028	187050	-4406	-4780	-2334	18	8209
39	106573	187050	-4780	-5151	-2334	18	8209
40	110168	187050	-5151	-5519	-2334	18	8209
41	113813	187050	-5519	-5884	-2334	18	8209
42	117508	187050	-5884	-6246	-2334	18	8209
43	121253	187050	-6246	-6605	-2334	18	8209
44	125048	187050	-6605	-6961	-2334	18	8209
45	128893	187050	-6961	-7314	-2334	18	8209
46	132788	187050	-7314	-7664	-2334	18	8209
47	136733	187050	-7664	-8011	-2334	18	8209
48	140728	187050	-8011	-8355	-2334	18	8209
49	144773	187050	-8355	-8696	-2334	18	8209
50	148868	187050	-8696	-9034	-2334	18	8209
51	152913	187050	-9034	-9369	-2334	18	8209
52	157008	187050	-9369	-9701	-2334	18	8209
53	161153	187050	-9701	-10030	-2334	18	8209
54	165348	187050	-10030	-10356	-2334	18	8209
55	169593	187050	-10356	-10679	-2334	18	8209

Figure 6

**** RA SHUTTER ROD BELLOW
LOADING CONDITION 1

ELEMENT	MERIDIONAL FORCE	HOOP FORCE	MERIDIONAL MOMENT	HOOP MOMENT	SHEAR
1	0171	4436	0584	0179	0303
2	0535	4144	0503	0162	0342
3	0884	3725	0415	0142	0379
4	1220	3707	0328	0118	0416
5	1544	3654	0247	0099	0451
6	1858	3572	0167	0079	0485
7	2162	3509	0099	0024	0519
8	2521	3563	0035	0032	0551
9	2966	3623	0076	0050	0251
10	3108	3595	0291	0109	1264
11	2864	2445	0848	0281	2169
12	2573	5974	1406	0477	2221
13	3571	2485	1613	0565	0707
14	3599	3896	1233	0494	0737
15	3665	5615	0946	0412	0768
16	3770	7522	0601	0320	0800
17	3912	9500	0248	0219	0834
18	4087	1460	0115	0107	0870
19	4290	1306	0488	0014	0907
20	4577	1748	0873	0145	0944
21	4675	1748	1017	0214	0157
22	4452	7600	1052	0244	0478
23	3757	2870	0827	0201	1501
24	3677	4181	0619	0006	2731
25	4186	4924	0655	0006	2610
26	3988	4168	0901	0327	0972
27	3800	3724	0647	0085	0984
28	3620	1358	0302	0111	0906
29	3449	2355	0130	0473	1008
30	3287	1919	0702	0048	1020
31	3060	1121	0702	0048	1184
32	2478	8144	1029	0377	1979
33	2024	7838	0821	0552	0813
34	2973	7601	0663	0537	0793
35	2923	7418	0495	0163	0786
36	2874	7272	0271	0042	0759
37	2826	7147	0070	0015	0745
38	2779	5473	0126	0015	0732
39	2732	5473	0028	0015	0732
40	2463	1452	0558	0175	1303
41	1872	0368	0884	0158	2031
42	2796	0368	0884	0259	0319
43	2843	0368	0884	0259	0290
44	2858	1330	0845	0232	0614
45	2884	1915	0820	0232	0585
46	2897	2709	0527	0054	0556
47	2897	3653	0135	0088	0528
48	2866	4687	0033	0088	0501
49	2816	5744	0294	0149	0474
50	2740	6765	0466	0204	0449
51	2638	7671	0682	0251	0425
52	2513	8389	0921	0276	0401
53	2064	9501	0722	0276	1298
54	1386	0930	0280	0076	1832

