

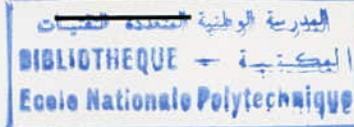
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

14/88

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

10x

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT GENIE HYDRAULIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

SUJET

ETUDE DU MOUVEMENT NON STATIONNAIRE DU LIQUIDE  
DANS UNE CONDUITE ELASTIQUE

Coup de belier et les méthodes de la protection des installations

Proposé par :

Etudié par :

Dirigé par :

M<sup>r</sup> METRIVELLI V.

M<sup>r</sup> BAALLAL C.

M<sup>r</sup> METRIVELLI V.

PROMOTION

Juin 1988

# Remerciements

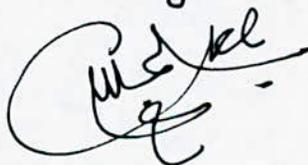
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

Je tiens à remercier tout particulièrement le Docteur:  
M<sup>r</sup>: V. Metrielli, pour son aide continuelle durant  
l'Etude de ce projet, et l'ensemble des enseignants  
ayant contribué à ma formation.

J'apprécie beaucoup les contributions des enseignants,  
UPPALLURY et TAGUI ZADE', pour leur aide

Et finalement, je remercie le Président et les membres  
du Jury qui me fait honneur de juger mon travail.

La signature :



## DEDICACES

Je dedie ce modeste travail à :

- Toute la famille "BAALLAL" d'ENEFFIS.
- Mes parents , mon père et ma mère qui m'ont encouragé à poursuivre mes études .
- Ma grande mère .
- Ma femme qui a souffert beaucoup en attendant de me voir ainsi .
- Mes deux filles : " Mançoura et Bahidja " .
- Mes frères et sœurs .
- Mes oncles .
- Mes cousins et cousines .

Et à tous les amis d'Etude .



# SOMMAIRE

	Pages
I : Generalités:	1
I.1 Introduction.	1
I.2 Définition de phénomène : "le coup de belier".	1
I.3 Causes et effets.	1
II : Coup de belier pendant la fermeture instantanée de la vanne.	3
II.1 Valeur numérique du coup de belier.	5
II.2 Propagation et réflexion des ondes élastiques - analyse physique du coup de belier.	6
II.3 Etude des phénomènes d'ouverture.	14
II.4 Cas d'un coup de belier trop violent : dégagement de l'air dissous.	15
II.5 Intervention des frottements le long de la conduite.	15
III la vitesse de propagation du coup de belier.	17
IV le coup de belier pendant la fermeture lente de la vanne.	24
IV.1 le coup de belier direct.	24
IV.2 le coup de belier indirect.	26
V le coup de belier indirect pendant le changement linéaire de la vitesse.	27

→ VI	Le mouvement non stationnaire de liquide visqueux et compressible dans une conduite.	29
VI:1	Théorème des quantités de mouvement.	29
VI:2	L'équation de continuité.	30
VII	Protection contre le coup de belier.	35
VII.1	Précautions à prendre dans les constructions et l'exploitations des systemes hydrauliques.	35
VII:2	Cas d'esserie des pompes.	37
VII:3	Dispositifs anti-belier.	40
VII:4	Cheminée d'équilibre et Reservoir d'air "anti-belier" 61 <i>Recommandation, Joix et exploitation.</i>	61
VII:5	Dispositifs anti-belier avec éléments en plastique	71
VII:6	Calcul d'un reservoir d'équilibre ; en utilisant la methode graphique de Bergeron. (exemple de calcul)	79
VIII	Conclusion.	89

# I GENERALITES:

## I.1 Introduction:

Nombreux, sont les problèmes, d'ordre physique et technique qui peuvent endommager le réseau de distribution d'eau potable dans les agglomérations urbaines. Parmi les plus remarquables, un phénomène risque de nuire aux éléments constitutifs du réseau, tels que les pompes et les conduites. Dans notre projet à présent nous étudierons cet phénomène, et la protection des canalisations contre ses effets.

## I.2 Définition de phénomène: "Le coup de belier":

Le coup de belier est un phénomène oscillatoire caractérisé par des variations de pressions, qui se propagent dans le milieu constitué par le fluide; C'est le régime non permanent qui apparaît dans une conduite lorsqu'on provoque une variation rapide du débit à l'extrémité aval de celle-ci, chaque tranche d'eau subit des variations, dans le temps, de pression et de vitesse c à d, qu'un régime variable se substitue au régime permanent initial.

## I.3. Causes et effets:

Le changement instantané du régime hydraulique crée le phénomène du coup de belier, il est dû aux causes suivantes:

- Arrêt brusque du groupe électropompe (par disjonction).
- Fermeture ou ouverture instantanée d'une vanne;
- Démarrage simultané ou séparé d'un ou plusieurs groupes électropompes,

Le coup de belier peut provoquer une rupture de la canalisation par :

- éclatement : suite à une surpression ;
- écrasement : suite à une forte depression .



Les variations de pressions peuvent donner lieu aussi à :

- Un deboitement des conduites .
- Une rupture des joints .
- Une détérioration des accessoires .
- Un bruit désagréable .

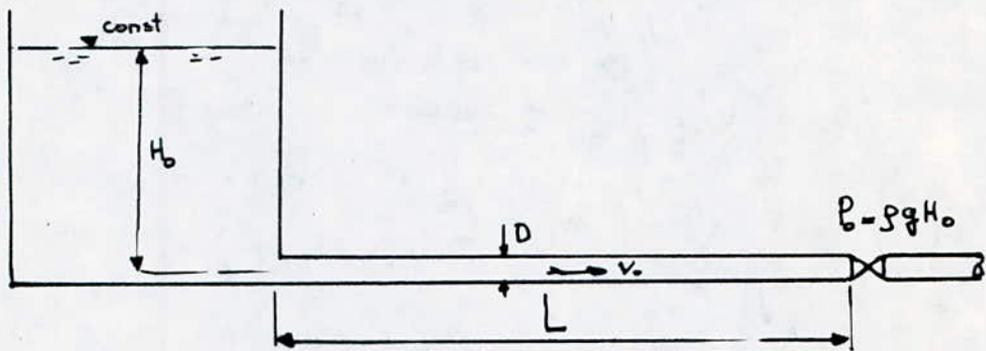
Pour palier à ce phénomène , nous allons proposer divers dispositifs qui ont pour rôle de maintenir la pression dans les conduites entre une maximale et une minimale compatible avec la résistance des installations , pour protéger les conduites de refoulement contre les conséquences d'un arrêt d'une pompe ou la fermeture brusque d'une vanne . Parmi , les plus utilisés ceux que nous allons citer dans le chapitre de la protection , contre le coup de belier , de la canalisation et de ses accessoires .

---

## Chapitre II

### COUP DE BELIER PENDANT LA FERMETURE INSTANTANÉE DE LA VANNE

Considérons une fermeture instantanée (brusque) de la vanne, à la fin d'une conduite liée au réservoir par l'autre extrémité (fig 1)



#### Données

Longueur de la conduite:  $L$ ;

Diamètre de la conduite:  $D$ ;

la section de la conduite:  $\omega$ ;

l'épaisseur du parois:  $e$ ;

la vitesse moyenne d'écoulement en régime permanent:  $v$ ;

Module d'élasticité du matériau de la conduite:  $E$ ;

Module d'élasticité du liquide:  $E_L$ ;

la masse volumique de l'eau:  $\rho$ ;

la pression hydrodynamique (initiale):  $H_0 = P/\rho g$ .

En plus, supposons que :

- 1: la dimension du réservoir est très grande, et le niveau reste constant.
- 2: la perte de charge et charges dynamiques sont faibles, c à d, que la ligne piézométrique est pratiquement horizontale.

3: le mouvement est unidimensionnel, c'est-à-dire, toutes les vitesses locales sont égales à la vitesse moyenne  $v$  et la pression est la même en tout point de la section transversale de la conduite, les caractéristiques du mouvement considéré dépendent seulement de la coordonnée longitudinale.

4: Supposons, en premier lieu la fermeture complète et instantanée ( $t=0$ ) [ce qui représente évidemment un cas théorique].

Dans un milieu isotrop et indéfini l'onde élastique se propage sans modification, mais lorsqu'elle rencontre une surface séparant deux milieux différents on observe les phénomènes de "réflexion et réfraction". avec cela, en pratique; on rencontre deux cas importants :

a) l'onde rencontre une surface solide, alors elle se réfléchit sans changement de signe et avec la même célérité.

b) l'onde rencontre une surface liquide à pression constante, dans ce cas l'onde change son signe.

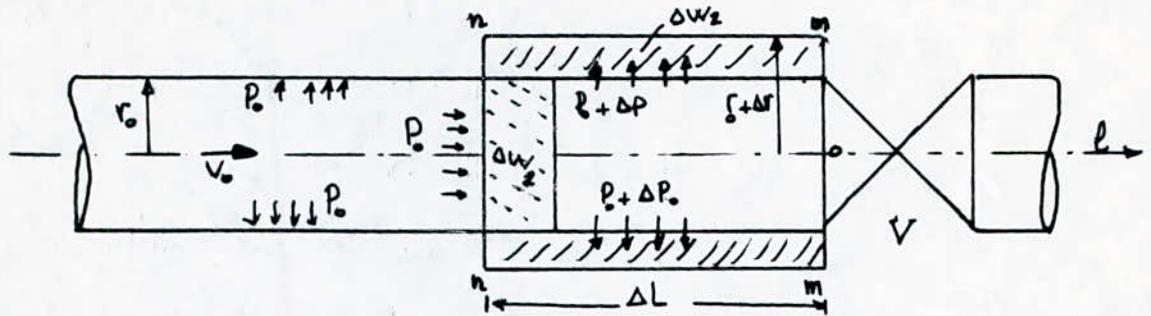
Si le liquide est absolument incompressible ( $E_L = \infty$ ), et les parois ne sont pas élastiques ( $E = \infty$ ), toute la masse liquide s'arrête immédiatement, nous aurons derrière la vanne une brusque montée de la pression.

Dans les conditions réelles, parois élastiques et liquide compressible le caractère d'écoulement change le procès du coup de bélier.

la surface (m-n) (fig 2) qui sépare la partie soumise à l'action de surpression et la partie stagnante est appelée "front de l'onde de choc".

Après un temps infiniment petit, après la fermeture de la vanne, la couche m-n est arrêtée; l'épaisseur de cette couche  $\Delta L$  dépend

de la propriété élastique du liquide et de parois de la conduite



( fig 2 )

Sous l'action de ces couches, la masse arrêtée entre m et n se trouve comprimée, et les parois de la conduite s'étendent.

## II 1: Valeur numérique du coup de belier :

L'augmentations de la pression qui engendrent les coups de belier peuvent être déterminées, en appliquant le théorème de la quantité du mouvement pour la masse liquide arrêtée; en projetant sur la direction du mouvement; nous avons :

- L'impulsion d'une force extérieure agissant sur la masse considérée

$$- \Delta P \cdot \omega \cdot \Delta t \quad (1)$$

- Le changement de la quantité du mouvement de la masse :

$$- (\rho \omega \cdot \Delta L \cdot v_0 + \rho \omega v_0 \Delta t v_0) \quad (2)$$

$$\Delta P \cdot \Delta t = \rho \Delta L v_0 + \rho v_0^2 \Delta t \quad (3)$$

Si on désigne par C le rapport  $\frac{\Delta L}{\Delta t}$ , nous obtiendrons :

$$\Delta P = \rho C v_0 + \rho v_0^2 \quad (4)$$

ou bien 
$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \Delta H = \frac{C v_0}{g} + \frac{v_0^2}{g} \quad (5)$$

où  $C$  est la vitesse de propagation des ondes du coup de belier dans la conduite correspondante. En général  $v_0 \ll C$ , c.à.d,  $v_0$  négligeable devant  $C$ .

enfin :

$$\boxed{\Delta P = \rho C v_0} \quad (6)$$

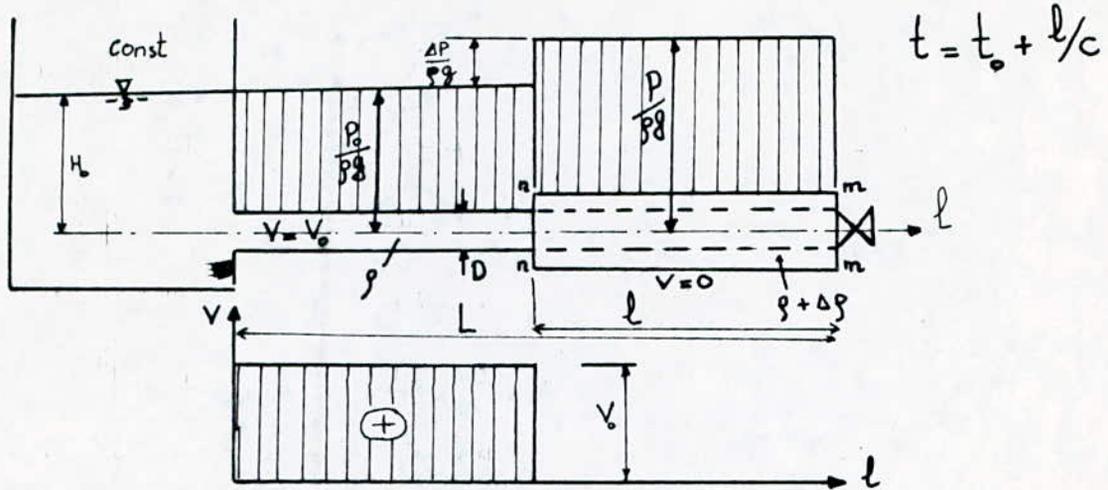
formule de JOWKOVSKI

## II.2 Propagation et réflexion des ondes élastiques - analyse physique du coup de belier

### II.2.1 fermeture complète et instantanée :

Après la fermeture instantanée de la vanne la perturbation se propage vers l'amont avec la vitesse  $C$  ; après son passage le fluide est immobile et se trouve porté à la pression  $P$  régnante derrière la vanne dès après la fermeture.

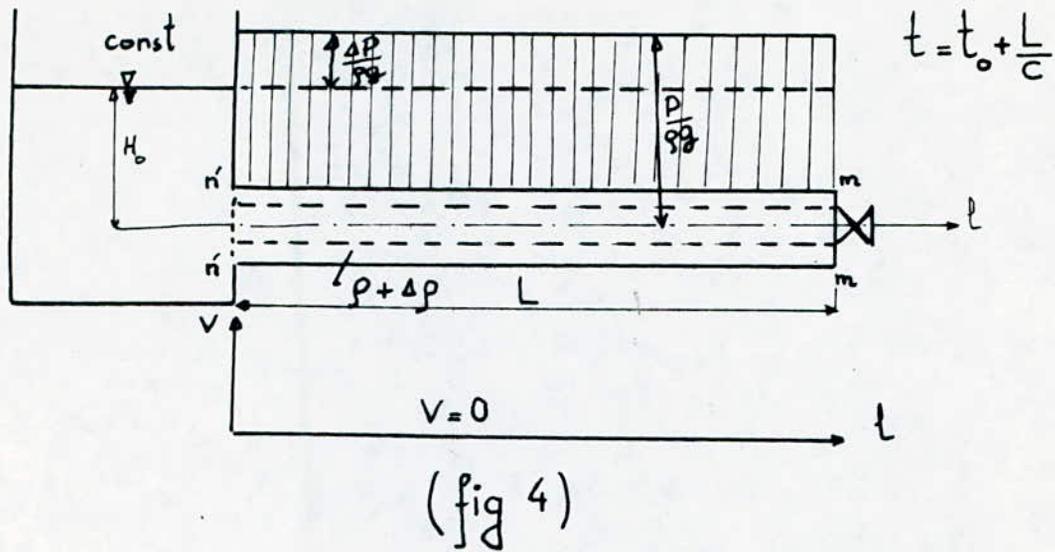
Le front n-n d'onde du choc parcourt le chemin  $l$  dans un temps  $l/c$  après la fermeture, sur cette longueur  $l$  la pression augmente par  $\Delta P$  ( $P = P_0 + \Delta P$ ), la vitesse s'annule  $v=0$ , les parois de la conduite s'étendent, le liquide se trouve comprimé et la masse volumique devient égale à  $\rho + \Delta \rho$ . L'état de la conduite et les épures de répartition de la pression et de la vitesse le long de la conduite, pendant  $t = t_0 + l/c$  sont donnés par la figure suivante (fig 3)



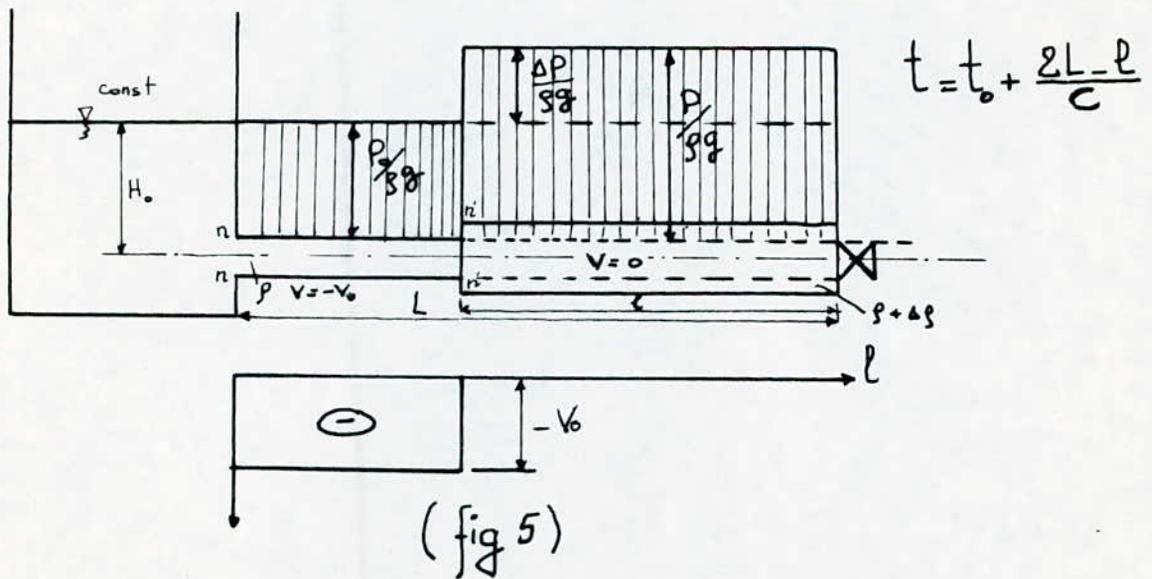
( fig 3 )

A l'instant  $t = t_0 + \frac{l}{c}$  la perturbation atteint la section d'entrée de la conduite, et le front prend la position  $n'-n'$ ; à ce moment le liquide est immobile et en équilibre et se trouve porté à la pression  $P = P_0 + \Delta P$  (fig 4). Le liquide qui a franchi à la vitesse  $v_0$  cette section d'entrée entre le moment initial  $t_0$  et le moment où la perturbation y arrive sert à compenser la variation de volume due à la dilatation de la conduite et à la variation de la masse volumique du liquide. Une seconde phase de perturbation repart de la section d'entrée de la conduite vers l'aval, toujours avec la célérité  $C$ , c'est une phase de décompression.

Après le passage de la perturbation la pression a repris la valeur de  $P_0$  initiale, mais la vitesse d'écoulement est inversée  $v = -v_0$  et la conduite redevient sa forme initiale.



Pendant  $t = t_0 + \frac{L}{c} + (L-l)/c = t_0 + (2L-l)/c$ , l'onde de reflexion parcourt le chemin  $(L-l)$  [la distance qui sépare le front d'onde réfléchi et le reservoir], où la pression est  $p$  et la vitesse  $v = -v_0$ . sur l'autre tronçon de la conduite la pression est encore  $P = P_0 + \Delta P$  et la vitesse nulle  $v = 0$ . (fig 5).

