

FR 8203246

2. Journée sur les tendances actuelles en  
calcul de structures. Sophia Antipolis  
(France) - 1, 2, 3 Feb 1982  
CEA-CONF - 6225

§

DESCRIPTION D'UNE METHODE DE CALCUL DE L'INTERACTION

FLUIDE-STRUCTURE

par

F. GANTENBEIN\*

\* C.E.A. - C.E.N./SACLAY - DMT/SMTS - 91191 - GIF-SUR-YVETTE Cedex

## I - INTRODUCTION -

Les caractéristiques vibratoires d'une structure en air peuvent être considérablement modifiées quand la structure est immergée dans un fluide dense. Les effets d'une telle interaction fluide-structure sont importants pour les études de vibrations induites par les écoulements ou pour les études sismiques de composants de centrales nucléaires. Parmi les structures dont le comportement est influencé par le fluide, on peut citer les internes de réacteurs PWR, les cuves de réacteurs rapides, les échangeurs de chaleur.

Dans certains cas particuliers, les effets de fluide peuvent être simulés par des masses ajoutées, mais en général, ils sont plus compliqués. Une formulation générale permettant le calcul de la réponse vibratoire des structures en présence de fluide dense est décrite dans ce papier. Cette formulation, utilisée aussi par d'autres auteurs (Réf. 1) a été introduite dans les programmes aux éléments finis du système CEASEMT. Le fluide dont le comportement est supposé linéaire (petits mouvements de structures, petites fluctuations de pression) est décrit par des éléments finis fluide .

Quelques exemples d'application sont enfin présentés.

## II - EQUATIONS DE BASE DU FLUIDE -

Les petites fluctuations de pression dans un fluide non visqueux sont décrits par l'équation d'onde, obtenue par linéarisation des équations de Navier-Stokes (Réf. 2).

$$\vec{\nabla} \frac{1}{\rho_f} \vec{\nabla} p - \frac{1}{\rho_f c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

- avec : c vitesse du son dans le fluide  
p fluctuation de pression  
 $\rho_f$  masse volumique moyenne du fluide

A cette équation de volume sont associées les conditions aux limites qui peuvent être de divers types :

- paroi, s, vibrante :  $\Rightarrow \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial n_s} = - \vec{n}_s \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$

avec  $\vec{n}_s$  : vecteur unitaire normal à la surface s

$\vec{u}$  : déplacement de la paroi

- pression imposée à la surface :  $p = p_s$

- surface,  $\Sigma$ , libre :  $\Rightarrow p = \rho_f g z$

avec :  $\frac{\partial p}{\partial n_\Sigma} = - \rho_f \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$

g : accélération de la pesanteur

z : déplacement vertical de la surface libre

Remarques :

Certains effets sont négligés du fait de l'application de l'équation d'onde ; ce sont essentiellement les effets de viscosité et les effets dus à l'écoulement permanent.

La viscosité introduit, en général, seulement de l'amortissement. Cet amortissement peut être important par exemple quand le fluide est confiné ou quand la masse de fluide en mouvement est grande devant celle des structures mécaniques.

Dans le cas de coques minces séparées par des lames fluides, l'amortissement est dû en grande partie à la viscosité du fluide (Réf. 3).

Les amortissements modaux peuvent en général être correctement calculés en projetant l'opérateur de viscosité sur les modes de résonance de la structure déterminés en supposant le fluide non visqueux.

L'effet de l'écoulement permanent est plus délicat. Pour des géométries simples, des formulations sur l'effet de l'écoulement ont été développées (Réf. 4) par exemple pour l'écoulement parallèle entre des tubes ; des termes complémentaires quasi statiques et d'amortissement doivent être ajoutés.

On sait en outre que pour des configurations particulières l'écoulement permanent peut conduire à des instabilités (flottement de faisceaux de tubes).

Dans la plupart des cas pratiques, les études expérimentales sur des modèles hydroélastiques ont montré une augmentation des coefficients d'amortissement avec la vitesse permanente du fluide, et aucun changement des fréquences et de modes de résonances.

### III - FONCTIONNELLE DU PROBLEME COUPLE - APPLICATION DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS -

Pour obtenir une bonne approximation numérique du système d'équation, une méthode consiste à utiliser la fonctionnelle correspondant au problème. Cette fonctionnelle doit avoir la propriété suivante : être stable au premier ordre vis-à-vis de toute variation des inconnues du problème et ceci seulement lorsque les équations du système sont vérifiées. Considérons les fonctionnelles partielles associées à chaque système d'équations écrites dans le domaine de fréquence.

#### 1) Fonctionnelle des structures "solides" :

Les équations associées sont :

$$\begin{cases} \nabla_j b_{ijkl} \nabla_k u_l + \rho_m \omega^2 u_i + F_i = 0 & \text{dans le volume} \\ n_j b_{ijkl} \nabla_k u_l = \tau_i & \text{sur les surfaces} \end{cases}$$

../...

$u$ ,  $F$ ,  $\zeta$  et  $n$  sont les vecteurs déplacement, force de volume, force de surface et normale externe à la surface.

La fonctionnelle associée est donnée, en utilisant les notations habituelles par (Réf. 4).

$$L_M = \int_{V_M} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} d_v - \omega^2 \int_{V_M} \rho_m u_i^2 d_v - 2 \int_{V_M} F_i u_i d_v - 2 \int_S \zeta_i u_i d\sigma$$

En toute rigueur, il faut ajouter un terme dû aux mouvements des parois dans le champ de pesanteur ; nous le négligerons dans la suite du rapport.

## 2) Fonctionnelle dans le fluide :

L'équation des pressions dans le fluide est :

$$\nabla_i \frac{1}{\rho_f} \nabla_i p + \frac{\omega^2}{\rho_f c^2} p = 0$$

La condition sur une paroi ayant un vecteur déplacement  $u_i$  est :

$$\frac{1}{\rho_f} n_i \nabla_i p - \omega^2 n_i u_i = - \gamma_e n_i$$

avec :  $\gamma_e$  = accélération absolue du repère (solicitation utilisée en analyse sismique).

La condition à la surface libre  $\Sigma$  de déplacement normal est :

$$\frac{1}{\rho_f} n_i \nabla_i p - \omega^2 z = - \gamma_e n_i$$

Avec de telles conditions aux limites et forces extérieures, la fonctionnelle du fluide est :

$$L_f = \int_{V_f} \frac{1}{\rho_f} \nabla_i p \nabla_i p - \omega^2 \int_{V_f} \frac{1}{\rho_f c^2} p^2 dv - 2\omega^2 \int_S u_i n_i d\sigma - 2\omega^2 \int_{\Sigma} z p d\sigma$$

$$+ 2 \int_{S+\Sigma} \sigma_{e_i} n_i p d\sigma$$

On peut noter que la condition aux limites sur une surface immobile ne donne aucun terme de surface, en fait la condition de débit nul est comprise dans le terme de volume.

Dans un champ de pesanteur, la pression à la surface  $\Sigma$  est reliée au déplacement normal  $z$  par  $p = \rho_f g z$  et la fonctionnelle de surface libre associée est :

$$L_{\Sigma} = \int_{\Sigma} \rho_f g z^2 d\sigma - 2 \int_{\Sigma} p z d\sigma$$

3) Fonctionnelle du problème général :

La fonctionnelle du problème général est obtenue par combinaison des différentes fonctionnelles en identifiant les termes de couplages exprimés dans les différents problèmes et en ne les prenant qu'une fois.

Pour le système couplé fluide-structure, la fonctionnelle générale est obtenue par sommation de  $L_M$ ,  $\frac{1}{\omega^2} L_f$  et  $L_{\Sigma}$ .

Soit :

$$L = \int_{V_M} \sigma \varepsilon dv - \omega^2 \int_{V_M} \rho_m u_i^2 dv - 2 \int_{V_M} F_i u_i dv + \frac{1}{\omega^2} \int \frac{1}{\rho_f} \nabla_i p \nabla_i p - \int_{V_f} \frac{1}{\rho_f c^2} p^2 dv$$

$$- 2 \int_S u_i n_i p d\sigma - 2 \int_{\Sigma} z p d\sigma + \frac{2}{\omega^2} \int_{S+\Sigma} \sigma_{e_i} n_i p d\sigma + \int_{\Sigma} \rho_f g z^2 d\sigma$$

Pour obtenir cette fonctionnelle sous la forme habituelle  $L_1 - \omega^2 L_2$ , il faut introduire une nouvelle variable  $\pi$  telle que :

$$\pi = - \frac{p}{\omega^2}$$

.../...