Déformée d'une ondulation 30/50
sous $p = 1 \text{ atm}$ et 60% de compression

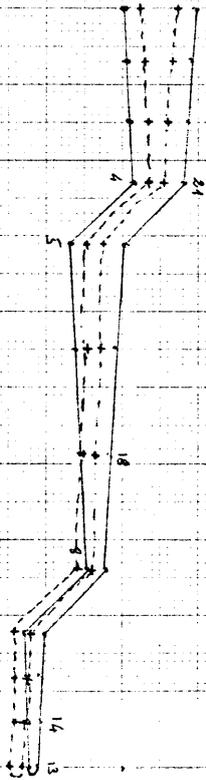


Figure 8

RIGIDITÉ PAR ONDULATION EN FONCTION DE LA FLÈCHE

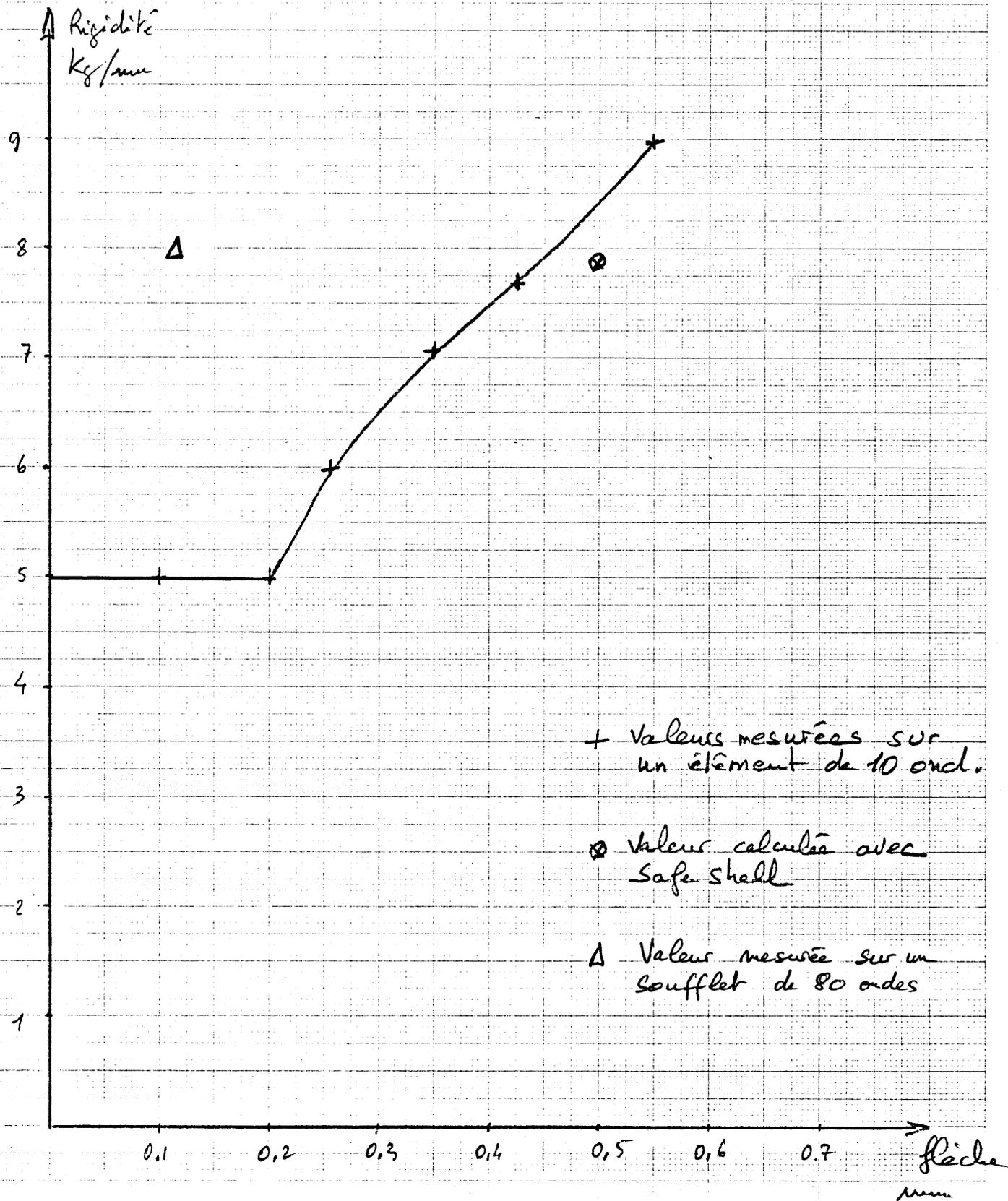


Figure 9.