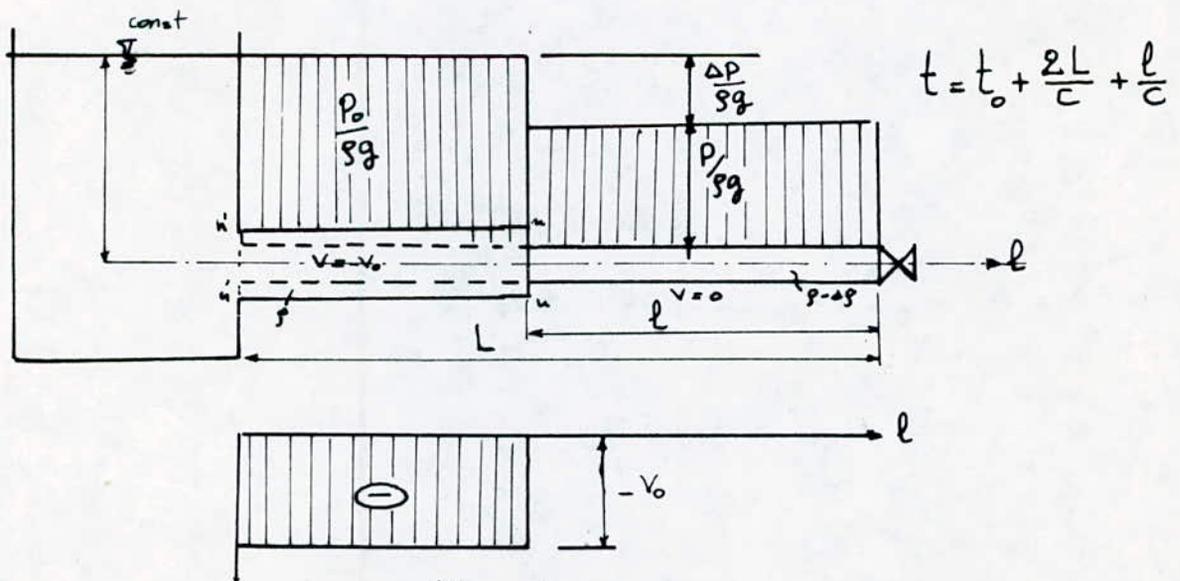


A l'instant  $t = t_0 + \frac{2L}{c}$  l'onde de reflexion atteint la section de la

vanne, le liquide se trouve porté à la pression  $P_0$ . A cause de l'inertie du mouvement de la masse liquide la pression sur la vanne à cet instant est diminuée par  $\Delta P = -\rho v_0 c$ , une reflexion de la perturbation a ensuite lieu sur la vanne et une phase de contraction de la conduite commence. une onde de dépression prend naissance derrière la vanne, et le liquide se trouve sous la pression  $P = P_0 - \Delta P$ , cette onde se propage toujours avec la même célérité  $c$ .

On suppose, que la pression lors du mouvement permanent et pendant le coup de belier reste toujours supérieure à la tension de vapeur  $P > P_v$  à la température ordinaire. ce qui assure l'absence des vides.

Pendant  $t = t_0 + \frac{2L}{c} + \frac{l}{c}$  l'onde repart de la vanne vers le réservoir, sous la pression  $P = P_0 - \Delta P$ ; la vitesse revient à zéro ( $v=0$ ), la masse volumique diminue et les parois de la conduite deviennent comprimées. (fig 6).

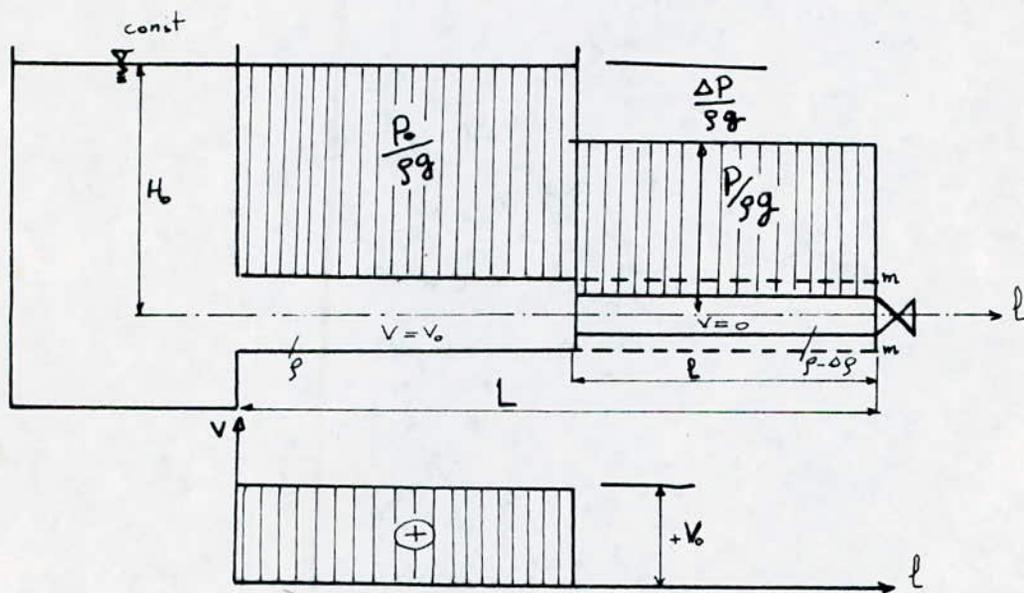


(fig 6).

le reste de la conduite reste sous conditions précédentes :  $(P_0 ; -v_0)$ .

A l'instant  $t = t_0 + \frac{3L}{c}$  la perturbation atteint la section d'entrée de la conduite, le fluide est au repos, mais son état d'équilibre dans ces conditions ( $P < P_0$ ) ne peut être conservé, car le niveau dans le réservoir est supposé constant, alors il y aura une autre phase de perturbation repart, après réflexion de l'onde, de la section d'entrée vers l'aval, le fluide dans la conduite reprend son état initial  $P_0$  et la vitesse  $+v_0$ , et toujours, avec la même célérité  $C$ .

Pendant,  $t = t_0 + \frac{3L}{c} + \frac{L-l}{c}$  cette onde parcourt la longueur  $(L-l)$  avec la vitesse  $v_0$  est sous la pression initiale  $P_0$  (fig 7).



(fig 7).

Sur le reste de la conduite les conditions précédentes sont remplis ...

$$[ \rho - \Delta \rho , P = P_0 - \Delta P , v = 0 ] .$$

A l'instant  $t = t_0 + \frac{4L}{c}$  l'onde de réflexion arrive à la vanne, à cet instant le liquide se trouve à l'état initial, porté à la pression  $P_0$  avec la vitesse  $v_0$ . le même cycle se répète indéfiniment si nous

ne tenons pas compte des divers pertes d'énergie qui en réalité amortissent ce phénomène. On constate que les résultats se déduisent les uns des autres à partir de la surpression  $\Delta P$  à l'instant  $t=0$ .

Le diagramme de la pression enregistrée par un manomètre placé en amont de la vanne  $V$  a donc l'aspect de la figure suivante:



Le phénomène de surpression qui accompagne une fermeture brusque est donc un phénomène périodique de période  $T = 2\theta = \frac{4L}{c}$  ;

$T$  est la période d'oscillation de la conduite.

## II.2.2 : la durée de fermeture $t$ n'est pas instantanée mais reste toutefois inférieure à $2L/c$ :

On a encore affaire à une fermeture brusque ; on observe, en amont de la vanne  $V$ , le même phénomène périodique de période  $T = \frac{4L}{c}$  avec la même surpression maximale, calculée par la formule de Jowkovski ; dans le cas d'une fermeture rapide :  $\Delta P = \rho C V_0$ .

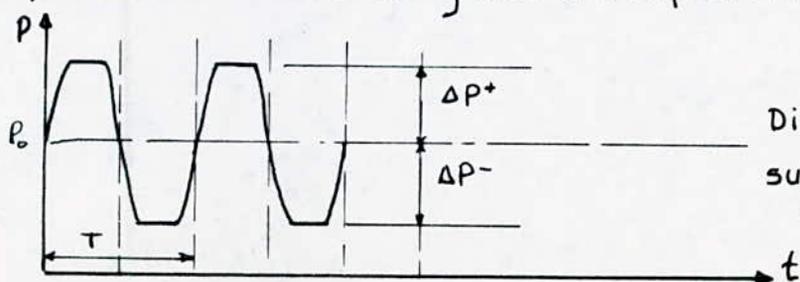
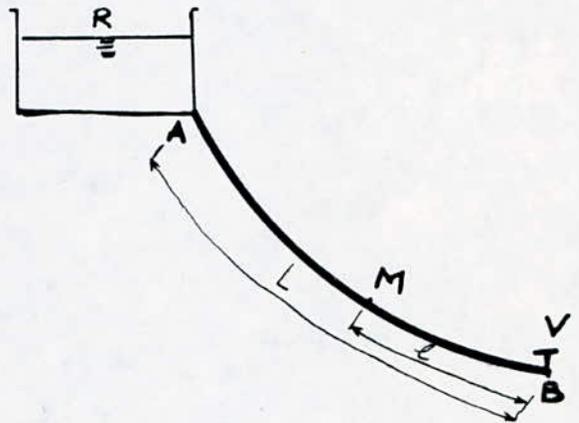


Diagramme de la surpression à la vanne.

## II 2.3 Changement de la pression en un point distant $l$ de la vanne.

Au point  $M$  d'abscisse  $l$  (mesurée à partir de la vanne) l'onde nait à l'instant  $l/c$  et si la fermeture s'effectue en une durée  $t_0$ , la surpression croit progressivement en  $M$  et atteint sa valeur maximale  $\Delta P = \rho C V_0$  à l'instant  $\frac{l}{c} + t_0$  à moins qu'à cet instant l'onde de depression, revenant du reservoir  $R$ , ait eu le temps d'arriver en  $M$ .



La distance parcourue par cette onde partant de  $M$ , atteignant  $R$  et revenant en  $M$ , est  $2(L - l)$ .

La vitesse de propagation de l'onde étant  $C$ , la durée mise par l'onde pour parcourir le trajet considéré sera donc  $\frac{2(L-l)}{C}$ , autrement dit ; si

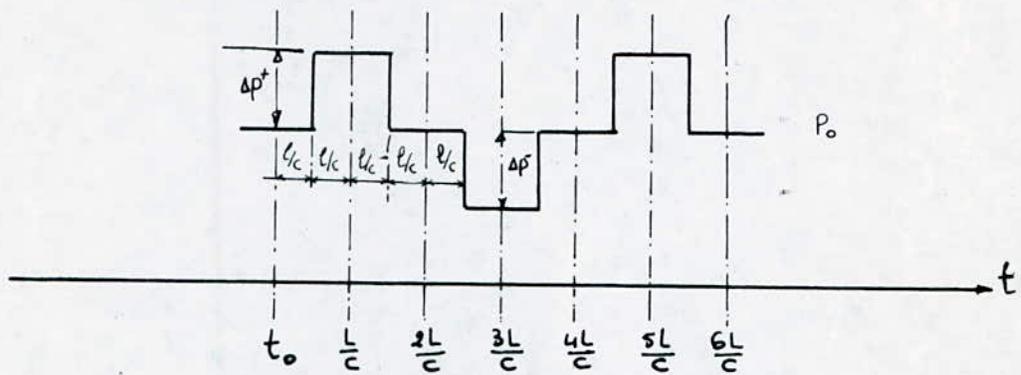
$$t < \frac{2(L-l)}{C} \quad \text{ou} \quad l < L - \frac{Ct}{2}$$

La surpression maximale en  $M$  atteindra la valeur  $\Delta P$ . Cette surpression maximale sera d'ailleurs atteinte en tous les points de la conduite d'abscisse  $l < L - \frac{Ct}{2}$ .

En particulier si  $t_0 = 0$  (fermeture instantanée) la surpression  $\Delta P$  se transmettra integralement tout le long de la conduite.

EN DEFINITIVE, la periode d'oscillation des ondes élastique du coup de belier reste la même  $T = \frac{4L}{C}$ , mais la durée du temps, lorsque la pression

est différente de  $P_0$  ( $\pm \Delta P$ ), la vitesse est plus petite que celle nécessaire pour parcourir  $L$ , est égale à  $t = 2(L-l)/c$ . (fig 9).



(fig 9)

Pour les points d'abscisse  $l > L - \frac{ct}{2}$ , M<sup>r</sup> De SPARRE a montré que la répartition du coup de belier était linéaire.

En définitive :

1° Pour tous les points pour lesquels :

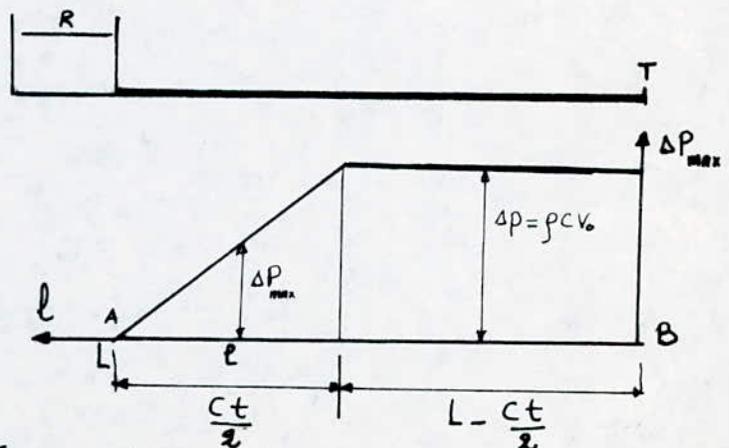
$$l < L - \frac{ct}{2}$$

$$\Delta P_{\max} = \rho c v_0 \quad (\text{Joukovski})$$

2° Pour tous les points pour lesquels :

$$L - \frac{ct}{2} < l < L$$

on a la figure



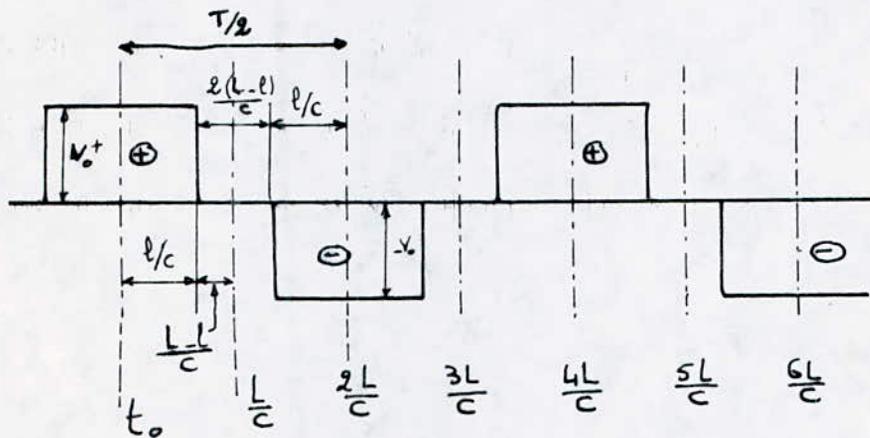
$$\frac{\Delta P_{\max}}{\rho c v_0} = \frac{L-l}{\frac{ct}{2}}$$

$$\Delta P_{\max} = \frac{\rho v_0 t}{2} (L-l).$$

répartition de la surpression le long de la conduite.

## II 2:4: Changement de la vitesse dans un point distant $l$ de la Vanne :

En vertu de l'analyse physique du phénomène, les phases de la vitesse  $v = +v_0$  alternent avec les phases de la vitesse  $v = 0$  et  $v = -v_0$  respectivement. A l'entrée de la conduite la vitesse change périodiquement de  $+v_0$  à  $-v_0$  dans les instants  $\frac{L}{c}$ ,  $\frac{5L}{c}$ ,  $\frac{9L}{c}$ , ... etc, et de  $-v_0$  à  $+v_0$  dans les instants  $\frac{3L}{c}$ ,  $\frac{7L}{c}$ ,  $\frac{11L}{c}$  ... etc. (fig 10).



( fig 10 ).

## II 3: Etude des phénomènes d'ouverture :

L'Etude des ouvertures brusques ou lentes s'effectue de la même façon que celle des fermetures.

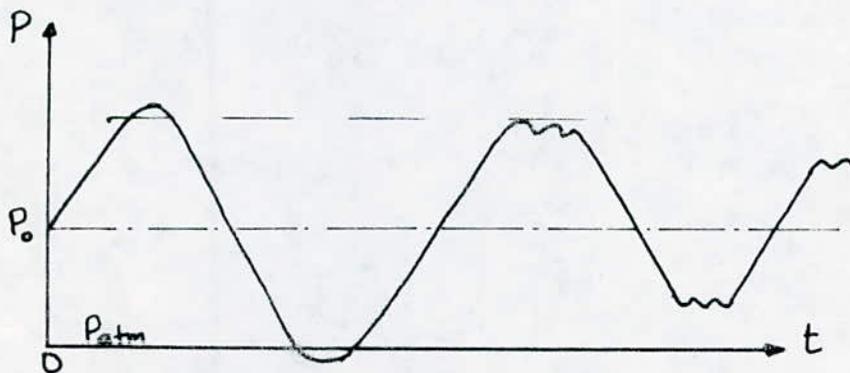
Toutefois dans le cas d'une fermeture brusque la surpression maximale  $\Delta P$  n'est limité que par la valeur de  $v_0$ . Au contraire dans le cas d'une ouverture, la pression ne peut dépasser  $P_0$  en valeur absolue car, pour cette valeur, la depression à la vanne devenant égale à la pression atmosphérique, l'écoulement s'arrêterait et tout se passerait comme si la conduite n'était pas ouverte. Donc, alors que la surpression consecutive

à une fermeture brusque n'est limitée que par la valeur initiale de  $v_0$ , la dépression consécutive à une ouverture ne peut dépasser  $-P_0$ . Les études seront refaites, mais au commencement au lieu d'une surpression il y aura une dépression.

L'arrêt brusque d'une pompe commence aussi par une dépression.

## II 4 Cas d'une coup de belier trop violent : dégagement de l'air dissous.

Pour une dépression  $-\Delta P = \rho c v_0$  très importante la pression absolue minimale dans la conduite est égale à  $P = P_0 - \Delta P$ , elle peut devenir inférieure à la pression atmosphérique et entraîner un dégagement partiel de l'air dissous dans l'eau voire même une vaporisation (cavitation); la présence de ces poches d'air ou de vapeur se manifeste par des dentelures sur les portions suivantes de la courbe suivante :

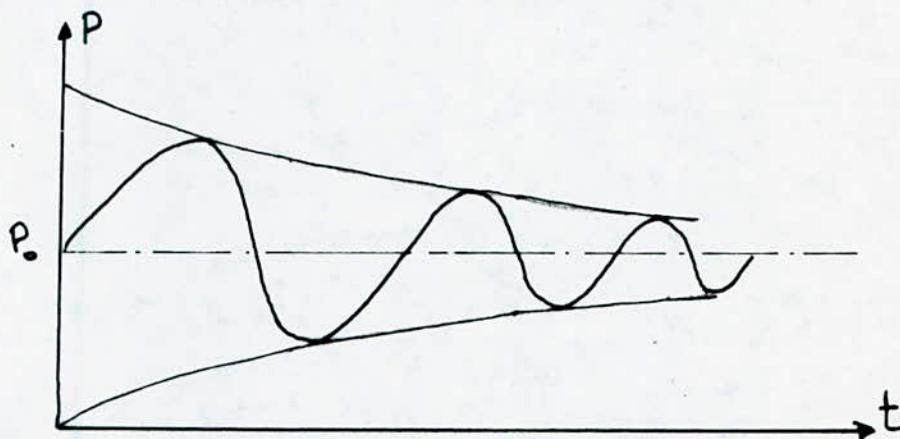


Repartition de pression - cas de cavitation.

## II 5 Intervention des frottements le long de la conduite :

Nous avons négligé jusqu'à présent l'influence des frottements le long de la conduite. Leur rôle est effectivement négligeable quand on étudie le coup de belier simple c'est à dire la transmission d'une onde le

Long de la conduite. Mais pour l'étude des oscillations consecutives au coup de belier, l'action de frottements a pour resultat d'affaiblir progressivement le phenomene. Cette "USURE" du coup de belier se traduira par exemple par l'amortissement progressif des ondes de la sinusoide representant la variation de la pression en un point de la conduite, comme l'indique la figure suivante.

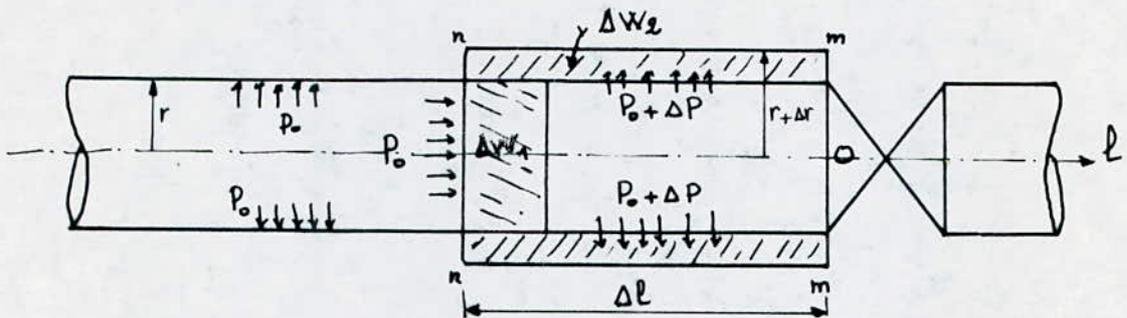


amortissement progressif des ondes  
par frottement.

8

# Ch III LA VITESSE DE PROPAGATION DU COUP DE BELIER C :

Nous déterminerons la vitesse de propagation du coup de belier dans une conduite élastique de section circulaire.



(fig 1).