La fonctionnelle est alors :

$$L = \int_{V_M} \sigma \varepsilon dv + \int_{\Sigma} \rho_f g z^2 d\sigma + \int_{V_f} \frac{1}{\rho_f c^2} p^2 dv - 2 \int_{V_M} F_i u_i dv - 2 \int_{S+\Sigma} \gamma e_i n_i \pi d\sigma$$

$$- \omega^2 \left[ \int_{V_M} \rho_m u_i^2 dv - \int_{V_f} \frac{1}{\rho_f} \nabla_i \pi \nabla_i \pi dv - 2 \int_{V_f} \frac{1}{\rho_f c^2} p \pi dv - 2 \int_S u_i n_i \pi d\sigma - 2 \int_{\Sigma} z \pi d\sigma \right]$$

Dans le cas particulier du fluide incompressible, obtenu lorsque c est très grand, la fonctionnelle est donnée par :

$$L = \int_{V_M} \sigma \varepsilon dv + \int_{\Sigma} \rho_f g z^2 dv - \omega^2 \left[ \int_{V_M} \rho_m u_i^2 dv - \int_{V_f} \nabla_i \pi \nabla_i \pi dv - 2 \int_S \pi u_i n_i d\sigma \right.$$

$$\left. - 2 \int_{\Sigma} \pi z d\sigma \right] - 2 \int_{V_M} F_i u_i dv - 2 \int_{S+\Sigma} \gamma e_i n_i \pi d\sigma$$

La variable p n'apparaît pas dans la fonctionnelle du fluide incompressible. La seule variable fluide qui intervient est la variable  $\pi$ . La nécessité d'utiliser la variable intermédiaire,  $\pi$ , peut s'expliquer par des raisons dimensionnelles : les variables du problème sont  $\delta$  et  $\pi$ , variables dont la dimension est indépendante du temps.

Pour l'étude du couplage avec fluide compressible, l'introduction de  $\rho/c^2$  correspond à la prise en compte de la compressibilité.

#### 4) Discrétisation par la méthode des éléments finis :

Dans chaque élément fluide, structure ou élément de liaison, on peut définir des fonctions de forme ; par exemple :

$$u_i = N_{M_i}^1 \delta \quad \text{dans l'élément solide } l$$

$$\pi = N_f^k \pi \quad \text{dans l'élément fluide } k$$

.../...

On obtient alors une fonctionnelle approchée pour le problème étudié. Le système d'équations cherché est obtenu en minimisant l'expression de cette fonctionnelle par rapport aux variables aux noeuds ( $\delta$ ,  $p$ ,  $\pi$  et  $Z$ ) (voir Réf. 5).

Ce système s'écrit sous forme matricielle.

$$\left\{ \begin{bmatrix} k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M & 0 & -M_S^T & 0 \\ 0 & 0 & -k_f & 0 \\ -M_S & -k_f^T & -M_L & -M_Z \\ 0 & 0 & -M_Z^T & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} \delta \\ p \\ \pi \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_M \\ 0 \\ F_f \\ F_Z \end{Bmatrix}$$

S'il n'y a pas de surface libre, on supprime les variables  $Z$  et les lignes et colonnes correspondantes:

Ce système a la forme habituelle  $(K - \omega^2 \mathcal{M}) \Delta = \overline{F}$ , mais il faut noter que  $K$  est singulier. Il n'y a aucun terme sur les variables  $\pi$ .

Les méthodes numériques habituelles utilisées pour les analyses dynamiques de structures ont été appliquées sans modifications dans les codes du systèmes CEASEMT pour l'analyse de structures avec fluide (Réf. 6 à 9).

Les grandeurs utilisées dans les analyses vibratoires ou sismiques sont données par les relations indiquées ci-dessous :

- Masse généralisée :  $M_n = \Delta_n^T \mathcal{M} \Delta_n$

On peut démontrer que :

$$M_n = \delta_n^T M \delta_n + \pi_n^T M_L \pi_n$$

- Déplacement généralisé  $q_n = \Delta_n^T \mathcal{U} U$  où  $U$  est un vecteur unitaire dans la direction de l'accélération imposée.



- Fréquence propre  $f_n = \frac{1}{2\pi} \omega_n$  avec :

$$\omega_n^2 = \frac{\Delta_n^T K \Delta_n}{\Delta_n^T M \Delta_n} = \frac{\delta_n^T K \delta_n + p^T K_f p + Z^T K_z Z}{\delta_n^T M \delta_n + \pi_n^T M_L \pi_n}$$

5) Réalisation dans les programmes :

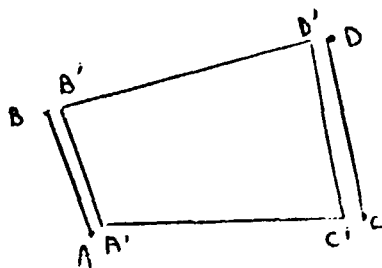
Ce chapitre présente les différents types d'éléments développés en fonction du domaine d'application. Des exemples d'application seront développés plus loin.

a) AQUAMODE :

Le programme AQUAMODE étudie les coques de révolution éventuellement séparées par des lames fluides. L'hypothèse de lame consiste à prendre une variation linéaire de la pression dans l'épaisseur. La variation azimutale de la pression est harmonique (en  $\cos n \theta$ ), tout comme celle des déplacements des coques.

L'élément fluide est un quadrilatère à quatre noeuds auquel sont automatiquement associés deux éléments de contact à deux noeuds : l'un sur la face interne, l'autre sur la face externe (Réf. 10).

L'élément de surface libre est un élément à deux noeuds.



Élément fluide : A' B' D' C'

Deux éléments

de contact :     A B A' C'  
                          C D D' B'

Les éléments AB, CD sont des éléments coques.

A chaque noeud fluide correspond deux variables :  $\pi$  et p

A chaque noeud de surface libre correspond deux variables :  $\pi$ , Z

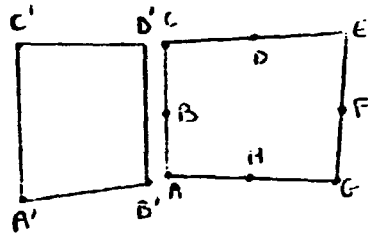
b) INCA :

INCA s'applique à des structures axisymétriques ou planes en présence de fluide. Pour les structures de révolution, il suppose la variation azimutale harmonique.

A la différence d'AQUAMODE, il permet le traitement de grands volumes fluides et le couplage fluide-structures massives.

Les éléments de liquide sont les éléments quadrilatères à quatre noeuds d'AQUAMODE. Ces éléments peuvent être raccordés les uns aux autres pour former un maillage de volume fluide.

Les éléments de couplage fluide coque sont deux d'AQUAMODE. Les éléments de couplage fluide-structure massive sont des éléments à cinq noeuds.



Elément fluide A' B' D' C'

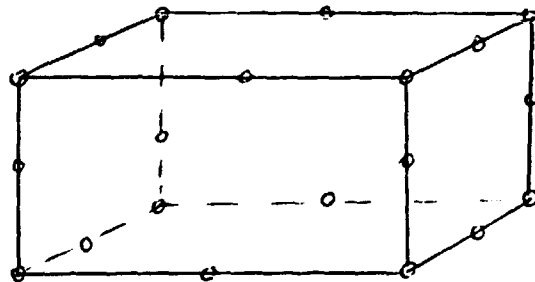
Elément de contact A B C B' D'

Elément massif A B C D E F G H

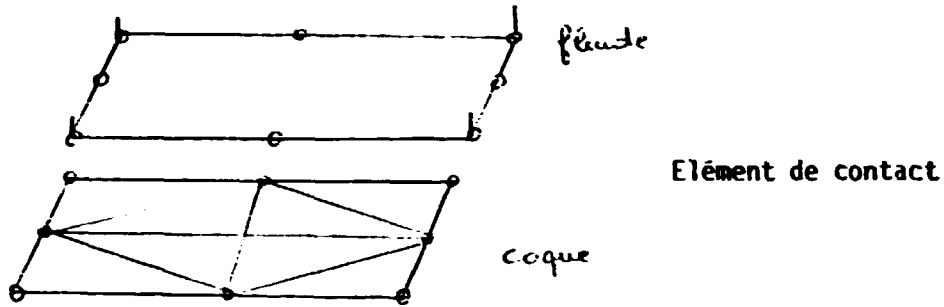
Les éléments de surface libre sont ceux d'AQUAMODE mais ils peuvent être raccordés entre eux pour former un maillage de surface libre.

c) BILBO -

L'élément fluide est un élément isoparamétrique à vingt noeuds. L'élément de couplage fluide structure est réalisé par un élément de couplage à seize noeuds (huit noeuds sur le fluide et huit noeuds sur le solide). Pour le moment, il n'existe que pour les couplages fluide coque.