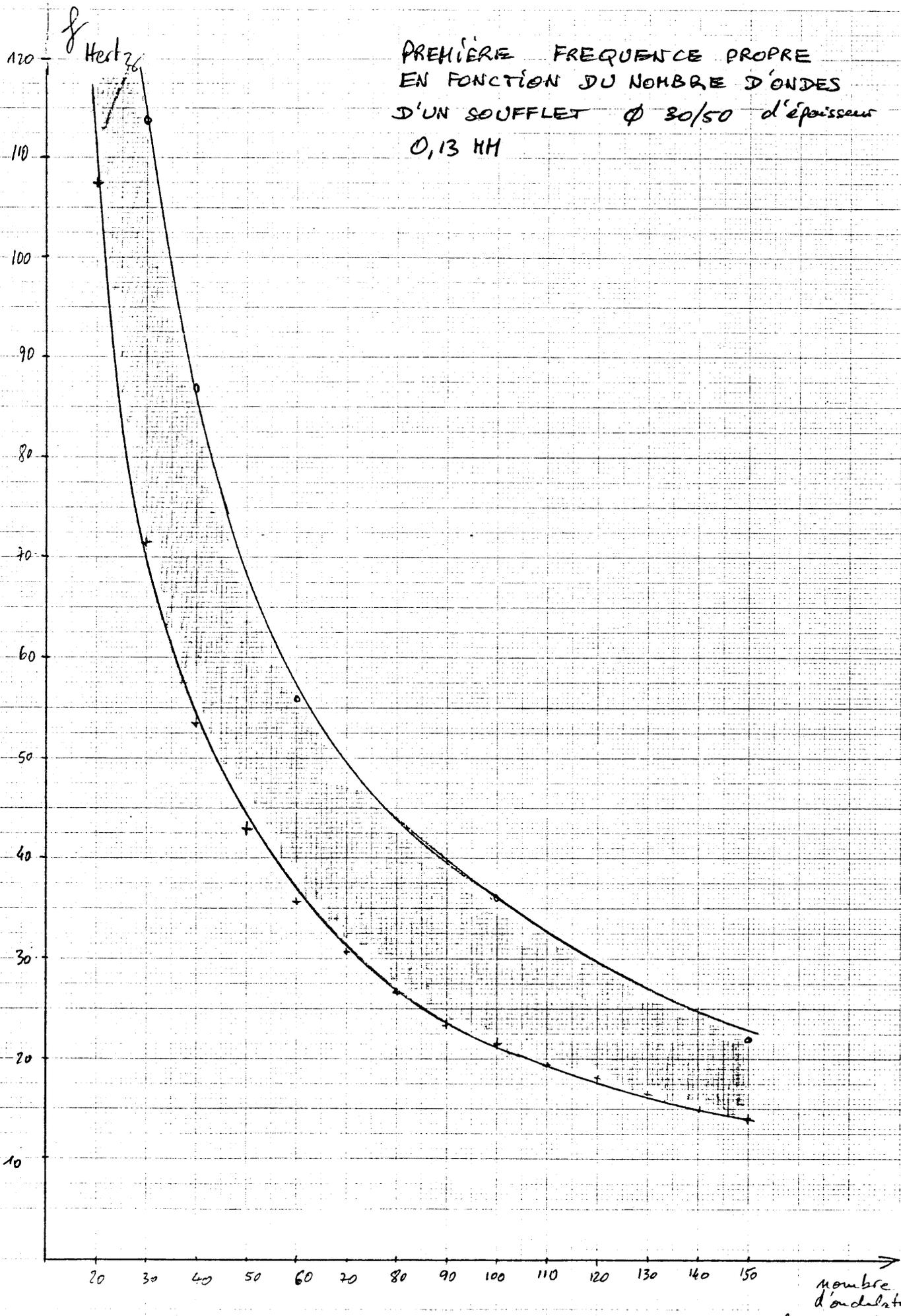


Figure 10

nombre
d'ondulation
N longueur libre
en mm.

Distribution:

E. Jones
S. Milner (PS)
JC. Brunel
C. Ruffer (PS)
Ch. Mauser (SB)

T. Wikberg
R. Samuel (SB)
A. Florence (SB)
B. DANIEL (SB)
C. Hawviller (ISR)
F. THIZY (SB)