Considérons le segment de longueur  $\Delta l$  (fig 1), Après un certain moment  $\Delta t$ , la vitesse du liquide sur cet segment est  $v_0$  et le volume accumulé dans le cylindre n-m égal :

$$\Delta W = Q \cdot \Delta t = \omega_0 \cdot v_0 \cdot \Delta t \quad (1)$$

ce volume représente la somme des deux volumes :

- - Un volume dû à la dilation de la conduite sous l'effet de la surpression  $\Delta W_1$ .
- - Un volume dû à la raccourcissement du liquide sous l'effet de la surpression aussi  $\Delta W_2$ .

la dilation de la conduite engendre une augmentation du rayon, qui est devenu  $r = r_0 + \Delta r$ , et par consequence la section augmente aussi par rapport à l'initiale  $\omega_0$ .

et :

$$\Delta W_1 = (\omega - \omega_0) \Delta l = \Delta \omega \cdot \Delta l \quad (2)$$

le volume dû à la raccourcissement du liquide égale :

$$\Delta W_2 = \beta \cdot \omega \cdot \Delta l \cdot \Delta p$$

avec :

$$\beta = \frac{1}{E_L} \quad \text{alors,} \quad \Delta W_2 = \omega \cdot \Delta l \cdot \frac{\Delta P}{E_L}$$

nous avons donc :

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 \quad \text{cà d}$$

$$\omega_0 \cdot v \cdot \Delta t = \omega_0 \cdot \Delta l \cdot \frac{\Delta P}{E_L} + \Delta \omega \cdot \Delta l$$

divisons par  $\omega_0 \cdot \Delta l$ , nous aurons.

$$v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta l} = \frac{\Delta \omega}{\omega_0} + \frac{\Delta P}{E_L}$$

D'après Jowkowski  $\Delta P = \rho c v + \rho v^2$ , tenons compte que  $\Delta t$  tend vers zéro  $\Delta t \rightarrow 0$ , nous avons.

$$\frac{dP}{\rho c^2} = \frac{d\omega}{\omega_0} + \frac{dP}{E_L}$$

$C$  : la vitesse de propagation des ondes élastiques du coup de belier dans la conduite :

$$C = \sqrt{\frac{dP/\rho}{dP/E_L + d\omega/\omega_0}}$$

Transformons cette équation à une forme pratique :

Sous l'action de la pression  $P$  la matière de la conduite est soumise à une contrainte donnée par la formule de Mariotte :

$$\sigma = \frac{PD}{2e}$$

avec  $D$ : Diamètre de la conduite .

$e$ : épaisseur de la paroi .

La variation de la pression  $dp$  entraîne une variation de contrainte  $d\sigma$ ,  
et on a :

$$d\sigma = \frac{D}{2e} dp \quad (*)$$

L'augmentation de la contrainte  $d\sigma$  (effort) entraîne un accroissement du diamètre  $dD$  (déformation) donné par la loi de Hooke .

$$d\sigma = E \frac{dD}{D} \quad (**)$$

avec  $E$  : Module d'Young ou module d'élasticité de la paroi de la conduite .

$$\frac{d\omega}{\omega_0} = \frac{d(\pi r^2)}{\pi r^2} = 2 \frac{\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r} \quad (*)$$

entre  $(**)$  et  $(*)$  nous avons :

$$\frac{d\omega}{\omega_0} = 2 \frac{d\sigma}{E} = \frac{dP}{E} \frac{D}{e} \quad (***)$$

$$\frac{d\omega}{\omega_0} = \frac{dP}{E} \frac{D}{e}$$

En tenant compte que la déformation suit la loi de Hooke et que  $E$  et  $E_L$  ne dépendent pas de la pression .

finalment si on remplace l'expression  $(***)$  dans l'équation donnant  $C$  nous avons :

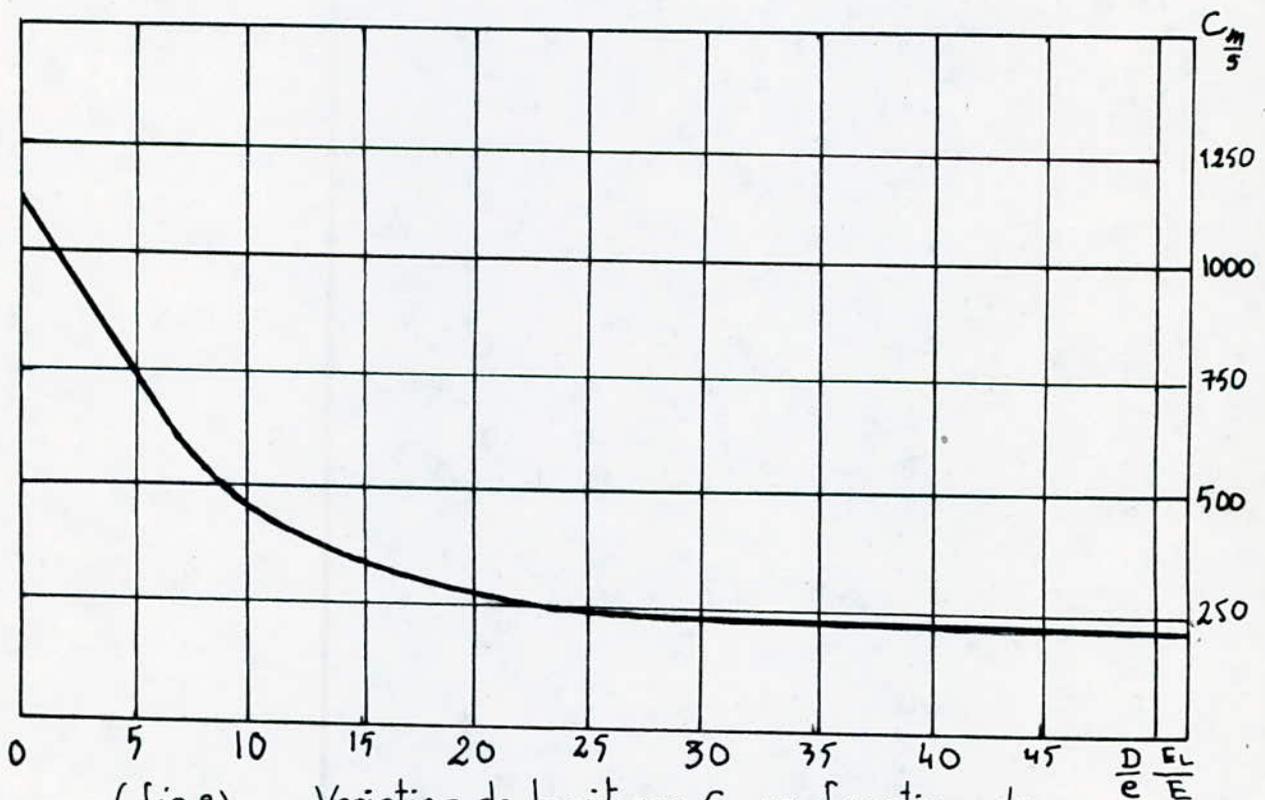
$$C = \sqrt{\frac{E_L / \rho}{1 + \frac{D}{e} \frac{E_L}{E}}}$$

si la conduite est absolument dure ( $E = \infty$ );

$$C_0 = \sqrt{E_L / \rho}$$

précédente  $c = \frac{1425}{1 + \frac{D}{e} \frac{E_L}{E}}$  (50% plus petite). Cette diminution s'explique par la présence des composantes de gaz et corps solides en suspension dans le liquide considéré; ces composantes changent la grandeur du module d'Young  $E_L$  du liquide, ce qui diminue la vitesse de propagation des ondes élastiques  $C$ .

L'influence de gaz et particules solides dans un courant triphasé dépend de la pression, de la quantité du volume de gaz et corps solides, de la densité relative de phase solide par rapport à celle de l'eau et du module d'élasticité.



(fig 2) - Variation de la vitesse  $C$  en fonction de la grandeur  $\frac{D}{e} \frac{E_L}{E}$  (Pour l'eau).

La vitesse de propagation des ondes, dans la conduite est inversement proportionnelle à la grandeur  $\frac{D}{e} \frac{E_L}{E}$  - (fig 2) -

la vitesse de propagation des ondes élastiques dans un courant triphasé est donnée par la formule d'Allichev B:

$$C = \frac{\sqrt{E_L / \rho}}{\sqrt{A + B}}$$

où

$$A = (1 + \varepsilon_{gn} - \varepsilon_{gd} - \varepsilon_{ps}) + \frac{D}{e} \frac{E_L}{E} + \varepsilon_{gn} \frac{E_L}{X_p}$$

$$B = \alpha \frac{P_{at} P_2}{\rho^2} E_L + \varepsilon_{ps} \frac{E_L}{E_{ps}} + \varepsilon_{ps} \frac{D}{e} \frac{E_L}{E} \left( \frac{\rho_{ps}}{\rho} - 1 \right)$$

$\varepsilon_{gn}$ : le volume de gaz non solubilisé.

$\varepsilon_{gd}$ : le volume de gaz dissous dans le liquide.

$\varepsilon_{ps}$ : le volume occupé par les particules solides.

$X_p$ : l'exposant de polytrophe.

$P_{at}$ : la pression atmosphérique.

$P_2$ : la pression exercée par le gaz dissous dans le liquide.

$E_{ps}$ : Module d'élasticité des particules solides.

$\rho_{ps}$ : densité des particules solides.

$\rho$ : densité de l'eau.

**Remarque:** la formule d'Allichev B n'est applicable que dans le cas où  $\varepsilon_{gn} \leq 0,02$  à  $0,03$ .

Dans le cas d'un mélange liquide - corps solides, le coup de belier ne peut être trop violent, car la vitesse de propagation des ondes élastiques est petite.

Materiaux	E $\frac{N}{mm^2}$ $\frac{MN}{m^2}$
Acier	$(1,87 + 2,16) \cdot 10^5$
fonte	$(0,88 + 1,47) \cdot 10^5$
Cuivre	$(0,98 + 1,28) \cdot 10^5$
Aluminium	$(0,69 + 0,71) \cdot 10^5$
Bois	$(8,83 + 15,1) \cdot 10^3$
Brique	$(2,45 + 2,45) \cdot 10^3$
Béton	$(14,7 + 22,6) \cdot 10^3$
Textolyte	$(5,88 + 9,81) \cdot 10^3$
carton backelise	$(9,8 + 17,7) \cdot 10^3$
Uniplaste	$(0,29 + 0,39) \cdot 10^3$
verre industriel	$(49 + 59) \cdot 10^3$
capron	$(1,37 + 1,96) \cdot 10^3$
caoutchouc	3,0 à 7,8

Modules d'Young pour différents éléments.

8

## Ch IV

# LE COUP DE BELIER PENDANT LA FERMETURE LENTE DE LA VANNE

Dans les conditions réelles, le temps de fermeture de la vanne  $T_f$  n'est jamais égal à zéro  $T_f \neq 0$  c à d, on ne peut pas parler d'une fermeture instantanée. [seulement dans le cas théorique].

En dépendance de la relation entre  $T_f$  et la phase du coup  $\tau_0$  (mi-période), les grandeurs d'augmentation et de diminution de la pression sont différentes.

On distingue le coup de belier direct ( $T_f < \tau_0$ ) et le coup de belier indirect ( $T_f > \tau_0$ ).

### IV:1 : le coup de belier direct ( $T_f < \tau_0$ ).

Supposons pour simplifier, que la fermeture de la vanne suive une loi telle que la vitesse dans la canalisation soit une fonction dans le temps :  $V_t = V(t)$ , la vitesse et la section se changent dans le temps ; La vitesse d'écoulement diminue de  $V_t = V_0$  au début jusqu'à la limite zéro  $V = V_{T_f} = 0$  dans un moment  $T_f$ .

Pendant la fermeture lente de la vanne le changement de la vitesse du courant peut se présenter sous forme des rangs échelonnés de  $\Delta V_t$ , en provoquant des rangs d'augmentations de pression  $\Delta P_t = \rho C \Delta V_t$  avec correspondance de la mécanique que nous avons cités dans le (Ch III).

Si on additionnons ces augmentations de la pression, nous pouvons déterminer en n'importe quel moment  $t$  la perturbation de pression :

$$\Delta P_t = P_t - P_0$$

lorsque le temps de fermeture  $T_f$  est inférieur à  $\tau_0 = \frac{2L}{c}$ , l'augmentation de la pression sera maximum pour un temps  $t = T_f$ .

$$t = T_f \quad (v_t = 0) \quad \Delta P = \rho C v_0$$

Lorsque  $t < T_f$  l'augmentation de la pression sera petit, d'après la formule de Jowkowski :

$$\Delta v = v_0 - v_t \quad \Delta P_t = \rho C (v_0 - v_t)$$

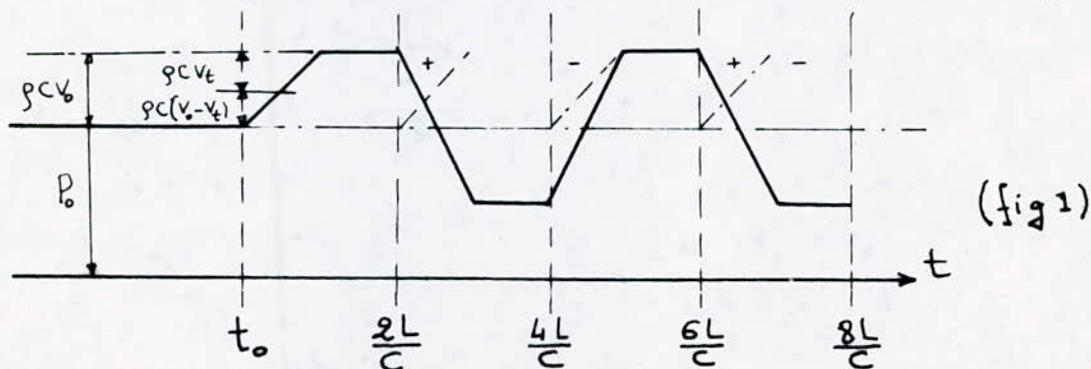
La première onde de surpression née à l'instant  $t_0$  arrivera jusqu'au réservoir après  $\frac{L}{c}$  de temps ; après elle subira une réflexion dans la section d'entrée de la conduite . après un temps  $t = \tau_0 = \frac{2L}{c}$  l'onde reviendra à la section de la vanne , la pression sera donc :

$$t = T_f \quad P_{T_f} = P_0 + \Delta P$$

A cet instant  $\frac{2L}{c}$  une phase de dépression commencera ; une onde de dépression se propage de la vanne vers la section d'entrée de la conduite en provoquant une diminution de pression  $-\Delta P$  dans le temps  $T_f + \frac{2L}{c}$  :

$$P = P_0 - \Delta P$$

A l'instant  $\frac{4L}{c} = T$  (periode) l'onde de depression s'effeint et apparait une onde de surpression .... etc . Ce procé est non amortis , si nous ne tenons pas compte la p.d.c et le frottement (fig1).



Le diagramme est tracé comme les intersections des tracés de  $\pm \Delta P$  dans la conduite.

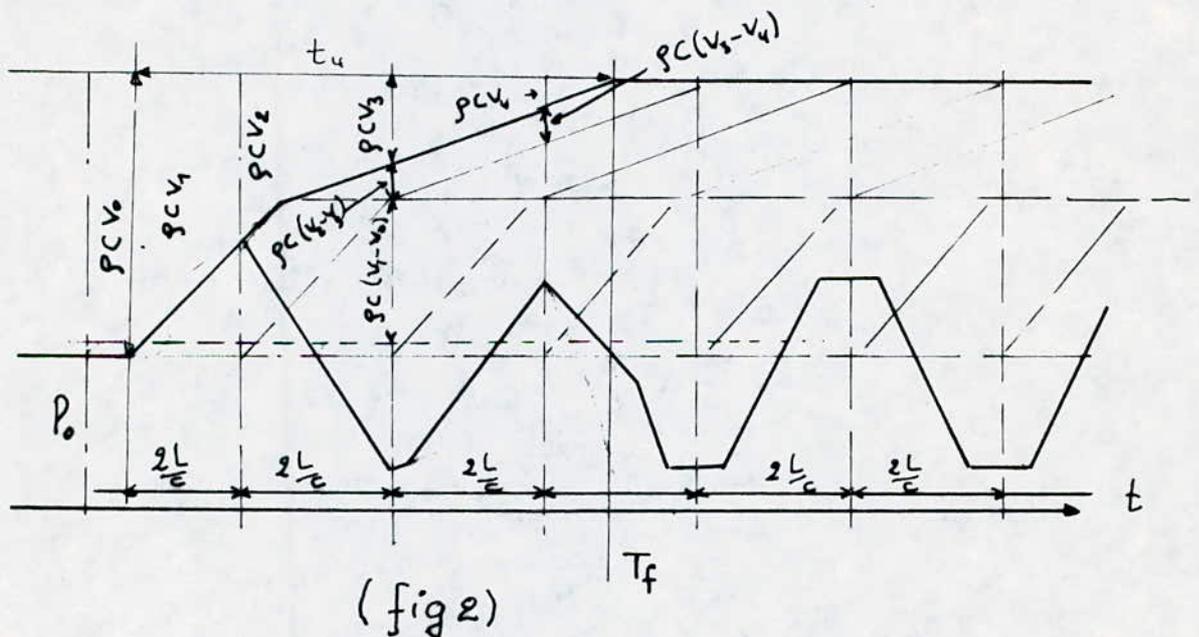
#### IV:2 Coup de belier indirect ( $T_f > \frac{2L}{c}$ ):

le coup de belier dans ce condition est dit complexe. L'onde de surpression fait aller et retour pendant  $t = \tau_0 = \frac{2L}{c}$  et revient à la vanne laquelle n'est pas totalement fermée, donc, l'onde de surpression s'engendre, malgré que:

- L'onde de surpression précédente existe.
- la vanne est partiellement ouverte.
- Une vitesse de déplacement du liquide existe.

Si  $T_f > \frac{4L}{c}$  (periode) l'onde de dépression change de signe, à une onde de surpression laquelle n'est pas complètement amortis.

(fig 2)\*.



(\*). On represente le diagramme pour un temps de fermeture de la vanne  $T_f > \frac{6L}{c}$ . On remarque que la deuxième onde de surpression reviendra à la vanne à l'instant  $\frac{6L}{c}$  quand la vanne n'est pas encore fermée et l'onde précédente n'est pas encore éteinte.

## Ch IV

### LE COUP DE BELIER INDIRECT PENDANT LE CHANGEMENT LINEAIRE DE LA VITESSE

Supposons que la fermeture de la vanne suive une loi telle que le débit  $Q$  dans la canalisation soit une fonction linéaire de la forme:  $Q = Q_0 (1 - t/t_f)$ . Supposons en outre que le coup de belier n'a pas d'incidence sur la loi de variation linéaire de  $Q$ .

par hypothèse.  $Q = Q_0 (1 - t/t_f)$

c.à.d  $V_t = V_0 (1 - t/T_f)$  (\*)

$$V_t - V_0 = -\frac{V_0 t}{T_f} = -g/c \cdot \Delta H$$

alors  $\Delta H = \frac{c}{g} \frac{V_0 t}{T_f}$

Autrement dit la pression croit linéairement avec la fermeture de la vanne et atteint une valeur maximale lorsque  $t$  atteint sa limite maximale, soit:  $t = \frac{2L}{c}$  cette surpression maximale a donc pour valeur:

$$\Delta H = \frac{c}{g} \frac{V_0}{T_f} \frac{2L}{c} = \frac{2V_0 L}{g T_f}$$

où bien

$$\Delta P = 2\rho V_0 \frac{L}{T_f} \quad \text{formule de Michaud}$$

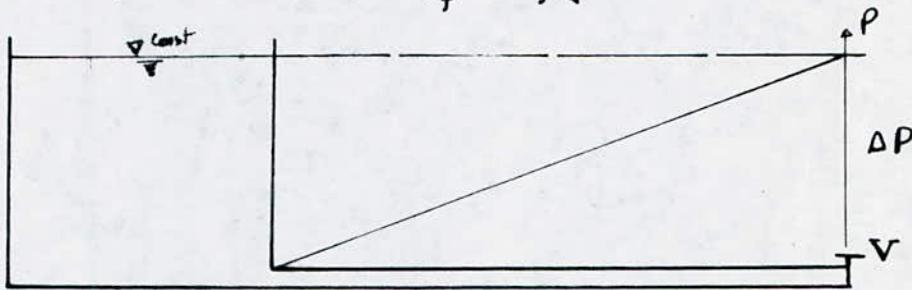
La formule de Michaud est la seule utilisée pratiquement dans

---

(\*) linéaire: c.à.d  $V_t = at + V_0$ , à la limite  $V_t \rightarrow 0$ , nous avons  $0 = at + V_0 \Rightarrow 0 = a T_f + V_0 \Rightarrow a = -\frac{V_0}{T_f}$  et  $V_t = V_0 (1 - t/T_f)$ .