Elément fluide



L'élément de surface libre est un élément à huit noeuds.

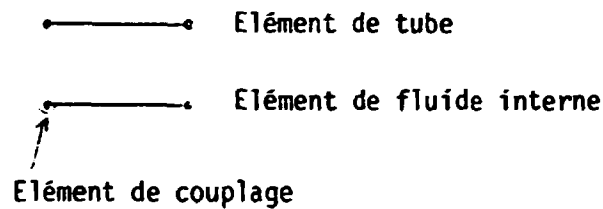
d) TEDEL :

TEDEL s'applique à des systèmes de poutres et de tuyauteries contenant éventuellement des fluides ou séparées par du fluide. Le traitement de ces fluides et donc la formulation sont différents de ceux des autres codes car des intégrations des équations du fluide ont été faites au préalable (Réf. 11).

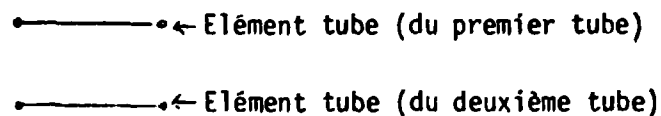
Le fluide interne est pris en compte après intégration dans la section du tube des équations du fluide.

- Les éléments de fluide interne sont des éléments à deux noeuds.

- Les éléments de couplage sont des éléments à deux noeuds.



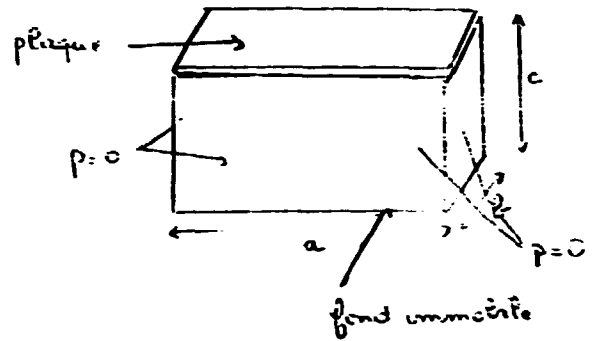
Pour la prise en compte de lame séparant deux tubes, il n'y a qu'un élément de couplage : élément à quatre noeuds



6) Exemples d'application -

a) Volume d'eau tridimensionnel :

Le premier mode propre d'une plaque carrée posée sur un volume d'eau parallélépipédique a été calculé par BILBO et comparé au calcul analytique. La plaque est supposée rotulée à ses bords. Des conditions de pression nulle sont imposées au fluide sur les faces latérales. Le fond du volume d'eau est supposé immobile.



Résultat analytique :

Le déplacement de la plaque pour le premier mode propre est :

$$\xi = \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}$$

La fréquence correspondante est :

$$f = \frac{\pi}{2} \frac{e}{a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \frac{1 + (a/b)^2}{\sqrt{1+k}} = \frac{f_{air}}{\sqrt{1+k}}$$

avec pour la plaque :

E module d'Young =  $2 \times 10^{11}$  Pa

f masse volumique =  $7,8 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>

ν coefficient de Poisson : 0,3

e épaisseur = 0,001

k représente l'effet du fluide.

$$k = \frac{\rho}{\rho} \frac{f}{e} \frac{a}{\pi} \frac{\coth \pi \sqrt{1 + (a/b)^2} c/a}{\sqrt{1 + (a/b)^2}}$$

$\rho_f$  est la masse volumique du fluide =  $10^3 \text{ kg/m}^3$ .

Si  $a = b = 2 \text{ m}$  et  $e = 1 \text{ m}$ , on a :

$$f = 0,16 \text{ Hz (la fréquence en air étant de } 1,2 \text{ Hz).}$$

Calcul BILBO :

Un quart de la structure a été maillé, compte tenu des symétries, par huit éléments fluide, trente-deux éléments plaque et quatre éléments de couplage. Le calcul BILBO donne  $f = 0,17 \text{ Hz}$ . La comparaison des déformées analytiques et calculée par BILBO est présentée figure 1.

b) Viroles cylindriques séparées par une lame fluide :

L'étude des deux viroles, supposées rigides et se translatant horizontalement, a été faite par AQUAMODE. La comparaison des valeurs analytiques et numériques de la première fréquence propre est reportée dans le tableau ci-dessous pour différentes valeurs des ressorts de rappel. La géométrie est décrite figure 2.

Le résultat analytique est donné par :

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{\pi \rho h}}$$

avec :

$$a^2 R_1^2 R_2^2 - a \left[ K_1 (R_2^2 - R_1^2) + (K_2 R_2^2 + K_3 R_1^2) \left( \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \right] + K_1 K_2 = 0$$

.../...

Ressorts $K = 3.7458 \times 10^4 \text{ N/mm}$	$\bar{D}$ analytique	$\bar{D}$ AQUAMODE	Ecart (%)
$K_1 = K$ $K_2 = 0$ $K_3 = K$	58.370	58.523	- 0.26
$K_1 = 2 K$ $K_2 = 0$ $K_3 = K$	61.270	61.558	- 0.47
$K_1 = K$ $K_2 = K$ $K_3 = 0$	36.250	36.197	0.15
$K_1 = 2 K$ $K_2 = K$ $K_3 = 0$	44.909	44.957	- 0.11

c) Viroles cylindriques souples séparées par une lame fluide :

L'étude expérimentale des modes de variation azimutale  $n = 7$  a été faite pour différentes hauteurs d'eau (Réf. 12). La géométrie étudiée est représentée figure 3 et la comparaison des fréquences calculées par AQUAMODE et mesurées est donnée figure 4. On peut noter sur cette courbe que l'effet du fluide est correctement pris en compte. Par contre, il y a un écart sur la raideur des coques.

d) Virole cylindrique immergée dans un fluide confiné (Réf. 13) :

L'étude expérimentale du mode de translation de la structure décrite figure 5 a permis la comparaison avec les calculs AQUAMODE.

Les résultats sont reportés sur la figure 6 pour les fréquences et figures 7 et 8 pour la variation des pressions. Un calcul INCA a été effectué pour la lame de 70 cm de hauteur, avec cinq éléments dans l'épaisseur de la lame et quinze éléments pour le fluide sous le cylindre.

.../...

L'écart par rapport au calcul AQUAMODE est de 1,4 ‰.

e) Etude de modes de ballotement d'une cavité cylindrique remplie de fluide :

La comparaison du calcul analytique de la première fréquence de ballotement avec le calcul INCA a été faite pour différents maillages.

Le fluide considéré était l'eau.

La géométrie de la cavité est :  $R = \frac{H}{2} = 500 \text{ mm}$

La fréquence calculée analytiquement est :  $\mathcal{D} = 0,97 \text{ Hz}$ .

Le calcul INCA donne :

$\mathcal{D} = 1,04$	avec un maillage fluide de	2 x 2	éléments rectangulaires
$\mathcal{D} = 0,98$	"	"	"
$\mathcal{D} = 0,97$	"	"	"

f) Etude de circuit tubulaire :

La comparaison expérience calcul TEDEL des modes d'une tuyauterie remplie d'eau (voir la figure 9) a été faite dans la référence 14. Les déformées des deux premiers modes sont représentées sur les figures 10 et 11.

CONCLUSION -

Un formalisme de prise en compte du comportement dynamique du fluide a été développé et incorporé aux codes du système CEASEMT. Il est basé sur la modélisation du fluide par des éléments finis fluide. A chaque noeud fluide sont associés deux variables : la pression et une variable  $\pi$  reliée à p par  $(p = \frac{d^2\pi}{dt^2})$ . Le couplage entre le fluide et la structure est introduit par des éléments de surface.

..../...

Cette méthode est facile à introduire dans un code général aux éléments finis puisqu'elle correspond à l'introduction de nouveaux éléments.