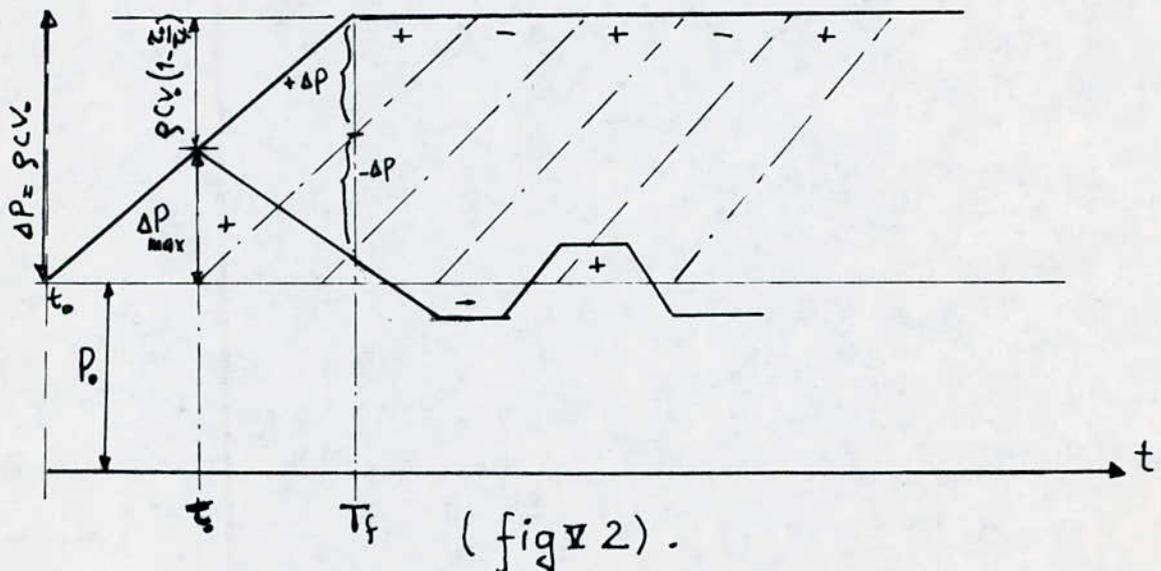
dans le cas d'une fermeture lente, c'ad, en un temps  $T_f < \frac{2L}{c}$ . En fait cette formule n'est valable que pour une loi de fermeture correspondant à une variation linéaire de la vitesse, loi qui, comme nous l'avons souligné, est rarement réalisé en pratique.

M. DE SPARRE a montré que dans le cas d'une fermeture lente correspondant à une loi linéaire, la repartition de la surpression le long de la conduite était linéaire depuis zéro à l'origine jusqu'à sa valeur maximale:  $\Delta P = 2\rho V \cdot \frac{L}{T_f}$ . (fig 21).



Repartition de la surpression le long de la conduite .. fermeture lente. (fig 21)

On prend un exemple pour  $T_f = \frac{4L}{c}$ ; (fig 22).



## Ch VI

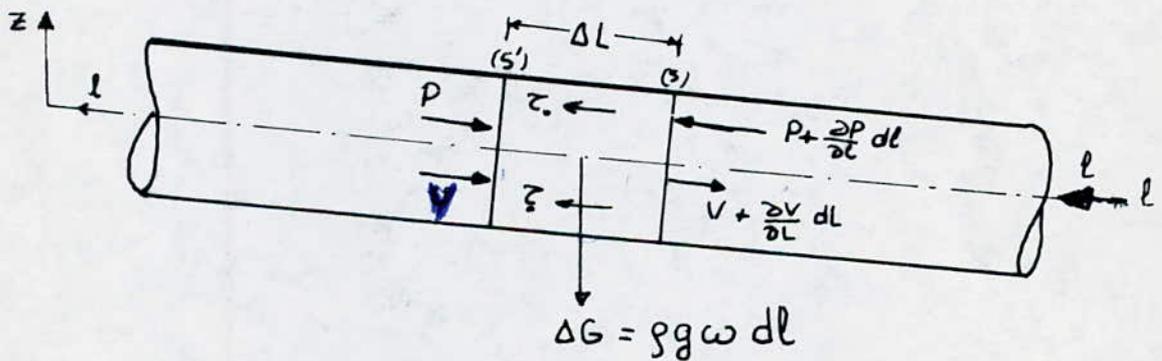
### LE MOUVEMENT NON STATIONNAIRE DE LIQUIDE VISQUEUX ET COMPRESSIBLE DANS UNE CONDUITE.

Deux équations qui vont définir le phénomène ont été établies en 1901 par Allievi. Elles seront obtenues en appliquant à une tranche de conduite :

- le théorème des quantités de mouvement.
- l'équation de continuité en faisant intervenir la compressibilité du liquide et l'élasticité des parois de la conduite.

#### VI.1: Théorème des quantités de mouvement :

Considérons, un mouvement sous charge dans une conduite rectiligne de section circulaire.



Prenons un élément  $\Delta l$ , appliquant l'équation du mouvement de cet élément :

$$\Delta M \frac{dV}{dt} = \Delta p + \Delta G + \Delta T \quad (1)$$

Projetons les forces massiques et superficielles sur la direction du mouvement ;

les forces superficielles sont :

les forces de la pression hydrodynamiques et les forces tangentiels qui agissent sur la surface latérale :

$$- \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial z} dl - \tau dl \times \quad (2)$$

tenant compte que que  $\chi = \frac{\omega}{R}$ , alors.

$$- \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial l} dl - \frac{\tau_0}{R} \omega dl.$$

supposons que  $\tau_0/R = \rho g \gamma$  (hypothèse des forces quasistationnaires).

La projection des forces superficielles sera :

$$- \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial l} dl - \rho g \omega \gamma dl \quad (3)$$

La projection de force de la pesanteur, d'élément considéré, sera :

$$\rho g \omega dl \sin \theta = - \rho g \omega dl \frac{\partial z}{\partial l} \quad (4)$$

La projection de force d'inertie sera :

$$- \rho \omega dl \frac{dv}{dt} = - \rho \omega dl \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial l} \right) \quad (5)$$

Une combinaison entre les équations (3, 4, 5) nous aurons :

$$\frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial l} + \frac{\partial z}{\partial l} + \gamma + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left( \frac{v^2}{2g} \right) = 0 \quad (6)$$

Supposons que  $\rho$  change de valeur, pendant le changement de la pression. L'équation (6) devient :

$$\frac{\partial}{\partial l} \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \right) = - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - \gamma \quad (7)$$

ou bien

$$\frac{\partial}{\partial l} \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \right) + \gamma = - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (8)$$

Si on ne tenons pas compte de perte de charge ( $\gamma=0$ ), nous avons

$$z + P/\rho g + v^2/2g = H \quad \text{alors :}$$

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} ; \text{ or : } \boxed{\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial l}} \quad (9)$$

(9) La première équation du mouvement.

VI:2: l'équation de continuité : Compte tenu de la compressibilité du liquide et l'élasticité de la conduite.

- A travers la section aval (S) la vitesse est  $v$ .

- A travers la section amont (S') la vitesse est :  $v + \frac{\partial v}{\partial l} dl$ .

Pendant le temps  $dt$ , il entre dans l'élément un volume :

$$+ \omega \left( v + \frac{\partial v}{\partial l} dl \right) dt$$

Pendant le même temps  $dt$  il sort par l'élément un volume :  $\omega v dt$  ;

La quantité d'eau emmagasinée est donc :

$$dW = - \omega \frac{\partial v}{\partial l} dl dt \quad (10)$$

Cette accroissement du volume est due à la compressibilité du liquide et à la dilatation de la conduite :

### a) Compressibilité de l'eau :

La variation de pression  $dP$  entraîne une variation du volume ( $dW$ ) de la masse d'eau de la conduite, telle que :

$$dP = - E_L \frac{dW}{W} \quad (\text{Hooke})$$

$E_L$  : compressibilité volumique de l'eau.

ou  $dW = - W \frac{dP}{E_L}$  ; mais  $P = \rho g H = \bar{w} H$ .

$P$  varie avec  $l$  et  $t$  mais les variations de  $P$  avec  $l$  sont négligeables par rapport aux variations avec  $t$  ; donc :

$$dP = \rho g \frac{\partial H}{\partial t} dt$$

et  $W = \omega dl$  donc

$$dW = - \frac{1}{E_L} \omega dl \rho g \frac{\partial H}{\partial t} dt \quad (11)$$

Cette diminution du volume  $dW$  correspond au volume supplémentaire d'eau qui a remplis l'espace correspondant et qui s'est donc introduit dans la tranche considérée du fait de la compressibilité du liquide.

Soit  $dw_1$  ce volume supplémentaire, il est égale et opposé à  $dw$ .

$$dw_1 = \frac{1}{E_L} \omega \rho g dl \frac{\partial H}{\partial t} dt \quad (12)$$

b) Dilatation de la conduite : Sous l'action de la pression  $P$  la matière de la canalisation est soumise à une contrainte :

$$\sigma = \frac{P \cdot D}{2e} \quad (13)$$

La variation de la pression  $\Delta P$  entraîne, évidemment une variation  $d\sigma$  de la contrainte et on a :

$$d\sigma = \frac{D}{2e} dp.$$

Cette augmentation  $d\sigma$  entraîne un accroissement de diamètre  $dD$  (déform.)

donné :  $d\sigma = E \frac{dD}{D}$  (Hooke).

Avec  $E$  : Module d'Young de la paroi de la conduite .

Des relations précédentes on déduit :

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\sigma}{E} = \frac{D \cdot dp}{2Ee}$$

L'accroissement de diamètre  $dD$  entraîne un accroissement de la section

$dw$  tel que :  $\frac{dw}{w} = 2 \frac{dD}{D}$  ;  $dw = 2w \frac{dD}{D} = \frac{wD dp}{E \cdot e}$

la tranche considérée emmagasine, de ce fait, un volume d'eau supplémentaire :

$$dw_2 = dw \cdot dl$$

$$dw_2 = \frac{\omega \cdot D \cdot dp}{E \cdot e} dl$$

$$dw_2 = \frac{\omega D}{E \cdot e} dl \rho g \frac{\partial H}{\partial t} dt \quad (13)$$

en négligeant comme précédemment les variations de  $P$  en fonction de  $l$  par rapport à ses variations en fonction de  $t$ .

enfin  $dw = dw_1 + dw_2$ .

$$-\omega \frac{\partial v}{\partial l} dl dt = \frac{1}{E_L} \omega dl \rho g \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\omega D}{E \cdot e} \rho g dl \frac{\partial H}{\partial t} dt .$$

ou en simplifiant par  $\omega dl dt$  :

$$-\frac{\partial v}{\partial l} = \rho g \left( \frac{1}{E_L} + \frac{D}{E \cdot e} \right) \frac{\partial H}{\partial t} .$$

posons :

$$\frac{1}{C^2} = \frac{\rho g}{g} \left( \frac{1}{E_L} + \frac{D}{E \cdot e} \right) = C^2 = \frac{1}{\rho \left( \frac{1}{E_L} + \frac{D}{E \cdot e} \right)}$$

On vérifie facilement que  $C$  a les dimensions d'une vitesse, c'est la célérité des ondes de choc (Ch III).

L'équation de continuité s'écrit donc .

$$-\frac{\partial v}{\partial l} = \frac{g}{C^2} \frac{\partial H}{\partial t} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{C^2}{g} \frac{\partial v}{\partial l}} \quad (14)$$

Les équations (9) et (14) sont les équations différentielles du mouvement non stationnaire du liquide réel et compressible dans une conduite élastique.

On ramène ce système à deux équations indépendantes du deuxième ordre en dérivant la première par  $l$  et la deuxième par  $t$  et en éliminant :  $-\frac{\partial^2 v}{\partial l \partial t}$ , ou  $-\frac{\partial^2 H}{\partial l \partial t}$  ce qui conduit au système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 H}{\partial l^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 H}{\partial l^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 v}{\partial l^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 v}{\partial l^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{array} \right\} \quad (15)$$

$v$  et  $H$  sont donc liés aux variables  $l$  et  $t$  par une même équation différentielle qui est l'équation classique des cordes vibrantes ou équation de d'Alembert.

La méthode d'intégration consiste à poser :  $\left\{ \begin{array}{l} z = t - \frac{l}{C} \\ w = t + \frac{l}{C} \end{array} \right\}$  ce qui permet

d'obtenir:  $H = F\left(t - \frac{l}{c}\right) + f\left(t + \frac{l}{c}\right) + c^2 t e$ .

La constante s'obtient en considérant la pression  $H_0$ , avant la manœuvre de la vanne c'èd à  $t=0$ . donc :

$$H - H_0 = F\left(t - \frac{l}{c}\right) + f\left(t + \frac{l}{c}\right) \quad (16)$$

De même analogue on obtiendrait :

$$V - V_0 = -g/c \left[ F\left(t - \frac{l}{c}\right) - f\left(t + \frac{l}{c}\right) \right] \quad (17)$$

$V_0$  représente la vitesse dans la canalisation en régime permanent et avant la manœuvre de la vanne.

Les équations (16) et (17) représentent les solutions du systèmes deux équations du mouvement. Ce sont les équations d'Allievi.

$F$ : onde se propage à la direction de l'axe avec la célérité  $C$ .

$f$ : onde se propage en sens inverse du sens de l'axe avec la célérité  $C$ .

Par exemple: le cas d'une fermeture brusque de la vanne, en utilisant les équations (16) et (17) pour déterminer la pression de choc, pendant  $t < \frac{l}{c}$  quand l'onde du choc n'est pas encore arrivée au réservoir alors l'onde de réflexion n'existe pas:  $f\left(t + \frac{l}{c}\right) = 0$ ; dans la section de la vanne  $l=0$ , après la fermeture  $v=0$  donc :

$$-V_0 = -g/c \cdot F(t)$$

mais  $F(t) = H - H_0 = \Delta H$  alors  $\Delta H = \frac{c V_0}{g}$  ou bien :

$$\underline{\underline{\Delta P = \rho C V_0}} \text{ formule de "Jowkowski"}$$

8

## PROTECTION CONTRE LE COUP DE BELIER

Toutes les considerations précédentes des perturbations montrent qu'il est impératif de prendre des précautions afin de diminuer les conséquences néfastes du coup de belier, Pour cela il est nécessaire de prévoir des procédés "Anti-belier", et dans d'autres cas il faut prendre des précautions dans l'exploitations des systemes Hydrauliques.

### VII:1: Précautions à prendre dans les constructions et L'exploitations des systemes hydrauliques :

1

1): Pour faire un changement de direction en plan, le rayon de courbure doit être 10 à 12 fois plus grand que le diamètre de la conduite

$$R = (10 \div 12) D$$

2): Dans les points hauts de contre-pentes (points de distorsion) le rayon est donné par :

$$R = (3 \div 6) D$$

3): L'épaisseur nominale de la conduite est donnée par la formule suivante :

$$e = \frac{K_m \cdot P \cdot D}{2(K_1 + K_m P)}$$

$K_m$ : coefficient de majoration de pression de service  $K_m = 1,2$ .

$K_1$ : resistance de la conduite à la traction [ $P_0$ ].

$$K_1 = \frac{R_s \cdot K_y}{K_s \cdot K_H}$$

$K_y$ : coefficient de minimisation (condition de travail).

$K_s$ : coefficient de sécurité de matériaux (1,47 pour l'acier).

$K_H$ : coefficient de surête, donné :

- Pour les conduites de diamètre inférieur à 500 mm et pour une pression nominale inférieure à 5,5 MPa  $K_H = 1$ .
- Pour les conduites de diamètre supérieur à 500 mm et pour une pression nominale supérieure à 5,5 MPa  $K_H = 1,05$ .

$R_m = \sigma$ : Résistance minimale à la traction des matériaux :

(Acier CT3  $R_m = 380$  MPa et pour CT20  $R_m = 420$  MPa)

4) Pour le transport du mélange solide dont le diamètre des corps solides dépasse 3 mm ( $d_{cp} > 3$  mm) il faut placer après la pompe une vanne à fermeture horizontale (vanne à papillon), et encore, il est recommandé de placer après la pompe une vanne supplémentaire à fermeture rapide et automatique et doit être placée entre la pompe et la contre-vanne dans le cas de l'eau seule.

5) Pour l'exploitation normale des conduites, il faut utiliser "obligatoirement" une soupape de surête de l'air qui doit :

a) laisser entrer une grande quantité d'air pendant l'évacuation de la conduite.

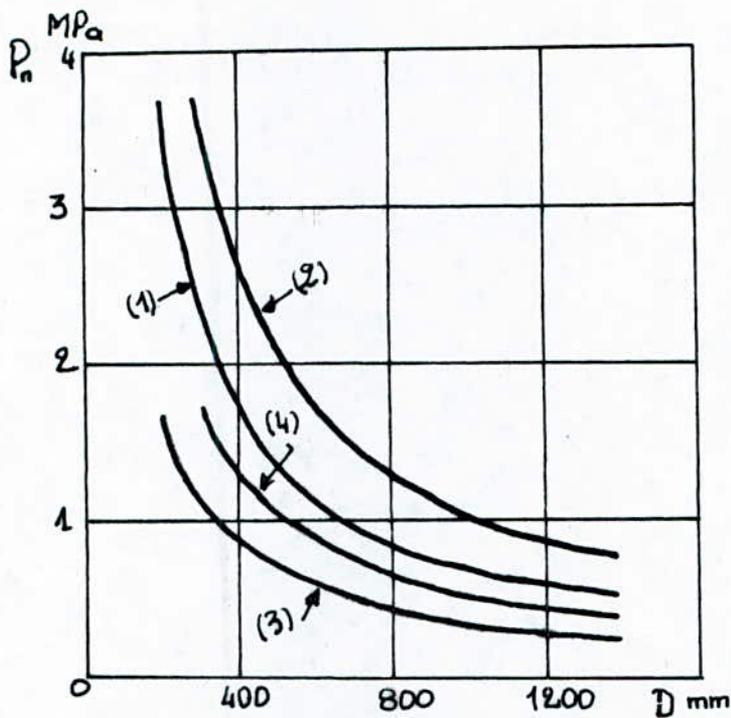
b) laisser sortir une grande quantité d'air pendant le remplissage de la conduite.

c) laisser sortir une petite quantité d'air pendant un mouvement en régime permanent.

6) il est interdit de placer un accessoire ou un dispositif anti-belier sous l'eau.

7) Pour les systèmes de transport le facteur principal c'est l'érosion, en tenant compte de ce facteur il faut que l'épaisseur de la conduite, en dépendance de la pression et du diamètre, soit de 2 à 3 mm.

Pour le calcul de défense contre le coup de belier, la pression supportable par la conduite peut être prise des graphes suivants (fig VII 1).



(fig VII.1) Courbes diamètre - pression pour épaisseur 2 à 3 mm.

sur le schéma :

(1) : Charge statique, épaisseur de paroi  $e = 2$  mm.

(2) : charge statique, épaisseur de paroi  $e = 3$  mm.

(3) : charge dynamique, épaisseur de paroi  $e = 2$  mm.

(4) : charge dynamique, épaisseur de paroi  $e = 3$  mm.

## VII:2 : Cas de serie des pompes :

lorsqu'il s'agit d'un très long chemin, il est mieux de transporter l'eau par

une serie de pompes, bien qu'elles soient recommandées par un système d'optimisation qui donne possibilité de faire le démarrage et l'arrêt des pompes successivement et garanti l'élimination du coup de belier; s'il n'existe pas, il est obligé de participer aux lois suivantes:

### VII:2.1: Démarrage d'une serie des pompes:

a) il faut exécuter le démarrage de la série successivement et à partir de la première pompe qui aspire directement de la source. La succession de démarrage se fait comme suite:

- attendre que la pulsation de la pression, provoquée par le démarrage de la première pompe s'éteint,

- faire démarrer la pompe qui suit directement.

b) Il faut que le temps entre deux démarrages des deux pompes successives doit être égal ou plus d'une demi-période d'une oscillation.

$$t > \tau_0 = \frac{2L}{c} .$$

c) Dans les systèmes qui travaillent avec un mélange des corps solides, il faut faire le démarrage avec de l'eau pure<sup>(1)</sup> durant un temps donné par  $t_s \geq \frac{L}{v_0}$ .

d) lorsqu'on a une vanne après chaque pompe, il faut faire le démarrage de chaque pompe à sa vanne fermée et n'oubliez pas d'ouvrir cette vanne avant de démarrer la pompe qui suit.

---

(1) l'eau pure est utilisée pour stériliser la conduite

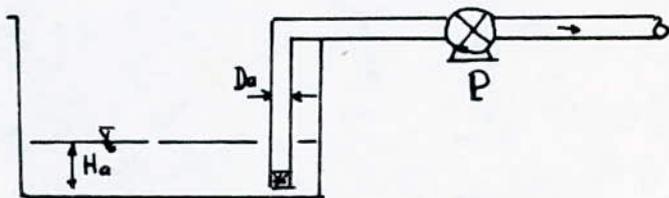
## VII:2.2: Arrêt d'une serie des pompes :

- il faut exécuter l'arrêt de la serie des pompes d'une manière contraire que le démarrage.
- Pour le cas de deux pompes en serie il faut attendre que la première s'arrête complètement pour arrêter la deuxième.
- Dans le cas d'un écoulement biphasique, si les transports solides ont des diamètres supérieurs à 3mm, il n'est pas convenable que le liquide fait un retour à travers la pompe, car celle-ci va se remplir par des dépôts solides.
- s'il y a une discontinuité du courant dans la conduite [entre deux pompes] il faut "obligatoirement" arrêter le système d'après la condition a), et refaire le démarrage, autrement, après examination des causes.

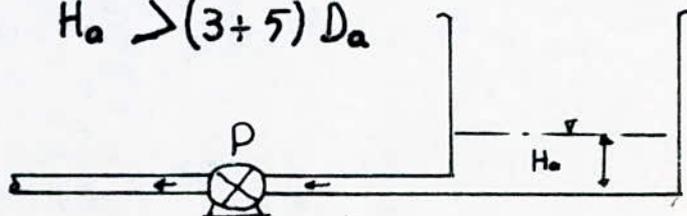
## VII.2.3: Conditions d'aspiration des pompes :

- Pour diminuer la possibilité d'introduction d'air dans l'aspiration, il faut remplir la condition suivante :

$$H_a > (3 \div 5) D_a$$



- Si la conduite travaille en surcharge il faut que la surcharge minimale satisfaite la condition  $H_a > (3 \div 5) D_a$



3) Eviter de vider totalement le réservoir d'aspiration, la discontinuité du courant peut engendrer des chocs ; c-à-d que la bache d'aspiration doit être déterminée de façon que la pompe reste toujours amorcée.

4) Pour qu'un système de pompes en série travaille normalement, il faut assurer à l'entrée de chaque pompe une pression effective de 0,2 à 0,3 MPa.

### VII.3: Dispositifs anti-belier :

Ces dispositifs représentent les moyens les plus efficaces de protections des installations ; mais on veut signaler ici qu'il n'est pas possible d'éliminer les coups de belier totalement mais il convient de les limiter à une valeur compatible avec la résistance de la tuyauterie.

Les appareils Anti-belier ont pour but :

\* Limiter la dépression et la surpression, les appareils sont les suivants :

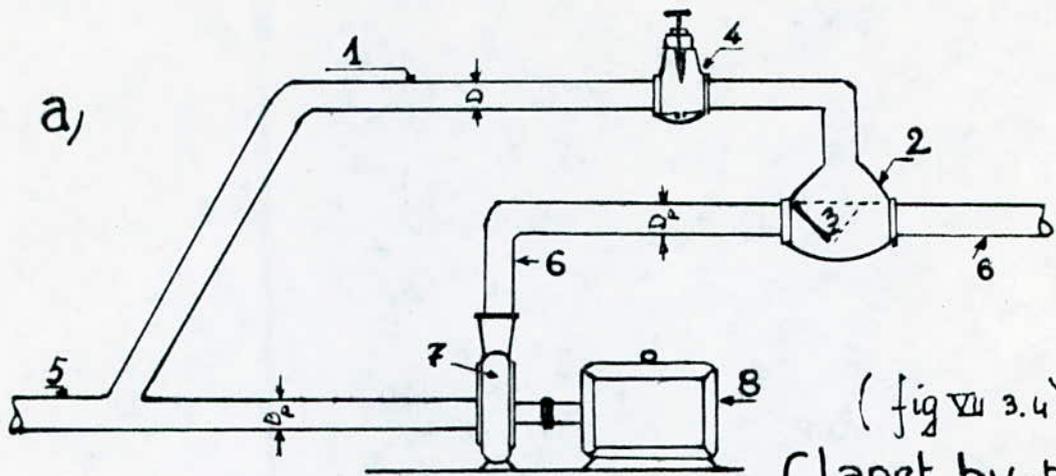
- Volant d'inertie, celui-ci intervient dans la protection contre les surpressions.
- Soupape de décharge, celle-ci intervient dans la protection contre les surpressions.
- Réservoirs d'air et cheminées d'équilibre, qui interviennent à la fois pour la protection des dépressions et surpressions

VII.3.1 Volant d'inertie : lié à l'arbre de la pompe, il permet l'alimentation de la veine liquide malgré l'arrêt de la pompe, donc il prolonge le temps d'arrêt ce qui permet une réduction de la dépression.

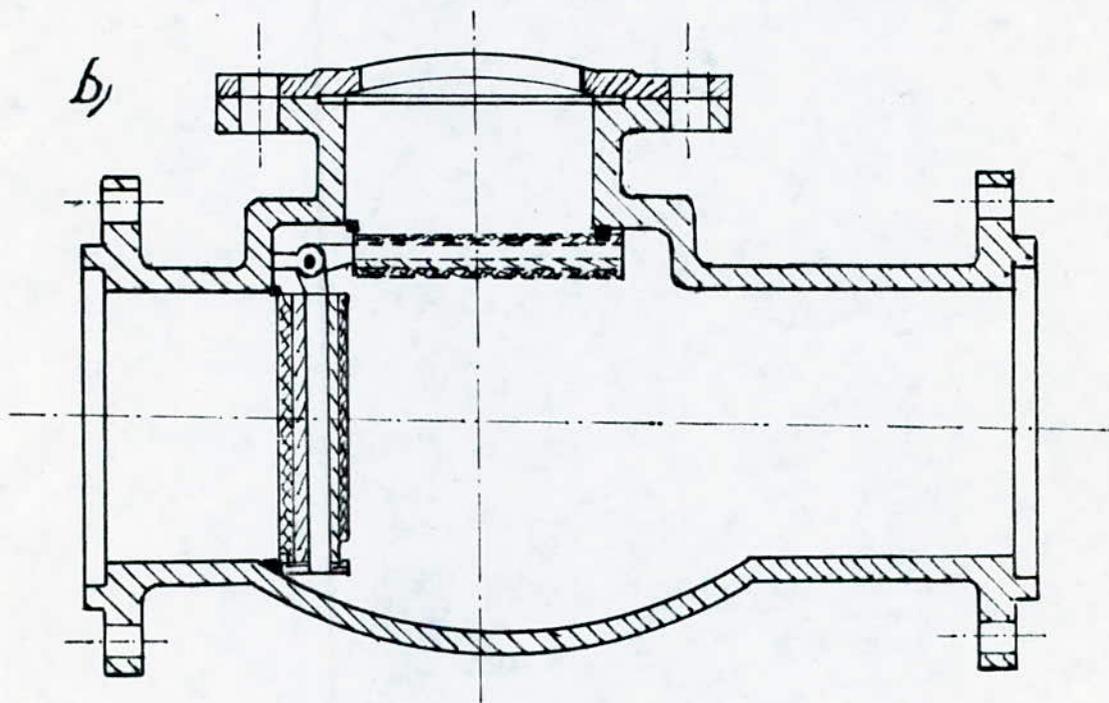
Son application se limite à des conduites courtes et des hauteurs de refoulement moins élevées, car pour des longueurs et hauteurs élevées, le poids du volant augmente ce qui n'est pas économique.

**V.3.2 : Soupape de décharge :** les appareils font intervenir un organe mécanique, un ressort à Boudin ordinaire qui, par sa compression en exploitation normale, obture un orifice placé dans la conduite au point à protéger, par conséquent si la surpression à craindre est maximale et libère le cas échéant. C'est un organe qui s'ouvre dès que la pression dépasse une valeur déterminée, largement supérieure de la valeur maximale de pression en fonctionnement normale (5% environ). L'ouverture doit pouvoir s'effectuer très rapidement pour que l'opération soit efficace. même si la soupape est économique, elle nécessite un entretien suivi et une surveillance attentive en vue de la parfaite adaptation au cas de protection envisagée, il est très important que l'étude de la fabrication de ces appareils soient confiés à des spécialistes éprouvés.

**V.3.3: Clapet de retenue :** Apelé aussi "contre-vanne" ; C'est un dispositif très efficace, il est destiné à assurer le passage du liquide dans un sens et à l'arrêter dans le sens opposé. il est constitué soit par un battant unique (fig V.3.3) soit, quand des fortes pressions sont en jeu, par des battants multiples disposés sur une même plaque inclinée, le tout trouvant place dans un corps en fonte. La contre vanne trouve son utilisation à la station de pompage où il doit "obligatoirement" équiper la canalisation de refoulement à la



Clapet by-pass



(fig VII 3.3) Clapet de retenue

Nomenclature

- |                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| 1 - conduite de dérivation . | 5. Conduite d'aspiration .   |
| 2 - clapet de retenue .      | 6. conduite de refoulement . |
| 3. battant .                 | 7. pompe .                   |
| 4 - vanne .                  | 8. moteur électrique .       |

sortie de la pompe. Ce dispositif donne de très bons résultats dans les systèmes de plusieurs étages.

**VII.3.4: Clapet by-pass :** Un by-pass est placé entre l'aspiration et le refoulement de la pompe. Il est muni d'un clapet de retenue fermé lorsque la pompe fonctionne normalement.

Au moment d'un arrêt de la pompe, la dépression dans la conduite provoque l'ouverture du clapet et se trouve ainsi limitée à la pression existant à l'aspiration (fig VII.3.4).

Le dispositif est avant tout limiteur de dépression, mais du même coup il limite la surpression à une valeur égale ou plus de la différence entre les pressions absolues au refoulement et à l'aspiration.

### **VII.3.5: Soupape de sécurité :**

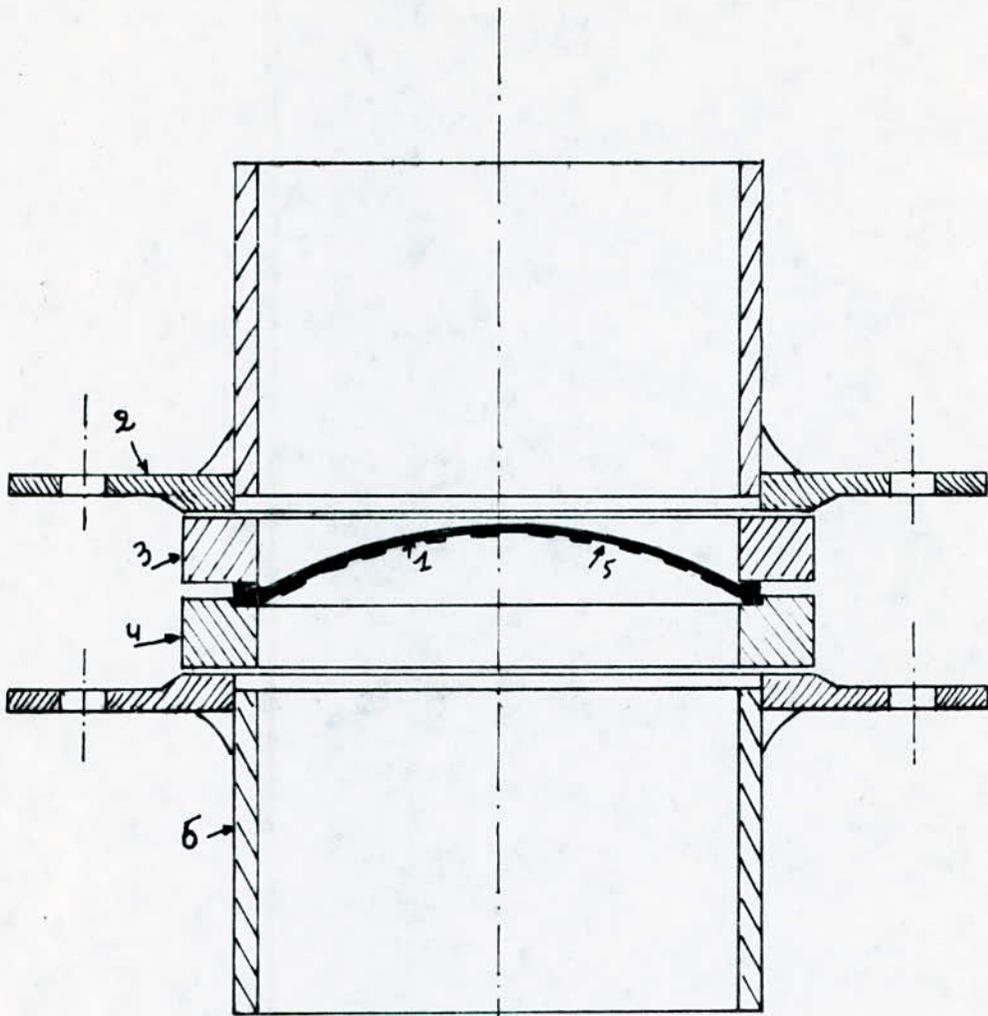
Il existe dans le commerce quelques types de soupapes de sécurité anti-belier. Leur emploi présente toujours les inconvénients inhérents aux systèmes mécaniques; elles peuvent cependant donner des résultats satisfaisants dans certains cas.

Parmi ces soupapes, on distingue :

- soupape de contrôle (d'échappement),
- soupape à membrane déformable.

**α) Soupape de contrôle :** est une soupape qui s'ouvre quand la pression dépasse une certaine limite, et se referme lorsque la pression initiale se rétablit.

**β) Soupape à membrane déformable :** Est constituée par une membrane en plastique montée sur une capacité sous pression, placée



(fig VII . 35.1)

### Soupape à membrane déformable :

- 1: membrane de rupture ;
- 2: brides ;
- 3: anneau supérieur ;
- 4: anneau inférieur ;
- 5: appuis rigide avec ouverture .
- 6: branchement à la conduite de reflux .

dans le point à protéger, cette membrane subira un déchirement quand la pression dépasse certaine limite, en permettant à l'eau de sortir de la conduite; ce soupape doit être équipé d'une vanne qui permet l'arrêt de l'eau après le coup de belier (fig. 3.5.1)

Sans la membrane en plastique, la pièce joue le rôle d'un ajutage sortant; le diamètre de ce dernier égale au diamètre nécessaire de la membrane  $D_M$  qui est donné par la formule suivante

$$D_M = D \sqrt{\frac{V_0 - g/c (H_M - H_0)}{\mu \sqrt{2g H_M}}}$$

avec:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum f_m}} : \text{coefficient de debit.}$$

$\sum f_m$ : la somme des coefficients des P.d.c dans l'ajutage.

$H_M$ : Pression maximale (en H d'eau) supportable par la conduite.

$H_0$ : Pression de service en régime permanent (en hauteur d'eau).

L'épaisseur de la membrane  $e_m$  est déterminé en fonction des caractéristiques du matériau en question, et peut être déterminé par la formule suivante:

$$e_m = \frac{P \cdot D_M}{8 E_r k_t} \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{100}}{1 + \frac{\Delta}{100} - 1}}$$

$e_m$ : épaisseur de la membrane.

$P$ : Pression maximale admissible dans la conduite .

$\sigma_T$ : Resistance maximale à la traction de la membrane.

$k_t$ : coefficient de la temperature ; il est donné égale à 1 ( $k_t = 1$ ) entre  $-20$  et  $+30^\circ\text{C}$ .

$\Delta$ : Allongement relatif [en %].

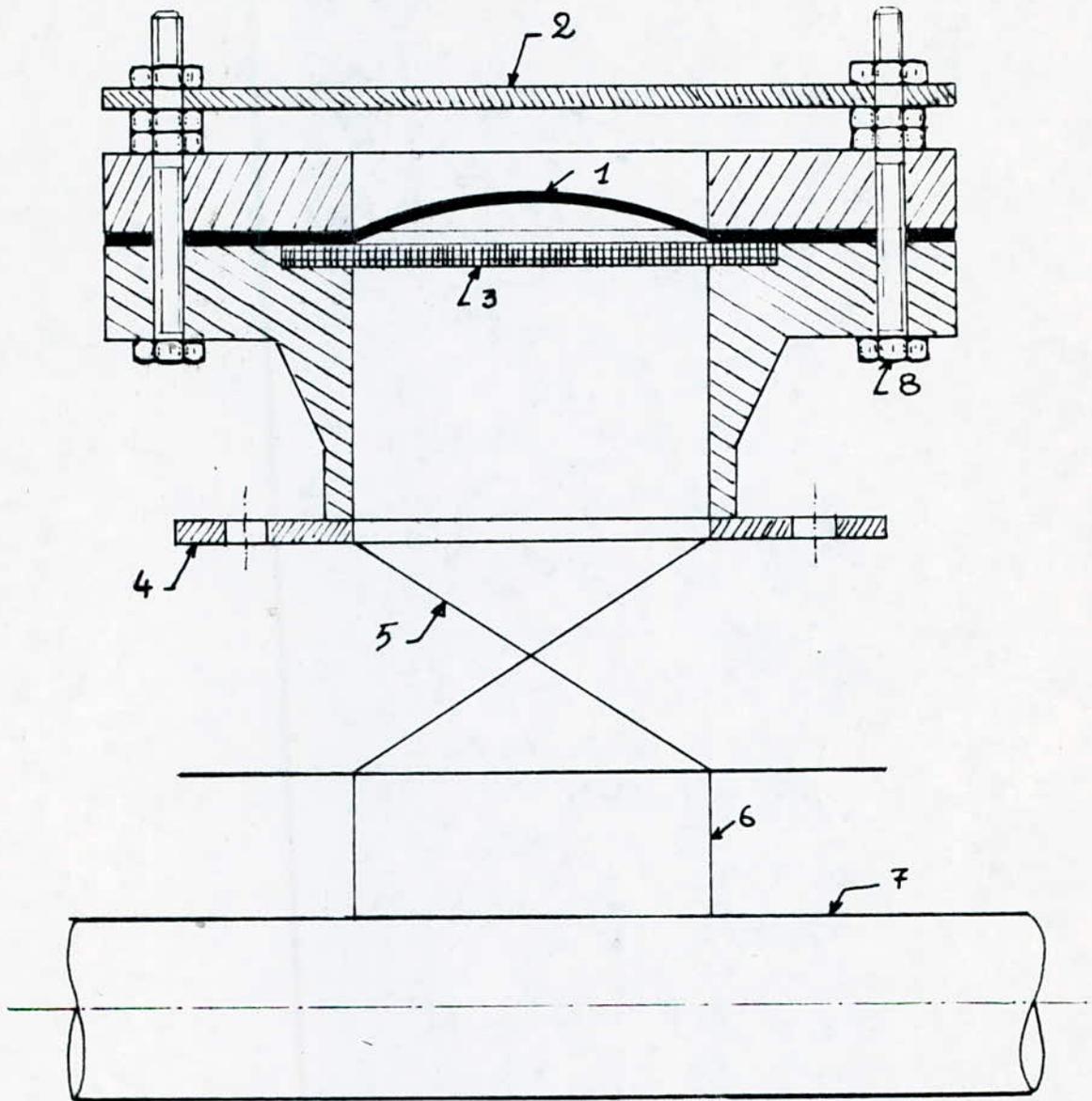
$$\Delta \approx 10 \text{ à } 12\% .$$

le tableau (7.1) ; nous donne les resistances limites à la traction pour quelques materioux :

tableau(7.1)

Materiaux	Norme standart (Russe)	resistance limite à la traction MPa
Aciers resistant aux acides	5632 - 61	550
cui vre	859 - 66	320
Titane	461 - 60	1100
Aluminium	1019 - 47	400
Nickel	849 - 56	500
Alliage	492 - 52	450

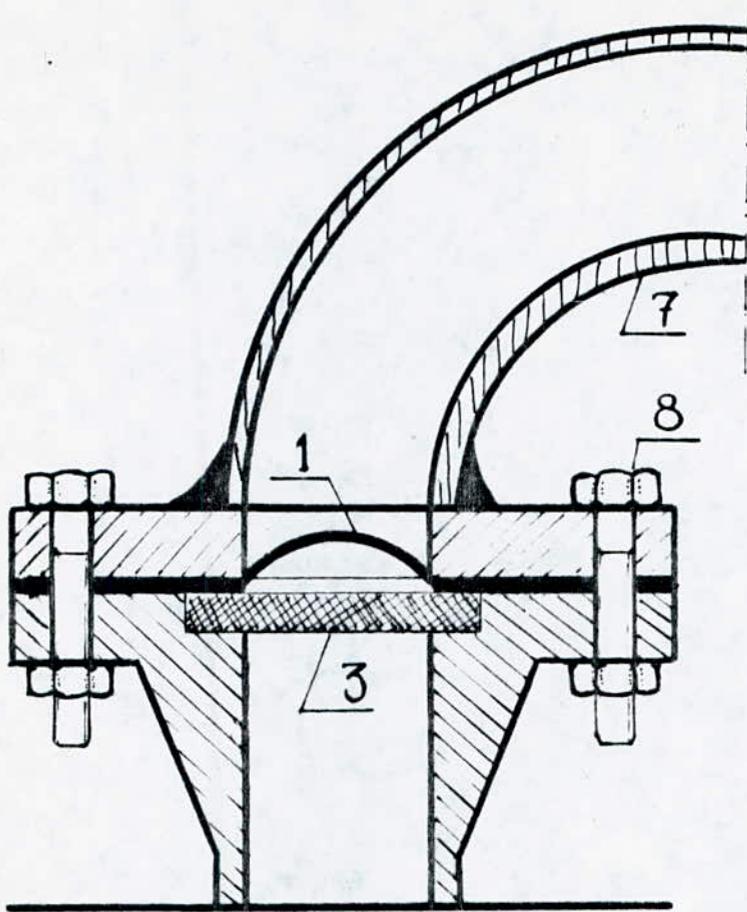
Si la soupape est placée sur la voie publique (ou dans une entreprise industrielle) avec circulation des vehicules ,il est impératif de protéger la membrane par une plaque métallique placée au dessus de la soupape (fig 3.5.2). dans les autres endroit (pas de circulation des vehicules), il suffit de protéger la membrane par un film en polymère ou en caoutchouc, et munir la soupape d'un tuyau d'évacuation d'eau (fig 3.5.3).



(fig VII 3.5.2)

Montage de membrane de rupture : à placer sur la voie publique [ou dans une entreprise industrielle].

- |                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 1: membrane ;                       | 5: Vanne;               |
| 2: plaque métallique ;              | 6: tuyau ;              |
| 3: film de protection en polymère ; | 7: canalisation ;       |
| 4: bride ;                          | 8: boulon d'assemblage. |



(fig VII 3.5.3)

### Montage de membrane de rupture

[montage à placer dans des endroits ; où il n'y a pas de circulation des véhicules ].

- 1 : membrane ;
- 3 : film de protection en polymère ;
- 7 : évacuateur ,
- 8 : boulon d'assemblage .