Elle a été validée par rapport à des calculs analytiques et par rapport à des essais et elle est largement utilisée pour les études vibratoires et sismiques de structures internes et de tuyauteries de réacteurs nucléaires.

§



REFERENCES -

- (1) H. MORAND, R. OHAYON - SUBSTRUCTURE VARIATIONAL ANALYSIS OF THE VIBRATIONS OF COUPLED FLUID-STRUCTURE SYSTEMS - FINITE ELEMENT RESULTS.  
Int. Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. 14, 741-755 (1979).
- (2) R.J. GIBERT - ETUDE EXPERIMENTALE DE DEUX SINGULARITES D'UN CIRCUIT -  
Note CEA N-1735.
- (3) S.S. CHEN, M.W. WAMBSGANSS, J.A. JENDRZEJCZYK - ADDED MASS AND DAMPING OF A VIBRATING ROD IN CONFINED VISCOUS FLUIDS -  
Journal of Applied Mechanics (June 1976).
- (4) M.P. PAIDOUSSIS - VIBRATIONS OF CYLINDRICAL STRUCTURES INDUCED BY AXIAL FLOW  
C.E.A./E.D.F. Conference (Sept. 1972) Ed. Eyrolles.
- (5) O.C. ZIENKIEWICZ - THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING SCIENCE -  
Mc Craw-Hill - LONDON.
- (6) T. CHARRAS - SYSTEME CEASEMT - PROGRAMME BILBO -  
Note CEA N-1936.
- (7) F. JEANPIERRE, F. BRABANT, M. LEPAREUX - SYSTEME CEASEMT - PROGRAMME AQUAMODE  
Rapport EMT/SMTS/VIBR/80/18.
- (8) A. COMBESCURE - SYSTEME CEASEMT - PROGRAMME INCA -  
Note Technique EMT/78/26.
- (9) A. HOFFMANN, F. JEANPIERRE, F. AXISA, G. CHEVALIER, M. LEPAREUX -  
SYSTEME CEASEMT - PROGRAMME TEDEL -  
Rapport EMT/77/64.
- (10) F. AXISA, A. COMBESCURE et al - INTERACTIONS FLUIDES STRUCTURES - REALISATION  
DANS LE SYSTEME CEASEMT -  
Rapport EMT/78/65.
- (11) F. AXISA, R.J. GIBERT - VIBRATIONS DES TUYAUTERIES EN ECOULEMENT INTERNE -  
Rapport EMT/77/45.

- (12) M. EVRARD - QUALIFICATION DU PROGRAMME AQUAMODE - ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EFFET D'UNE LAME FLUIDE ENTRE DEUX COQUES CYLINDRIQUES -  
Rapport EMT/77/54.
  
- (13) A. EPSTEIN - ETUDE DES EFFETS DU FLUIDE SUR LE MOUVEMENT TRANSVERSAL D'UN CYLINDRE IMMERGE -  
Rapport EMT/SMTS/VIBR/82/004.
  
- (14) F. AXISA, R.J. GIBERT - VIBRATIONS DES TUYAUTERIES EN ECOULEMENT INTERNE -  
Rapport EMT 77/45.

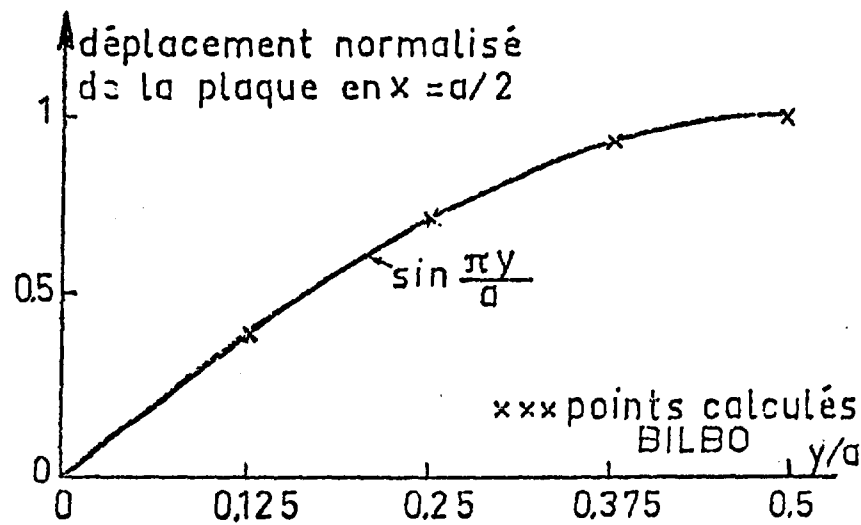
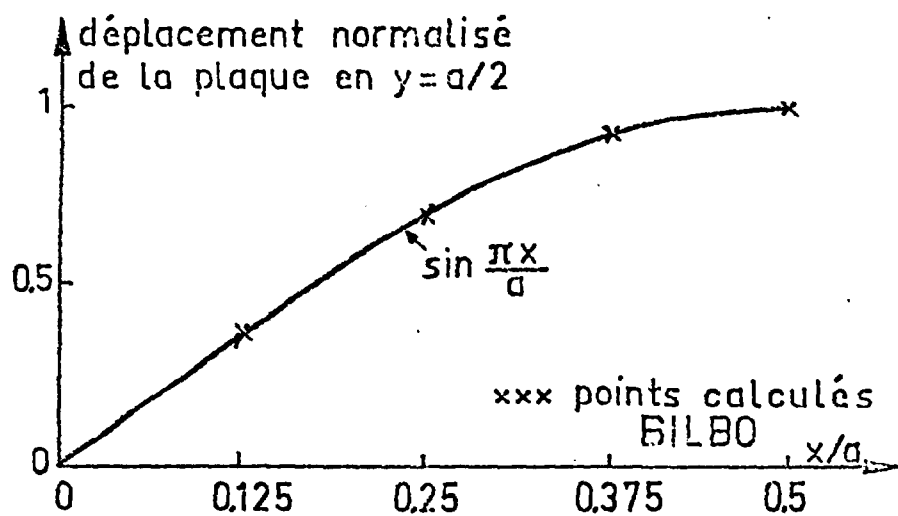
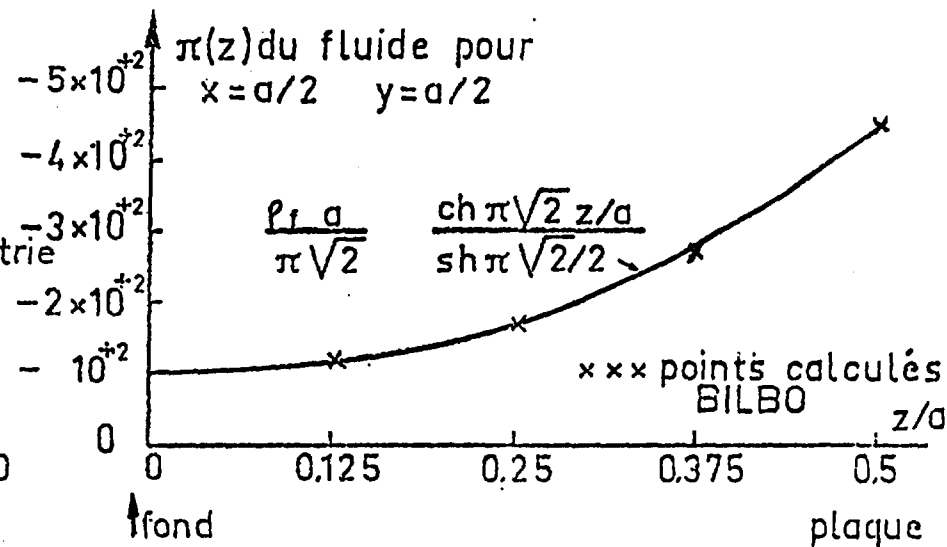
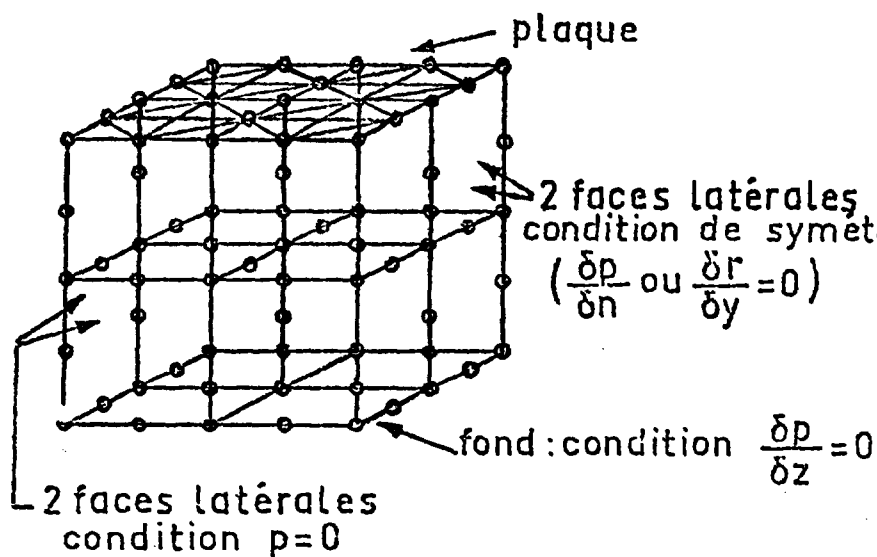
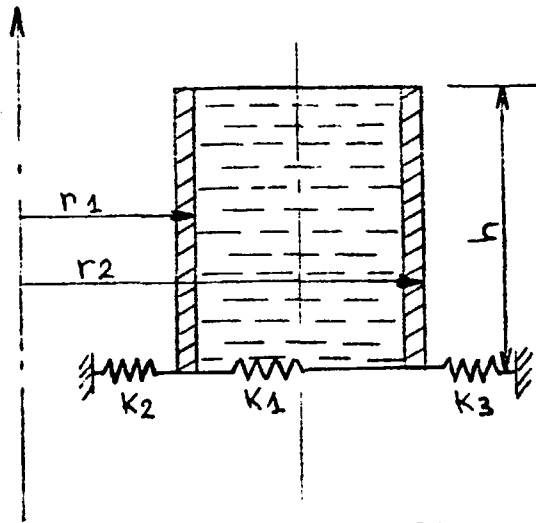