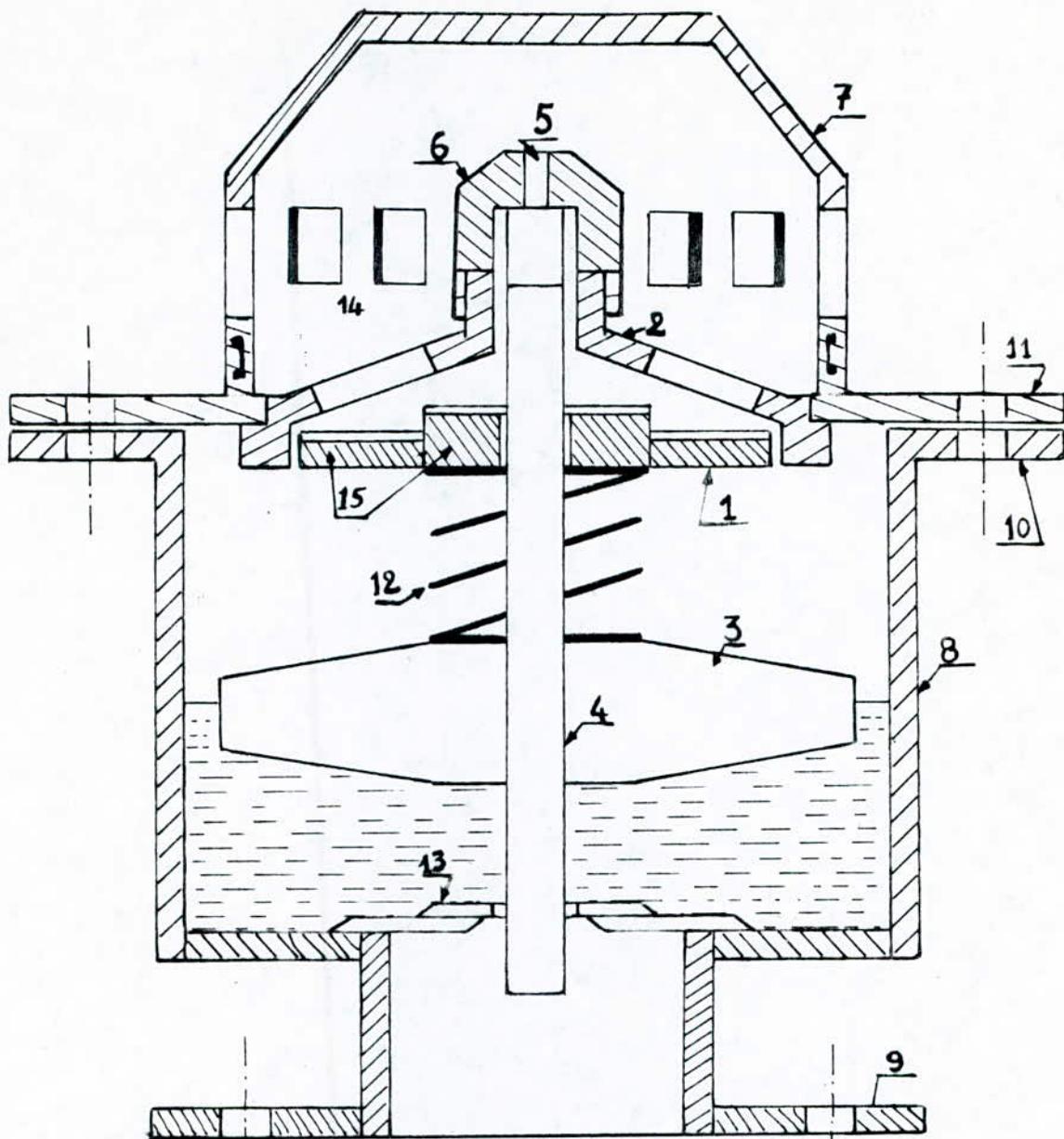
III 3.6: **Les ventouses:** le rôle d'une ventouse est tout d'abord d'évacuer l'air contenu dans les conduites, le cas se présente lorsque la conduite étant vide, on procède à son remplissage, l'eau prend petit à petit la place de l'air qui se trouve chassé. Quand la conduite est en service, il est nécessaire également de pouvoir évacuer l'air absorbé par l'eau où il se trouvait dissous. Cet air s'accumule aux points hauts des canalisations, s'il ne peut s'échapper, il peut contrarier graduellement l'écoulement et entraîne parfois des ruptures.

Les ventouses seront donc, prévues aux points hauts définis, soit par rapport à un plan horizontal, soit par rapport à la ligne piézométrique, il est souhaitable d'empêcher aussi aux changements de pente aussi qu'en cours de tracé de longue partie de conduite ascendante ou descendante. Ces appareils doivent permettre en outre l'admission de l'air dans la conduite lorsque l'on procède à sa vidange.

Il existe des différents modèles, mais; en principe elles sont constituées par un flotteur logé dans un corps en fonte, en position normale, le flotteur obture un orifice placé à la partie supérieure de l'appareil; quand il y a accumulation d'air [vapeur au sein de liquide], le flotteur descend et libère l'orifice par lequel l'air peut s'échapper de la conduite. On distingue :

#### 1) Ventouses à flotteur (fig III 3.61) :

Ces ventouses sont utilisées dans le cas où l'eau est seule, et dans le cas d'un mélange biphasique lorsque le diamètre des corps solides ne dépasse pas 1,5 mm ( $d_{ps} < 1,5 \text{ mm}$ ).



( fig VII. 3.6.1 )

Ventouse à flotteur (I.M.A.G URSS)

- |                         |                         |                  |
|-------------------------|-------------------------|------------------|
| 1 : soupape .           | 6 : Chemise ;           | 13 : disquette . |
| 2 : siège .             | 7 : couvercle ;         | 14 : ouverture ; |
| 3 : flotteur            | 8 : Carcasse ;          | 15 : joints .    |
| 4 : tige mobile .       | 9. 10. 11 brides        |                  |
| 5 : trou d'entrée d'air | 12 : ressort à boudin , |                  |

\* Le diamètre de l'orifice<sup>(5)</sup> d'admission d'air, dans la ventouse indiquée par la figure (Fig. 3.6.1) [ventouse à flotteur de l'Institut mécanique de l'Académie de GEORGIA URSS], est donné par la formule suivante :

$$D_* = \sqrt{\frac{g(G_F - G_L)}{250 \pi \rho}}$$

$G_F$  : masse du flotteur en g.

$G_L$  : masse du liquide qui sort :

$$G_L = \frac{1000}{3} \pi h_F^2 (3R_F - h_F) \rho_m$$

$h_F$  : profondeur d'immersion du flotteur dans l'eau.

$R_F$  : Rayon du flotteur.

$\rho_m$  : densité du mélange liquide - solide.

Ce diamètre sera compris entre 5 et 10 mm.

\* Le diamètre de sortie de l'eau, au fond du corps, sera déterminé par la condition de continuité :

$$D_e = \sqrt{\frac{4 V_0 \omega_F}{\pi V_a}}$$

$V_0$  : vitesse du liquide, en mouvement permanent.

$V_a$  : vitesse du mouvement d'air à travers l'ouverture de ventouse.

Cette vitesse, est comprise entre 40 et 50 [m/s] pendant le remplissage de la conduite, tandis que, durant la vidange elle est comprise entre 10 et 15 [m/s].

La vitesse du remplissage dépend des caractéristiques de pompe utilisée, et peut être prise égale à la vitesse en régime permanent d'écoulement du liquide, par contre, la vitesse de vidange du liquide dépend du profil de canalisation, et peut être calculée d'après la formule suivante :

$$V_v = \left(\frac{d_o}{D}\right)^2 \sqrt{\frac{2gH}{1 + \frac{\lambda L_o}{d_o} + \xi}}$$

$d_o$ : diamètre de sortie de la ventouse ; [m] ;

$L_o$ : longueur de la sortie. [m].

$\lambda_o$ : Coefficient de perte de charge, sur la longueur de sortie ;

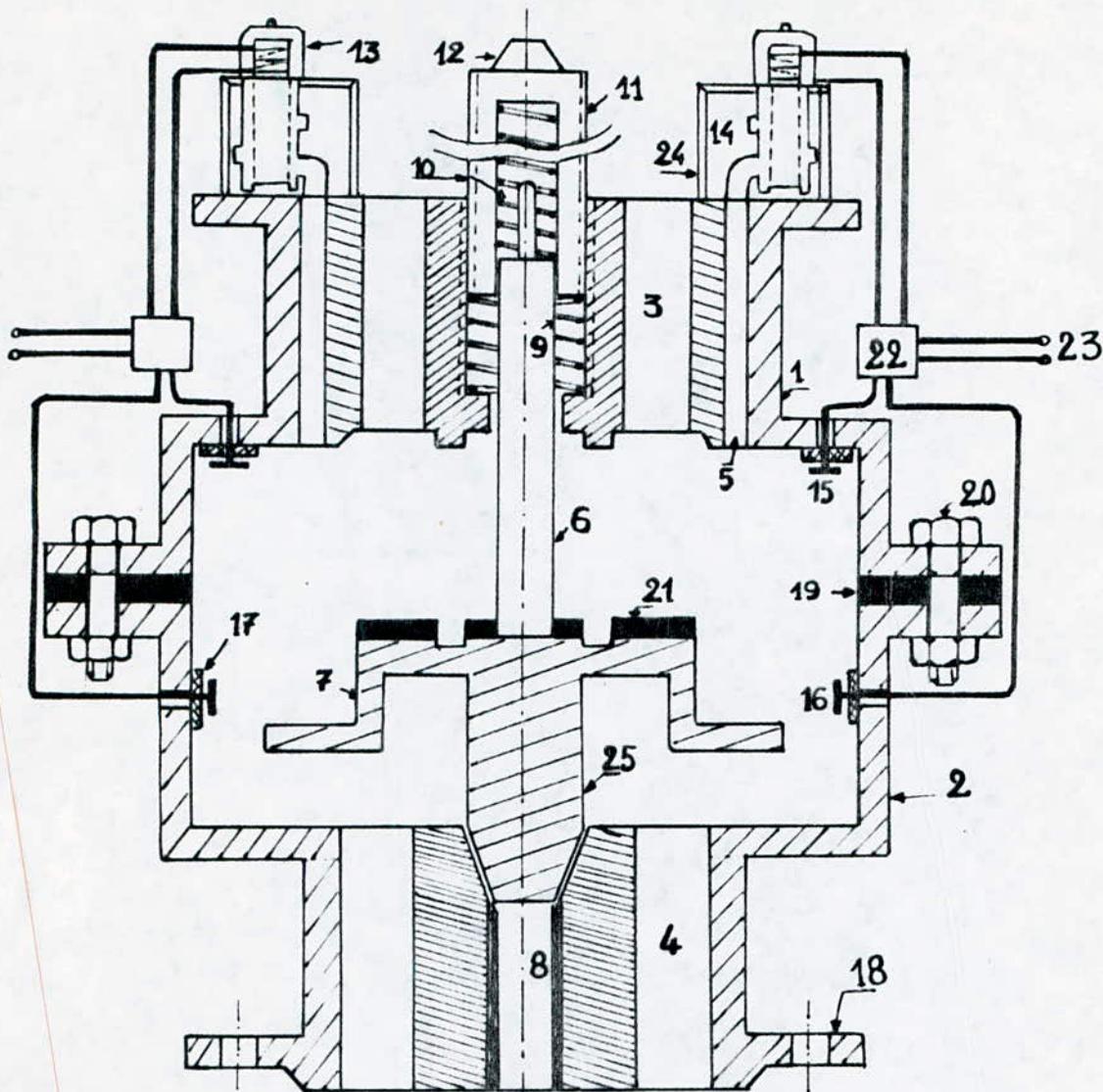
$\xi$ : coefficient de perte de charge singulière, à la sortie de ventouse.

.2) Ventouses électromécaniques [de l'I.M. : Academie des sciences GEORGEA : URSS] ; (fig III.3.6.2) :

Ces ventouses peuvent être utilisées dans le cas de transport d'un mélange solide-liquide, dont le diamètre des particules solide est supérieur à 1,5 mm, ( $d_{ps} > 1,5 \text{ mm}$ ).

\* fonctionnement :

En fonctionnement normal (P, V) le corps est rempli en eau qui est entrée par les orifices 4 et 8. Sous l'effet de la poussée de cette eau, l'assiette obture les orifices 3, de même, le circuit électrique est fermé entre les cathodes 15 et 16, grâce aux relais de



( fig VII 3.6.2 )

### Ventouse électromécanique : [I.M.A.G URSS]

- |  |  |
|--|--|
| 1: partie supérieur de carcasse.           | 15 et 16: électrodes ;                     |
| 2: partie inférieur de carcasse;           | 17: joint                                  |
| 3: ouverture de grand diamètre supérieur ; | 18: bride                                  |
| 4: ouverture de grand diamètre inférieur ; | 19: joint                                  |
| 5: ouverture de petit diamètre .           | 20: boulon d'assemblage ;                  |
| 6: tige.                                   | 21: revêtement élastique ;                 |
| 7: assiette de la marche.                  | 22: relais de contrôle .                   |
| 8: ouverture de petit diamètre .           | 23: Source électrique ;                    |
| 9: ressort .                               | 24: support du robinet électromagnétique . |
| 10: ressort ;                              | 25: tête conique .                         |
| 11: manchon ;                              |  |
| 12: écrou                                  |  |
| 13: robinet électromagnétique.             |  |
| 14: pipe (tube).                           |  |

contrôle 22 les robinets électromagnétiques ferment les orifices 5. dans le cas échéant (diminution de pression), l'assiette tombe sous l'effet de son propre poids en fermant l'orifice 8 pour qu'il ne soit pas bouché, par conséquent ; les orifices 3, 5, 4 sont ouverts ce qui permet l'échappement d'air de la conduite.

on remarque, que l'étanchéité des ouvertures est assurée par des revêtements en caoutchouc collés sur l'assiette. [Voire figure (7.3.6.2)].

3) Ventouse sans flotteur ; à soupape guidée par tige :  
[ventouse de l'I.M : Académie des sciences GEORGEA. URSS]:

(fig VII.3.6.3);

Sont des ventouses qui peuvent être utilisées en cas d'un mélange solide - liquide. lorsque la pression diminue la soupape tombe sous l'effet de son propre poids en admettant à l'air d'entrer dans la conduite.

\* le poids de cette soupape, dans ce cas, est :

$$G_s \leq P_0 \cdot \omega_s \cdot k$$

avec :

$\omega_s$ : section qui doit être fermée ; [m<sup>2</sup>];

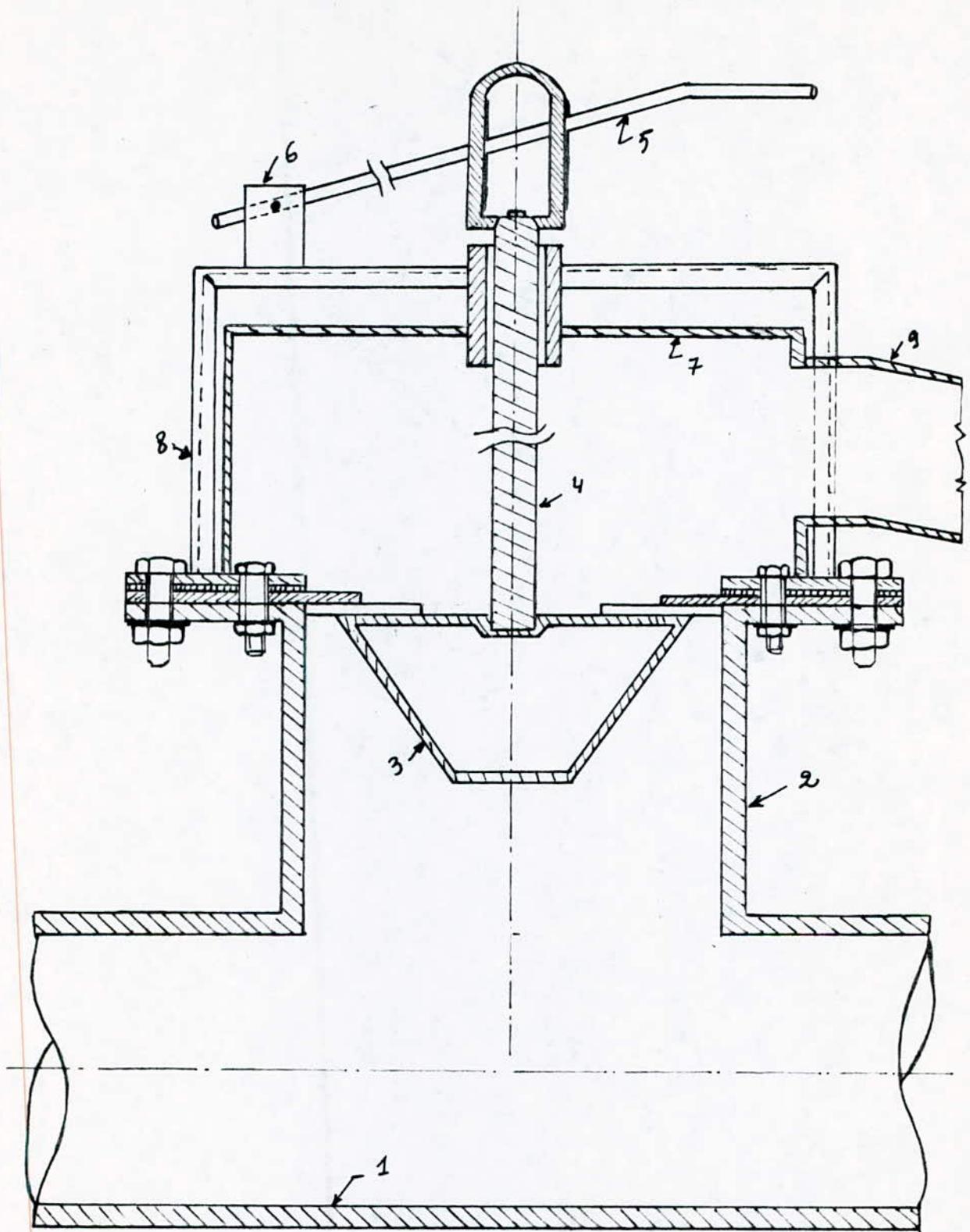
$P_0$ : pression de service en régime permanent ;

$k$ : coefficient de sécurité ou réserve :  $1,3 < k < 1,5$ .

\* le diamètre de tube d'admission d'air est donné par :

$$D_a = D \sqrt{\xi_a \cdot v_0 / v_a}$$

avec :



( fig VII 3.6.3 ) Ventouse sans flotteur : à soupape guidé par tige : [ I.M.A.G URSS ].

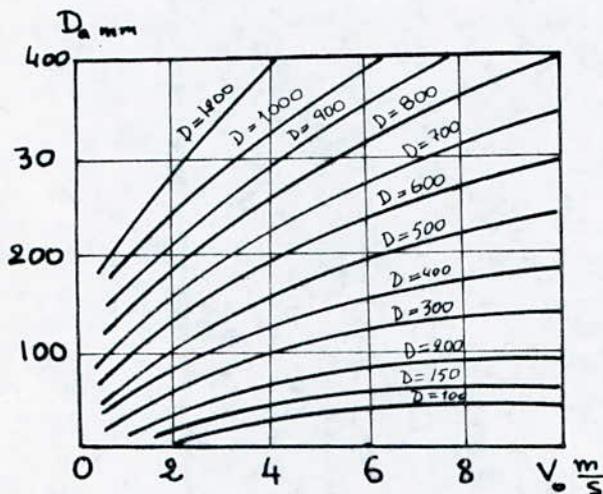
1 : conduite  
2 : carcasse.  
3 : Soupape .

4 : tige .  
5 : levier .  
6 : Charnière .

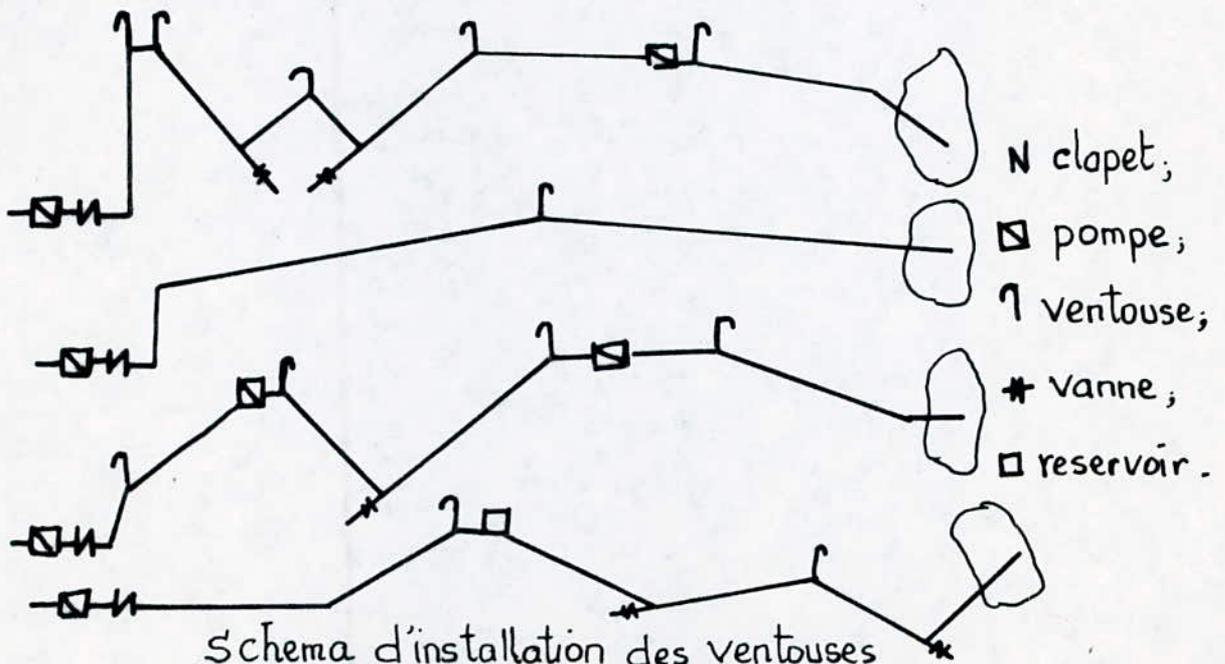
7 : cylindre .  
8 : support .  
9 : évacuateur d'air .

$f_a$ : coefficient de dissolution d'air  $f_a = 0,9 + 1.$

Si le diamètre  $D_a$ , à l'entrée du ventouse, déterminé d'après la formule ci-dessus trouvé plus que 300 à 400 mm, il faut disposer plusieurs ventouses sur la majistrale de façon que l'ensemble des celles-ci assure la quantité d'air demandée.



Abaque de détermination du diamètre d'entrée d'air dans la ventouse. (A,34)



Schema d'installation des ventouses sur différents profils.

★ vidange de majistrale : Objection sommaire:

Sur les niveaux les plus bas de la conduite majistrale, il faut installer des vannes pour évacuer le liquide y emmagasiné. (fig 3.1)

Le temps de vidange d'une partie de conduite descendante est donné

par:

$$t_1 = 2\sqrt{A} \frac{L_1}{\sqrt{H_1}}$$

où

$$A = \frac{(D/d_v)^4 \cdot \left(1 + \lambda \cdot \frac{L_v}{d_v} + \sum \xi_i\right) + \sum \xi_o}{2g}$$

$L_1$ : longueur de la partie de la conduite à évacuer (descendante).

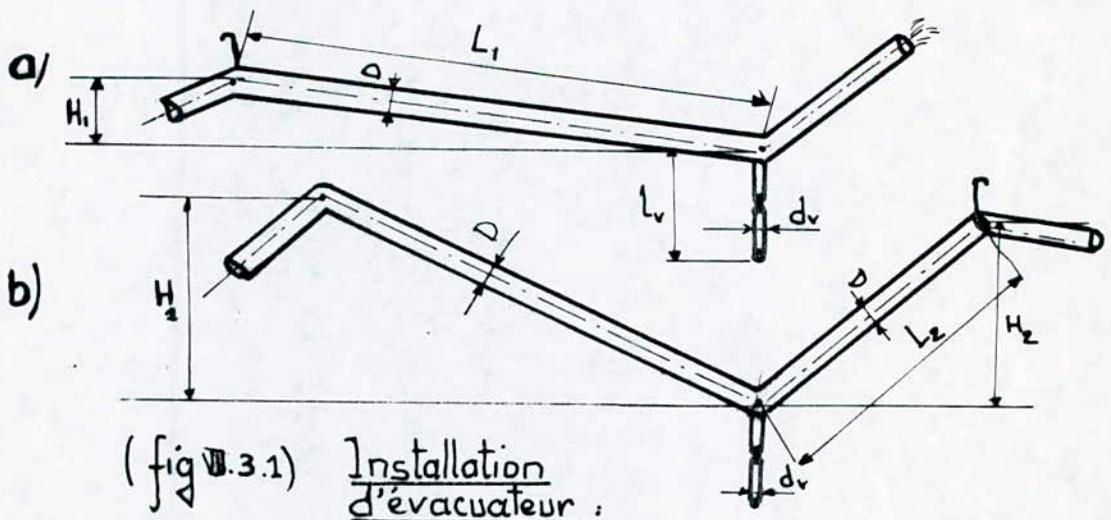
$H_1$ : Difference des niveaux de la conduite à évacuer (descendante).

$d_v$ : diamètre d'évacuateur.

$L_v$ : longueur d'évacuateur.

$\lambda$ : coefficient de P.d.c. lineaire; le long de la conduite.

$\xi_i + \xi_o$ : coefficient de P.d.c. locale dans la conduite et dans l'évacuateur.



Sur la figure ci-dessus, cas (a) le diamètre de sortie d'évacuateur est donné par:

$$d_v = \sqrt{\frac{4 W_1}{0,785 \mu t_1 \sqrt{2g H_1}}}$$

$W_1$ : volume occupé dans la partie descendante (volume d'eau).  $m^3$

Dans le cas (b) de la figure précédente (cas du profil en V), le temps de vidange est donné par:

$$t_2 = \frac{2\sqrt{A'} L_1 (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{H_1}$$

avec:

$$A' = \frac{\left(\frac{D}{d_v}\right)^4 e^2 \left(1 + \lambda \frac{L_v}{d_v}\right) + 2,6 e^2 \left(\frac{D}{d_v}\right)^{3,4}}{2g}$$

$$e = \frac{L_1 + L_2}{L_1}$$

$L_2$ : longueur de la partie ascendante; [m].

$H_2$ : la charge de la partie ascendante.

Dans ce cas le diamètre de sortie d'évacuateur devra être:

$$d_v' = \sqrt{\frac{4}{0,785 \mu t_2} \left( \frac{W_1}{\sqrt{H_1}} - \frac{W_2}{\sqrt{H_2}} \right)}$$

$W_2$ : volume d'eau dans la partie ascendante  $L_2$ , en  $[m^3]$ .

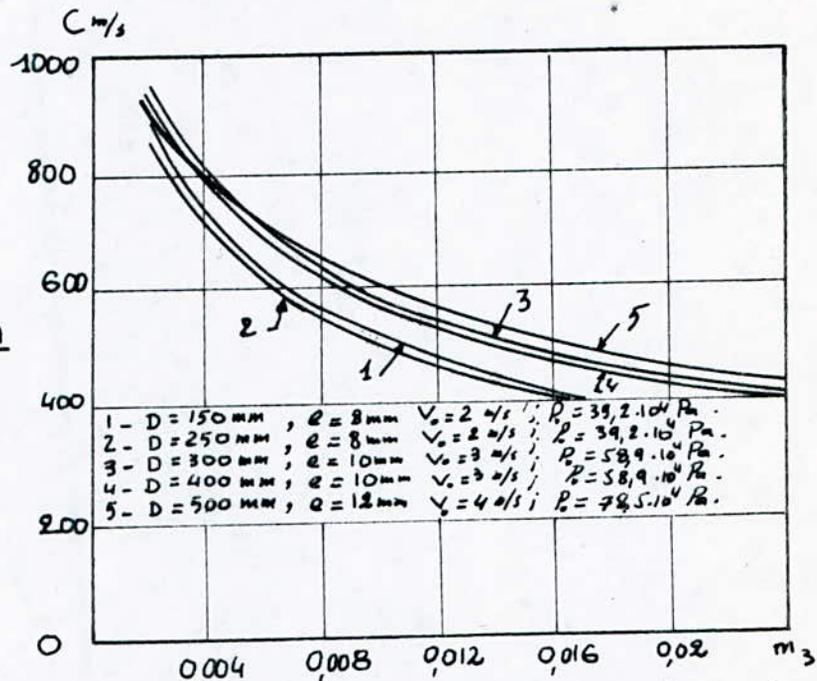
L'admission d'air dans la conduite diminue le module d'élasticité du liquide ce qui diminue la vitesse de propagation des ondes, par conséquent ça entraîne une diminution de pression lorsqu'il s'agit d'un arrêt brusque de la pompe ou fermeture du clapet. (fig VIII.1.2)

il faut ouvrir les vannes dans la conduite d'aspiration (si l'air entre sous l'action de la pression atmosphérique) et dans la conduite de refoulement (si l'air entre sous pression) pour quelque temps.

il faut qu'un pourcentage de 0,25 à 2,5% de tout le volume du liquide dans toute la conduite soit remplacé par l'air; le temps mis par l'admission d'air est:  $t = L/v$ .

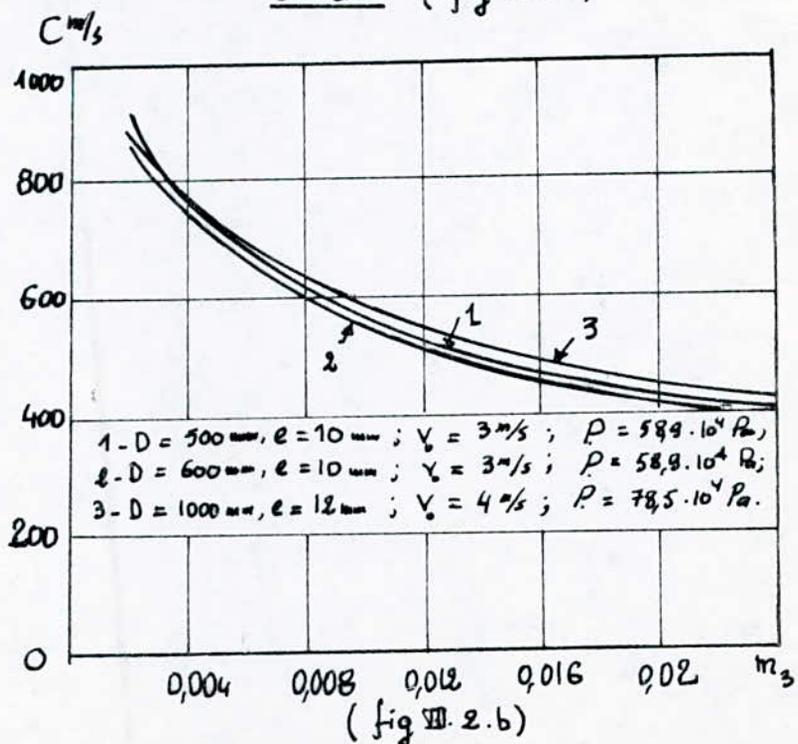
Pour un mélange liquide-solide l'intensité du coup de belier ne peut être violente, et ceci dépend du pourcentage ou concentration des particules solides dans le liquide :

$m_3$ : concentration  
des particules  
dans l'eau.

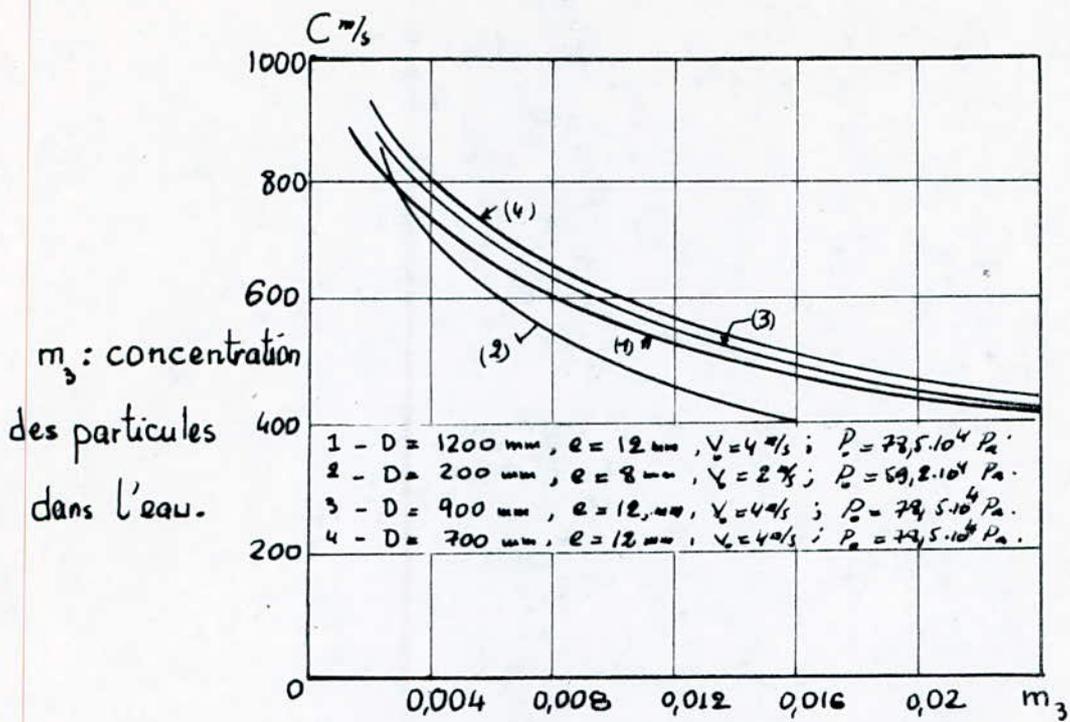


Variation de la celerité C avec la concentration des particules dans  
L'eau (fig VIII. 2 a)

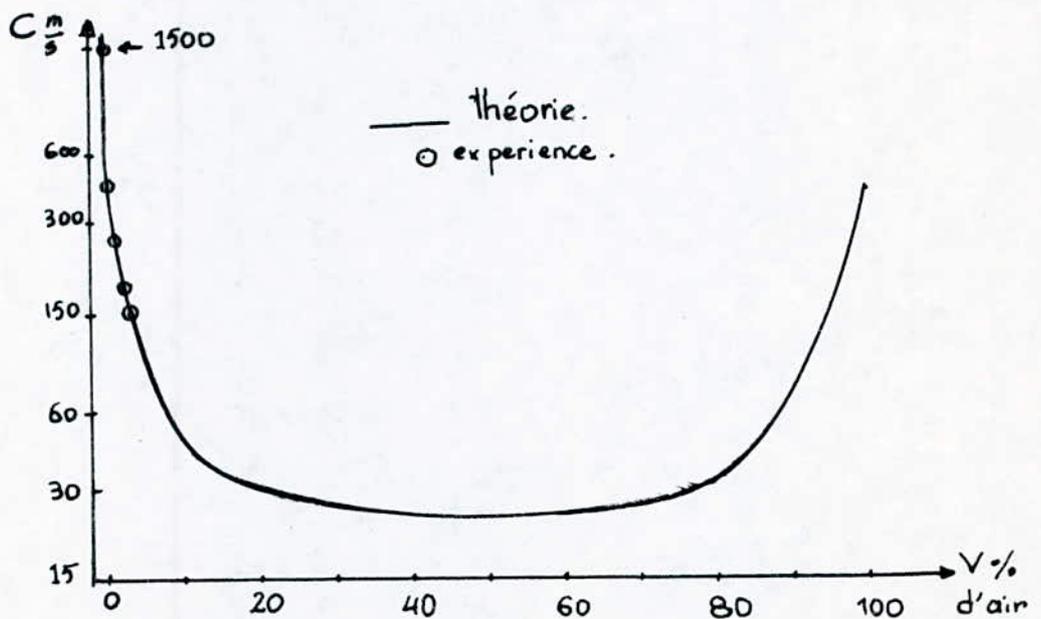
$m_3$ : concentration  
des particules  
dans l'eau.



Variation de la celerité C avec la concentration des particules dans  
L'eau.



(fig. 1.2.c) Variation de la célérité  $C$  avec la concentration des particules dans l'eau.



(fig. 1.2) Effet de bulles d'air sur la célérité des ondes  $C$  dans l'eau.

## VII.4 Cheminée d'équilibre et réservoir d'air "anti-bélier"

### Recommandations, choix et exploitations:

Les réservoirs d'air et les cheminées d'équilibres interviennent à la fois pour la protection des dépressions et des surpressions. Ses utilisations sont plus efficaces et peuvent travailler avec sûreté, mais le seul inconvénient est ce que le volume d'air dans des cas n'est pas suffisant.

### VII.4.1 Cheminée d'équilibre :

On évite la propagation d'ondes de pression importantes si l'on peut maintenir un point de la conduite à une pression peu variable, en relation par exemple avec la pression atmosphérique. C'est ce que réalise pratiquement une cheminée d'équilibre (fig VII.4.1). Si ce réservoir vertical est correctement dimensionné, il peut aussi bien absorber l'eau en excès pour effacer une onde de pression positive, que fournir un certain volume d'eau pour combattre une onde de pression négative.

La cheminée d'équilibre est surtout utilisée dans les installations hydroélectrique, dans le cas d'une adduction par pompage, une cheminée construite à l'origine de refoulement, devrait avoir à une cote de trop-plein supérieure à la hauteur manométrique totale des pompes.

Les volumes mis en œuvre sont de l'ordre de grandeur  $\frac{S L v_0^2}{2g \cdot \Delta H}$

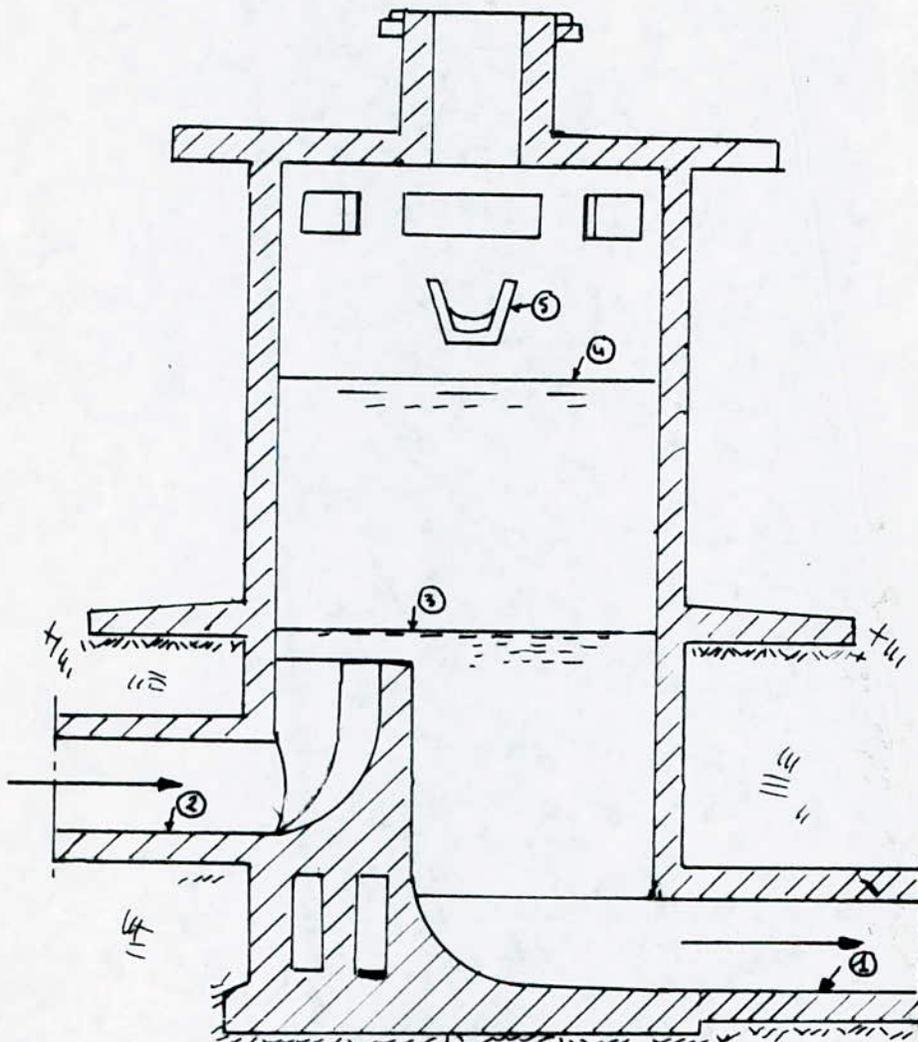
S: section de la conduite ;

L: la longueur de la conduite ;

$\Delta H$ : la surpression admise,

$v_0$ : vitesse d'écoulement en régime permanent.

Pour diminuer les dimensions de la cheminée et pour amortir rapidement



(fig VII . 4 . 1)

### Coupe type de cheminée

- 1: conduite de sortie de la cheminée .
- 2: galerie de prise à l'entrée de la cheminée .
- 3: Niveau dynamique minimale .
- 4: Niveau dynamique maximale .
- 5: Trop - plein .

le régime transitoire, on est souvent amené à prévoir à la base du dispositif un étranglement qui crée une forte dissipation d'énergie. cet étranglement peut être constitué par le raccordement à la conduite lui-même, ou par un diaphragme.