Fig.1 1<sup>o</sup> mode propre d'une plaque rotulée posée sur un volume fluide parallélépipédique :  $f_{th} = 0.16 \text{ Hz}$   $f_{calculé} = 0.17 \text{ Hz}$  (BILBO)



COQUES SANS MÂSE RAÏDES

$$r_1 = 500 \text{ mm}$$

$$r_2 = 1000 \text{ mm}$$

$$h = 1000 \text{ mm}$$

$$\rho = 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$$

Condition de débit nul  
pour le fluide en  $z = 0$   
et  $z = 1000$

Figure 2

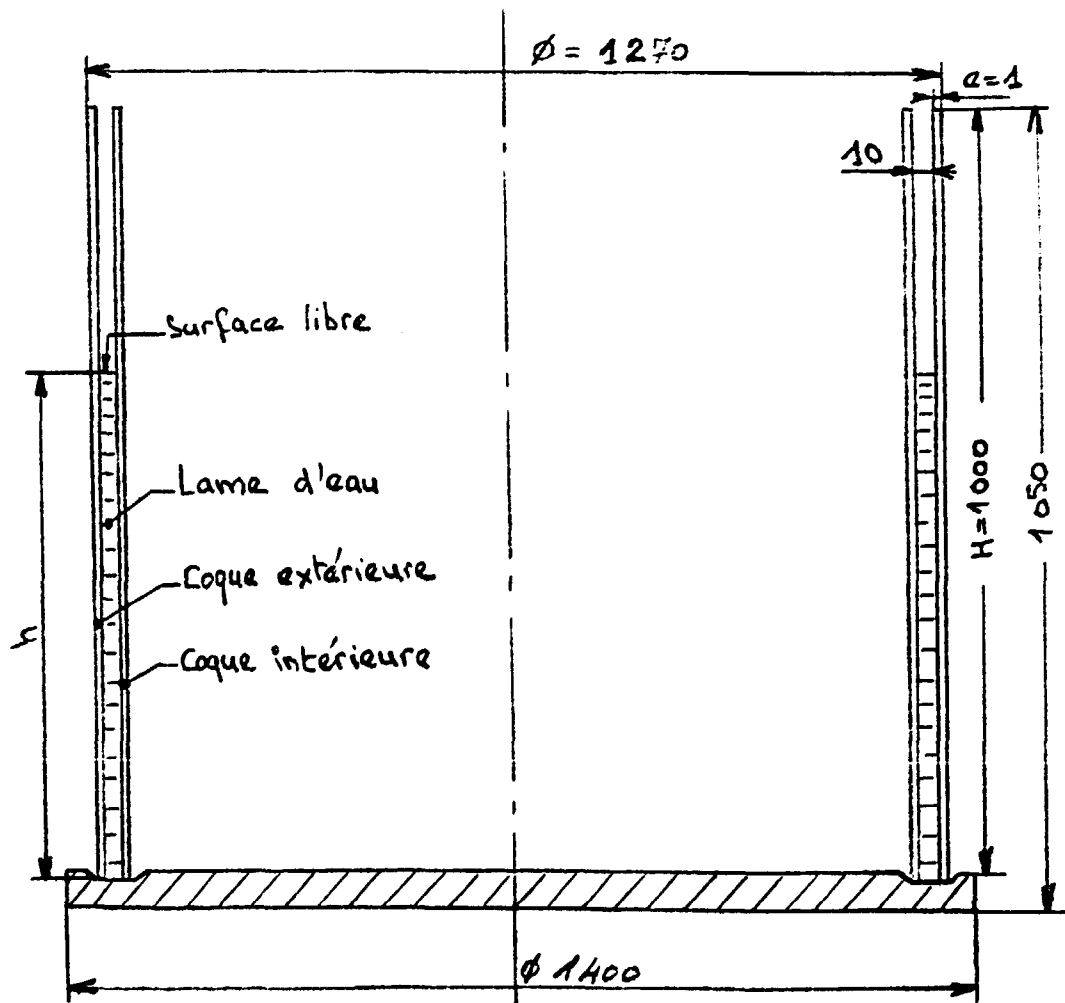
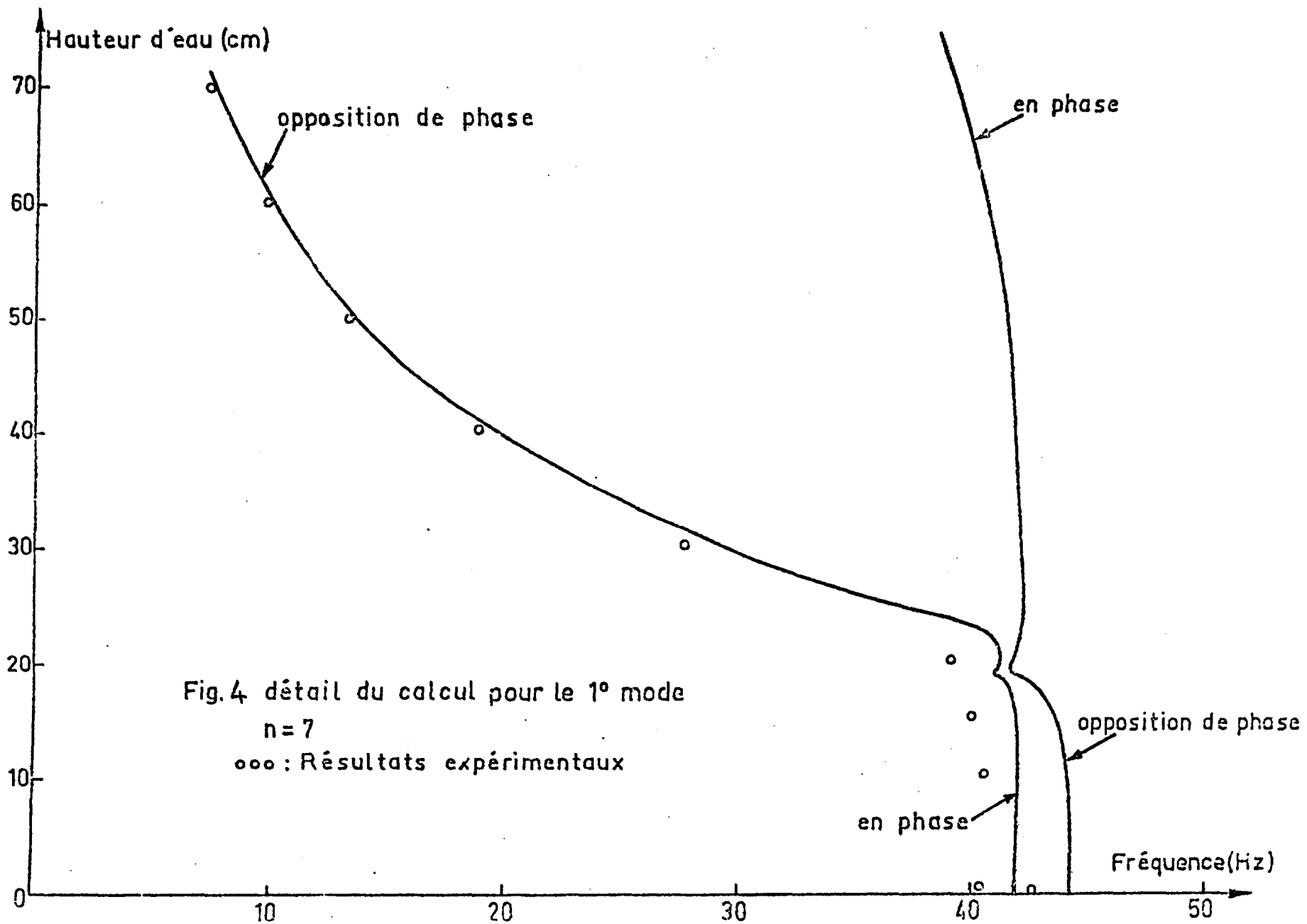
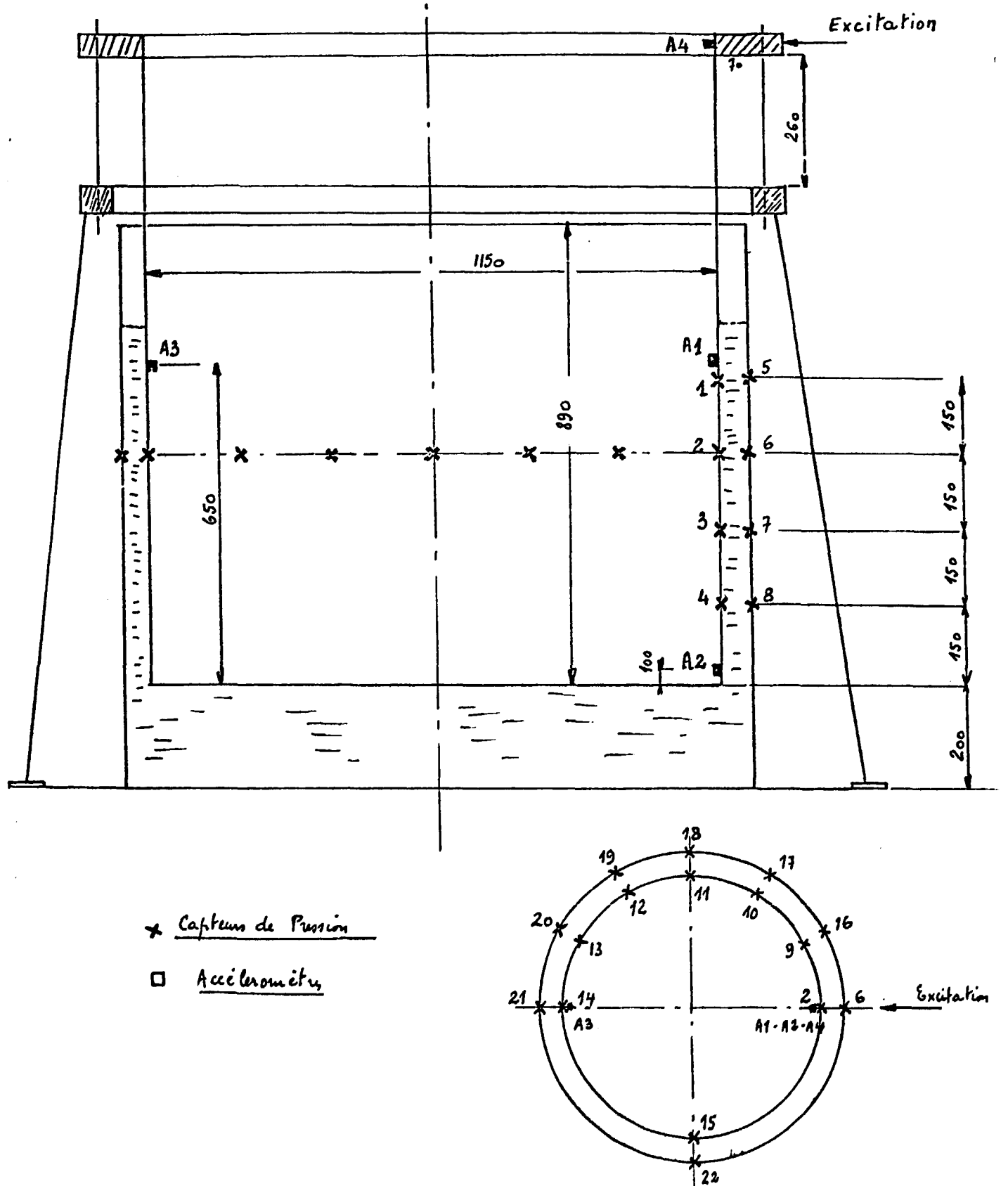


Figure 3



# Instrumentation de la Maquette



✱ Capteurs de Pression

□ Accéléromètres

Figure 5

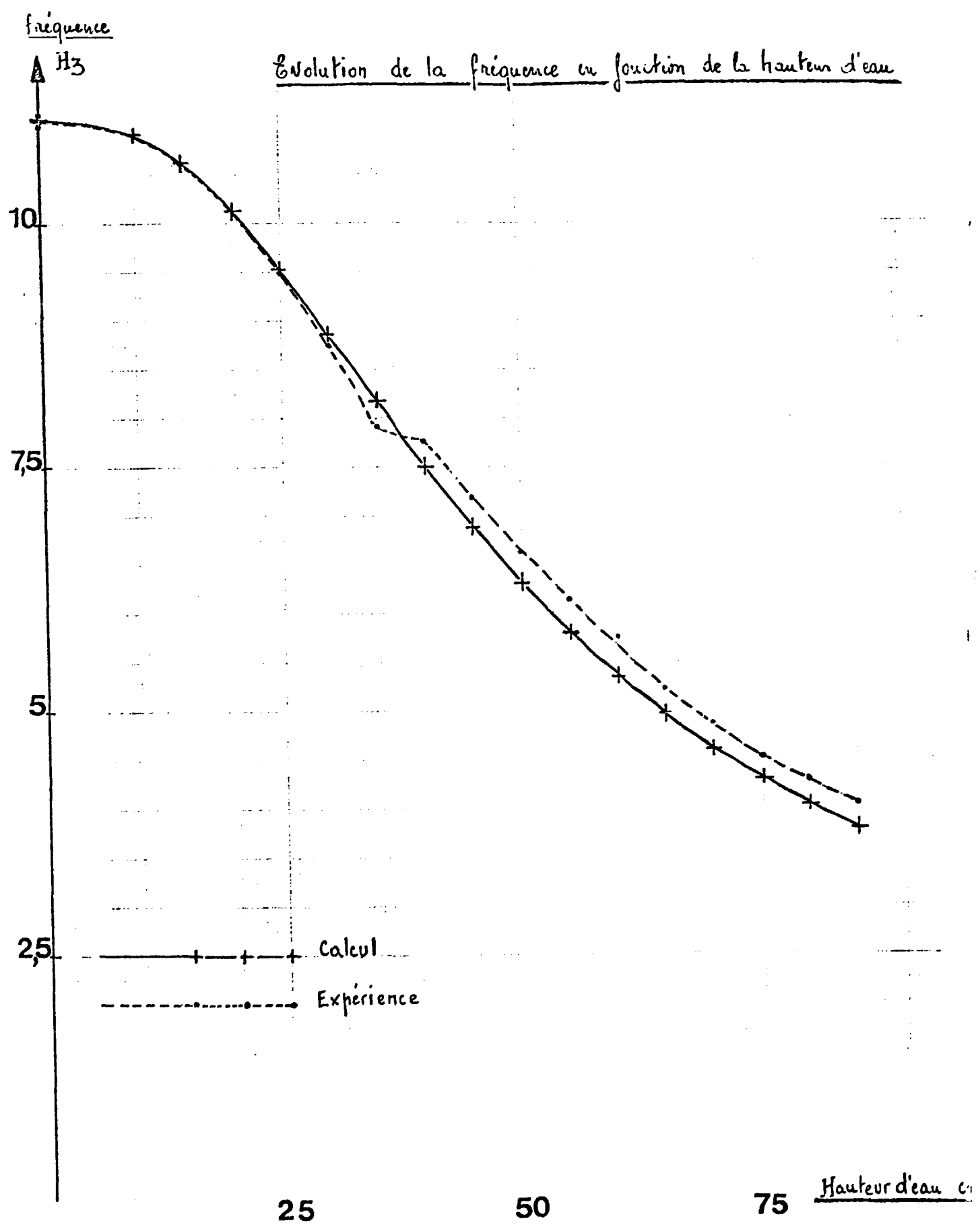


Figure 6

Comparaison Calcul Expérience Pressions Longitudinales 15m d'eau

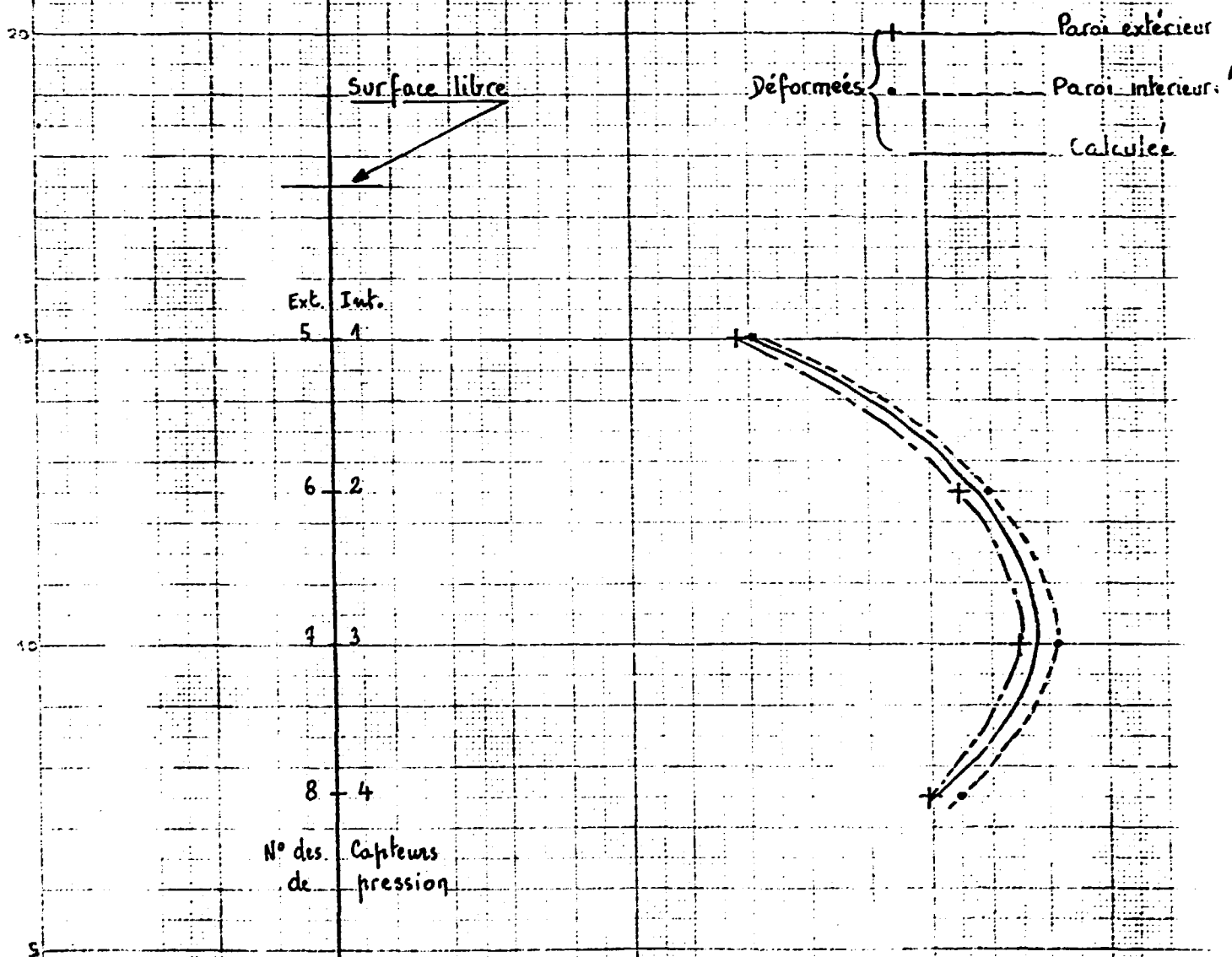


Figure 7



Comparison Calcul Expérience Pressions Azimutales 75 cm d'eau

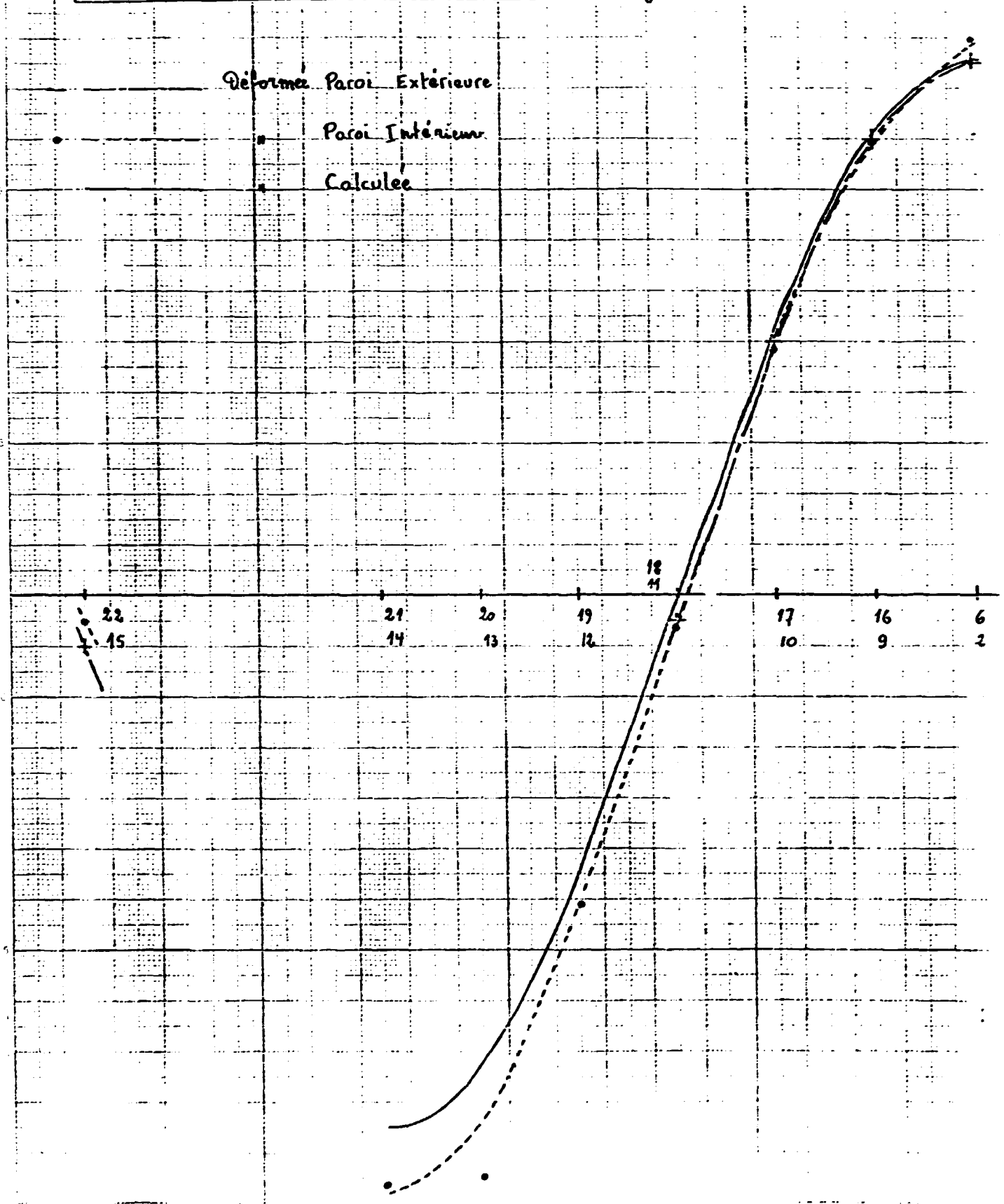


Figure 8

**LEGENDE**

SK<sub>1</sub> et SK<sub>2</sub> = soufflets de caoutchouc

S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> = sandows

| bride de raccordement

AZ<sub>1</sub> = accéléromètre

P<sub>1</sub> = capteur de pression

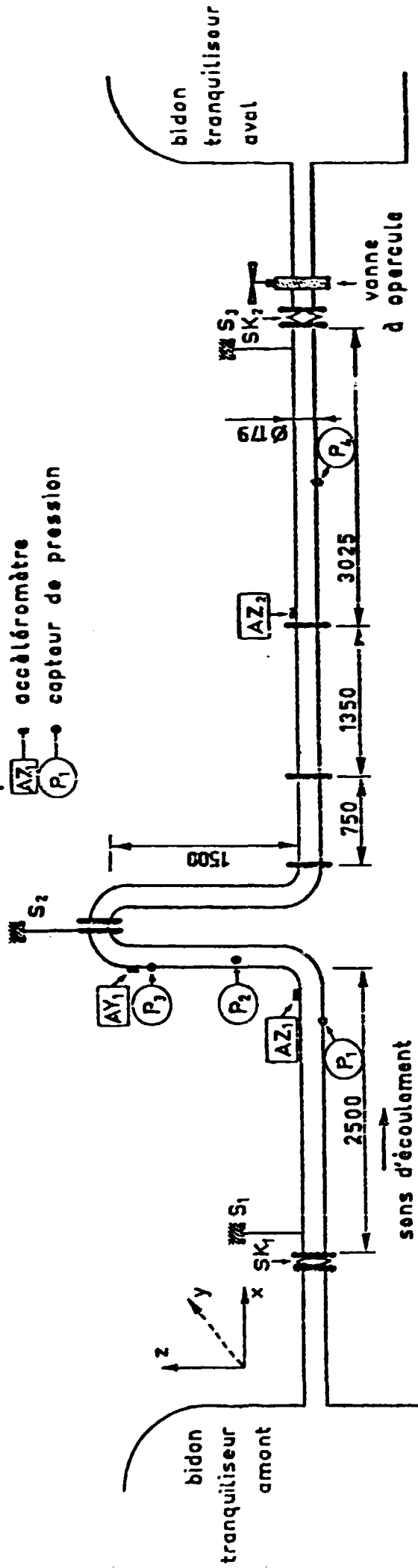


FIG. 9 DISPOSITION DU CIRCUIT

— Expérience  $\nu = 3,68\text{Hz}$   
- - - Calcul  $\nu = 3,89\text{Hz}$

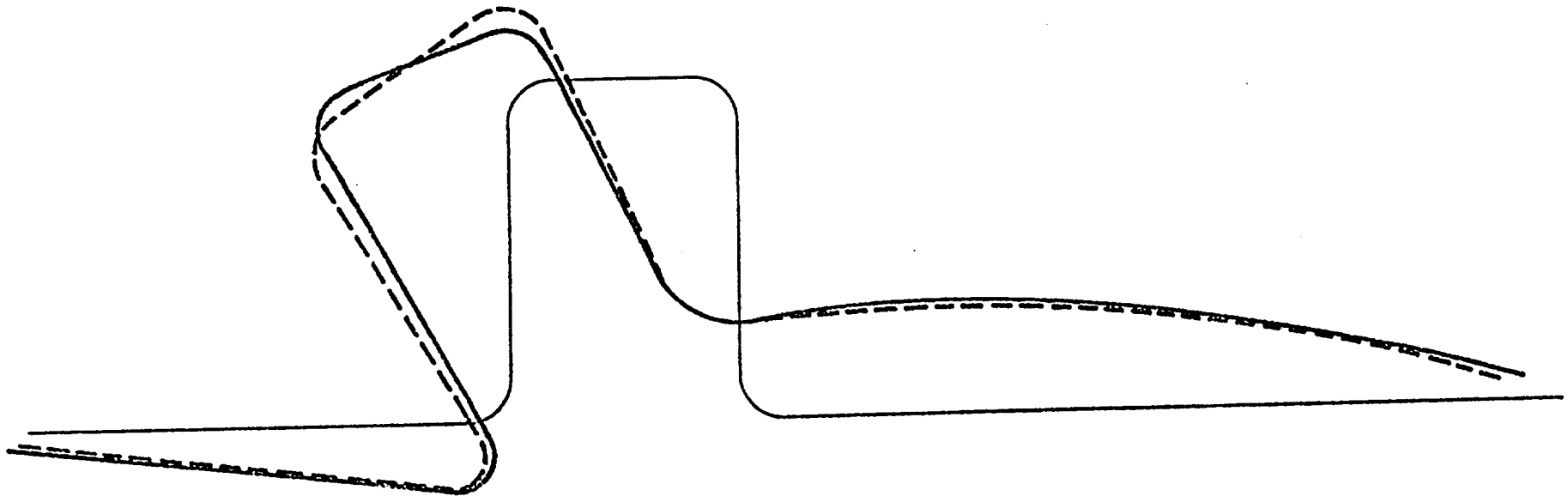


FIG.10 ALLURES MODALES CALCULEES ET EXPERIMENTALES

— Expérience  $\nu = 5,23\text{Hz}$   
- - - Calcul  $\nu = 5,72\text{Hz}$

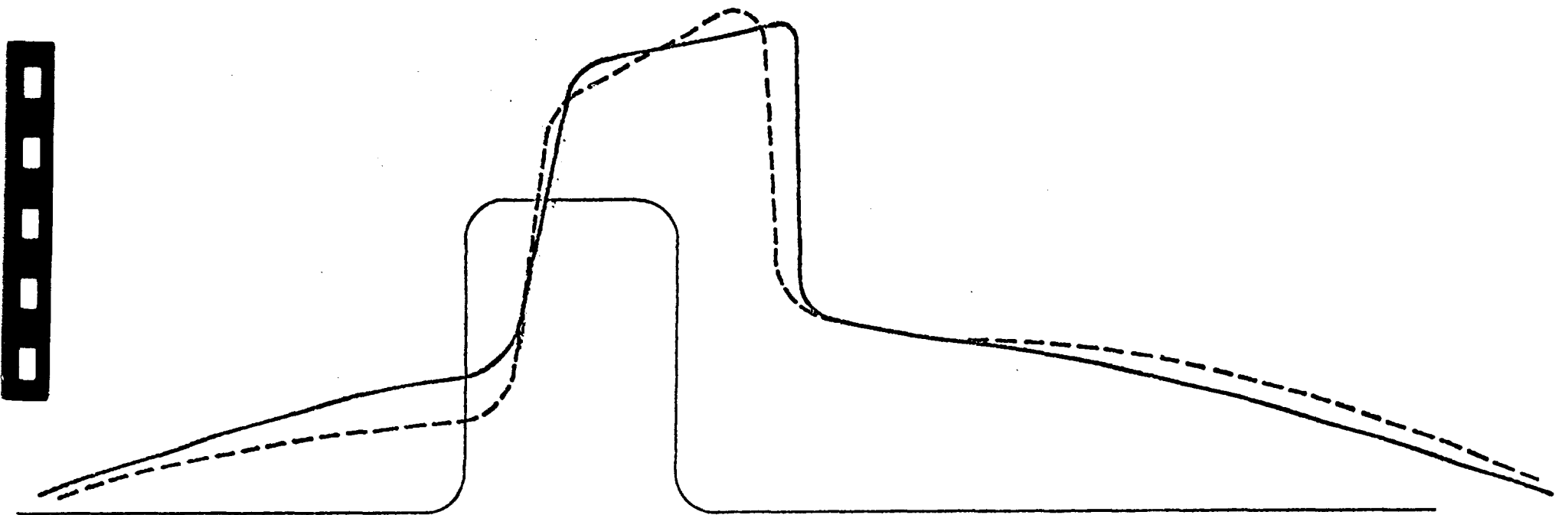


FIG. 11 ALLURES MODALES CALCULEES ET EXPERIMENTALES