### 1:1: Etude de la cheminée d'équilibre :

L'exploitation sommaire de la façon dont les deux fonctions, de réduction et d'élimination du coup de belier, sont remplies est la suivante :

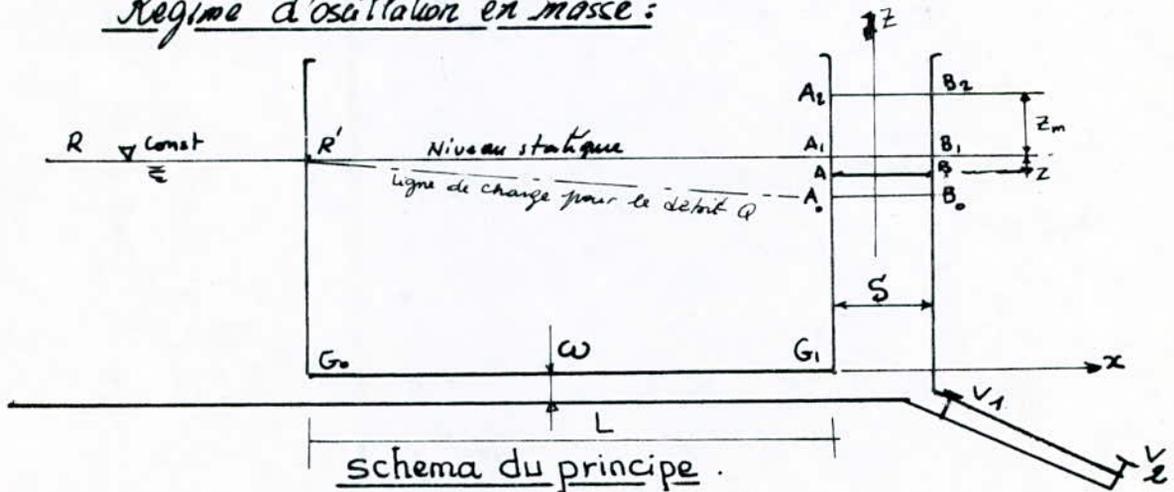
a) la surpression maximale à la base de la conduite est donnée pour une manœuvre linéaire de coupure de débit de durée  $T_f$  par la formule de Michaud :

$$\Delta H = \frac{2L}{T_f} \frac{V_0}{g} \quad \text{ou} \quad \Delta P = 2\rho V_0 \frac{L}{T_f}$$

$L$  : est la longueur comprise entre la vanne de pied de la conduite et la première surface libre rencontrée en amont de la conduite.

b) L'onde de pression produite par un coup de belier se réfléchissant sur la surface libre de la cheminée ne parcourt pas la galerie ; celle-ci est donc mise à l'abri des surpressions grâce à la présence de la cheminée.

### Régime d'oscillation en masse :



Supposons que  $V_2$  soit brusquement fermée.

Nous considérons le système constitué par réservoir à niveau constant  $R$ , la galerie d'aménée et la cheminée d'équilibre tout se passe comme si la vanne  $V_1$  se trouvait fermée.

L'eau en mouvement dans la galerie ne trouve pas d'autre exutoire que la cheminée et elle s'engage dans celle-ci en faisant monter le niveau depuis  $A_0 B_0$  jusqu'à un niveau  $A_2 B_2$ .

Ce niveau est tel que l'énergie potentielle contenue dans la tranche ( $A_1 B_1$ ,  $A_0 B_0$ ) soit égale à l'énergie cinétique de l'eau en mouvement dans la galerie au moment de la fermeture de  $V_1$ .

Lorsque le niveau  $A_2 B_2$  est atteint cette énergie potentielle se transforme en énergie cinétique : l'eau contenue dans la galerie est mise en mouvement en sens contraire du sens initial, et ainsi de suite.

Le système (R.G.C) est le siège d'oscillations en masse analogues à celles que l'on peut produire dans un tube en U et qui sont régies par la même équation que celle du pendule simple.

Nous ferons une sorte d'hypothèse correspondant à un cas idéal.

a)  $A_0 B_0$  est confondue avec  $A_1 B_1$  (p.d.c négligeable).

b) Débit  $Q$  est annulé par la fermeture brusque de la vanne  $V_1$ .

$z$  : cote du plan d'eau  $AB$  (à l'instant) dans la cheminée comptée positivement au-dessus du plan  $A_1 B_1$ .

$v_0$  : vitesse moyenne de l'eau dans la galerie. } à l'instant  $t$ .

$w$  : vitesse moyenne de l'eau dans la cheminée }

Appliquons la formule fondamentale de la dynamique  $F = M \cdot \gamma$  à la masse d'eau contenue dans la galerie entre  $G_0$  et  $G_1$ .

Nous avons (en orientant l'axe  $G_0 G_1$  de la gauche vers la droite) :

$$F = -\rho g z \omega \quad (\text{différence des poussées sur les sections } G_0 \text{ et } G_1)$$

$$M = \frac{\rho g}{g} \omega L \quad \text{d'où : } -\rho g z \omega = \frac{\rho g}{g} \omega L \frac{dv_0}{dt}$$

$$\frac{L}{g} \frac{dv_0}{dt} + z = 0$$

L'équation de continuité s'écrit :

$$\omega v_0 = S \omega = \frac{dz}{dt} S$$

d'où :

$$\boxed{\frac{L}{g} \frac{S}{\omega} \frac{d^2 z}{dt^2} + z = 0}$$

C'est l'équation d'un

mouvement oscillatoire d'amplitude constante et de période :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g} \frac{S}{\omega}} \quad [T: \text{min}]$$

L'amplitude  $Z_m$  des oscillations peut être calculée ; en écrivant que l'énergie potentielle de la colonne d'eau ( $A_1 B_1, A_2 B_2$ ) de hauteur  $Z_m$  au-dessus de plan de référence  $A_1 B_1$  est égale à l'énergie cinétique de la masse d'eau contenue dans la galerie au moment de la fermeture ( $V_0$ ) ;

$$\rho g z_m S \frac{z_m}{2} = \frac{1}{2} \frac{\rho g}{g} L \omega v_0^2$$

d'où :

$$\boxed{Z_m = v_0 \sqrt{\frac{L}{g} \frac{\omega}{S}}}$$

En cas de perte de charge non négligeable, la condition de Thoma peut être applicable :

$$S > \frac{v_0^2 \cdot L \omega}{2g H_c \Delta H}$$

$H_c$  : Hauteur de chute correspondant au niveau de régime ( $A_2 B_2$ ).

$\Delta H$  : Perte de charge dans la galerie ; à ( $V_0$ ).

Cette inégalité donne la valeur maximale de la section  $S$  pour une usine unique alimentant un réseau consommateur. De façon générale, si la perte de charge n'est pas négligeable la section  $S$  de la cheminée diminue.

## VII. 4.2 : Reservoir d'air "anti-belier"

Dans un reservoir anti-belier (schema VII-4.2), c'est un matelas d'air sous pression qui assure une relative constance de la pression pour amortir le coup de belier. On peut donc placer ce dispositif à proximité de la station de pompage, sans tenir compte de relief; très efficace, c'est le systeme antibelier le plus repandu maintenant pour les adductions d'eau de petite et moyenne importance.

### 2:1 Calcul de reservoir anti-belier :

le volume d'air, nécessaire pour diminuer l'intensité maximale du coup de belier, est donné par la dependance suivante :

$$W_a = \frac{\omega L (\rho_m^2 V_0^2 C^2 - \Delta P) P_0}{2 \rho C^2 \left( P_0 \ln \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} + (K_c P_c - P_0) \left( 1 - \frac{P_0}{P_0 + \Delta P} \right) \right) P_0}$$

$\omega$  : la section de la conduite ;

$L$  : la longueur de la conduite ;

$\rho_m$  : densité de melange.

$C$  : Celerité des ondes élastiques, prise des tableau (7.4.2) et de graphique (7.4.2)

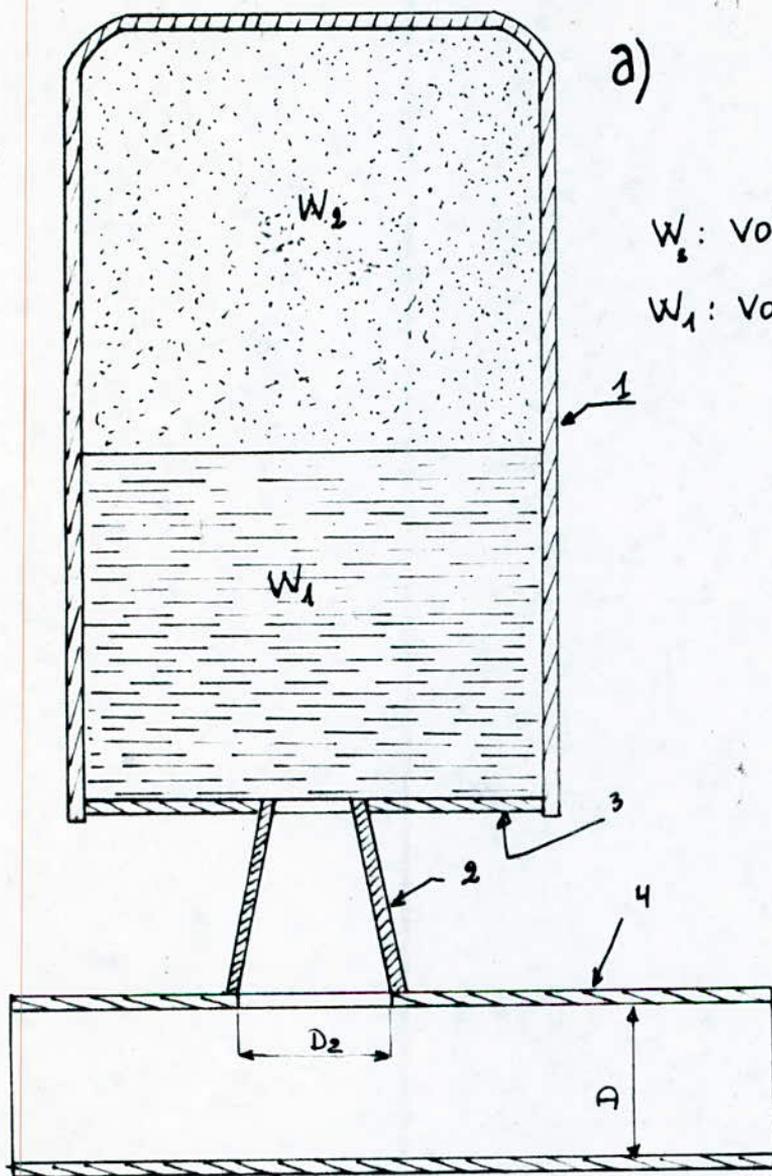
$K_c$  : coefficient de majoration.

$P_c$  : la pression maximale supportée par la conduite .

$P_0$  : Pression atmospherique .

Pour faciliter le calcul, on donne la dépendance  $\ln \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$  et  $\frac{\Delta P}{P_0}$ , (schema VII.4.2.1); cette courbe est utilisée pour les systemes de transport d'un melange solide-liquide .

Sur (le schema VII 4 2.1) les constructions a, b, c sont recommandées pour les conduites des diamètres 50 à 150 mm; d.e.f pour les conduites des diamètres 150 à 500, et g, h, i pour les diamètres 500 à 1200.



a)

$W_2$

$W_1$

$W_2$ : volume d'air ;

$W_1$ : volume d'eau .

1

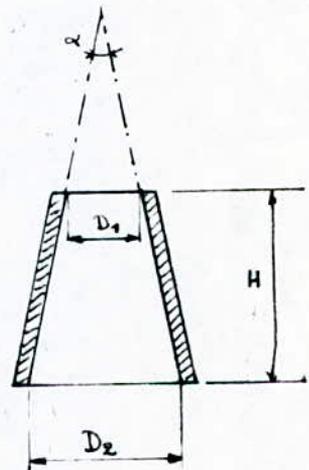
3

4

$D_2$

A

b)



(fig VII. 4.2)

Reservoir d'air anti-belier :

a): chambre d'air.

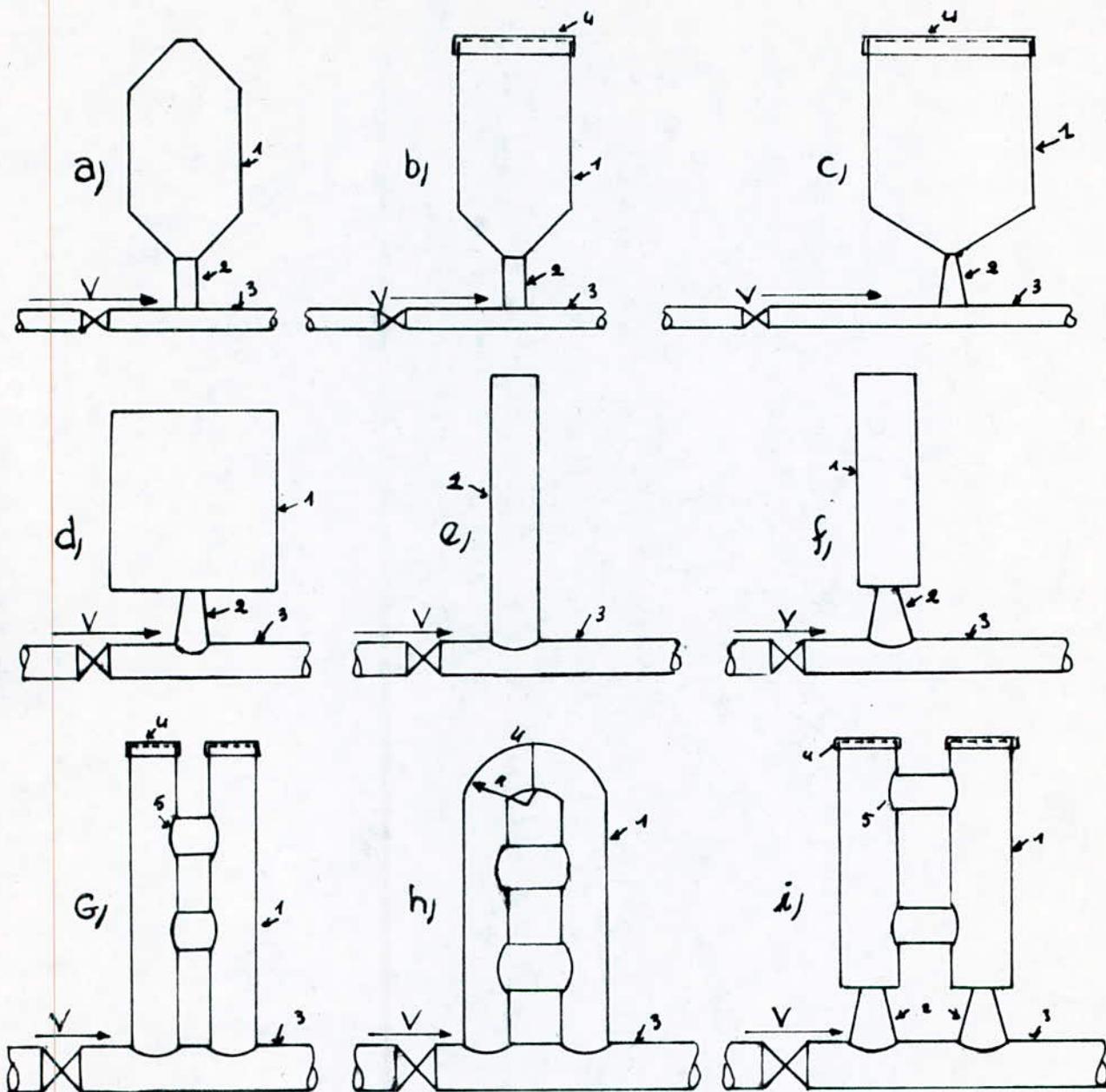
b): tube conique de connexion

1: Carcasse.

2: tube conique de connexion.

3: fond.

4: conduite de refoulement.



( fig VII. 4.2.2 )

Construction des colonne et chambre d'air:

a, b, c, d, e, f: reservoirs à simple effet.

G, h, i reservoirs à double effet.

1: carcasse

4: couverture

2: tube transversal.

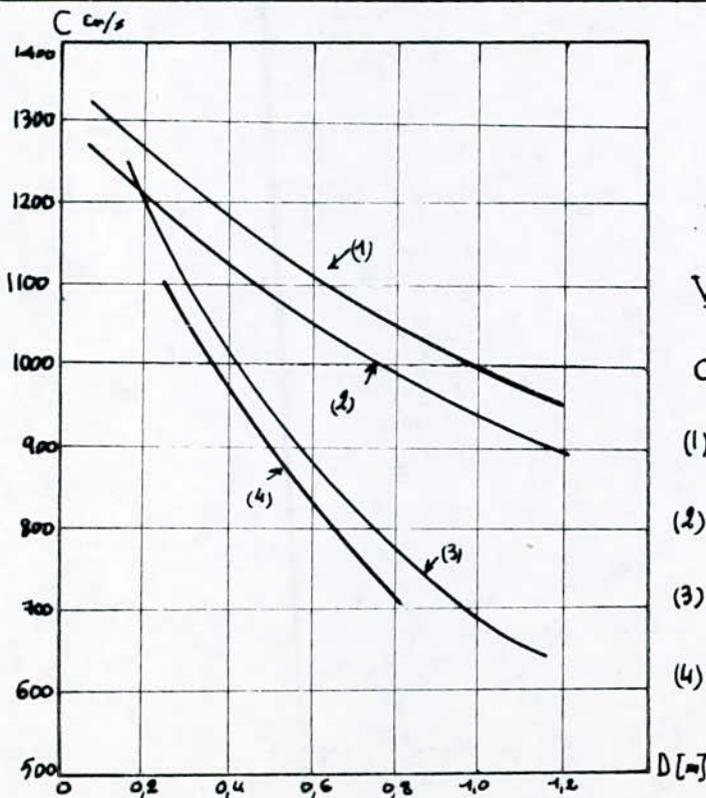
5: conduite de relation de

3: conduite de refoulement.

2 carcasses.

(tableau 742)

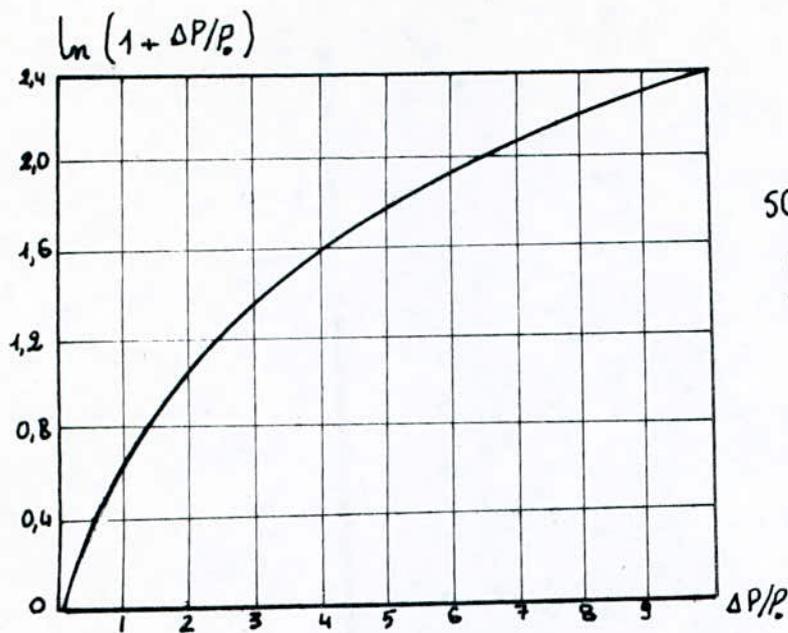
Diamètres des conductes $D$ [mm].	épaisseur $e$ [mm]	La célérité des ondes $C$ [m/s] $H_2O$		Célérité des ondes dans un mélange de corps solides dont: [m/s] $0 < d_{ps} < 3,0\text{mm}$		Célérité des ondes dans un mélange des corps solides dont $d_{ps} > 3,0\text{mm}$ $C$ [m/s]	
		max	min	max	min	max	min
200	6	1280	1220	1250	1200	—	—
200	8	1230	1180	1250	1150	—	—
300	9	1190	1150	1150	1060	1100	1100
400	10	1150	1120	1060	970	1020	930
500	10	1120	1070	970	920	930	860
600	12	1070	1040	920	850	860	800
700	12	1040	1020	850	790	800	740
800	12	1020	980	790	740	740	680
900	15	980	950	740	720	680	640
1000	15	950	850	720	640	640	580
1200	15	900	850	660	640	—	—



(graphe 742)

Variation de la célérité  $C$   
avec  $D$ , Pour l'eau à  $20^\circ\text{C}$

- (1) théorique, pour  $H_2O$  ;
- (2) expérimentale pour  $H_2O$ .
- (3) mélange (théorique)
- (4) expérience (particules grossières).



Schema (7.4.2.1) :

$\ln(1 + \Delta P/P_0)$  en fonction  
de  $\Delta P/P_0$  pour le calcul  
du volume d'air :

La connexion entre le reservoir d'air et la conduite se fait par un organe d'étranglement (tube conique) qui provoque une résistance locale pour le courant d'écoulement non stationnaire du liquide. expérimentalement, on détermine, l'organe le plus efficace, est un tube conique, de façon que le rapport  $d_1/d_2$  soit de 0,25 à 0,40 ; avec :

$d_1$  : diamètre de sortie du reservoir ;

$d_2$  : le grand diamètre de cône = D.

dans ce cas ; le volume de reservoir d'air, à la pression atmosphérique, on le détermine par la relation :

$$W_a = \frac{\omega \cdot L \left[ (P_m \cdot V_c - \Delta P_n)^2 - (\Delta P - \Delta P_n)^2 \right] P_0}{2 P_m C^2 \left[ P_0 \ln \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} + (k_c (P_c + \Delta P_n) - P_0) \left( 1 - \frac{P_0}{P_0 + \Delta P} \right) \right] P_0}$$

$\Delta P_n$  : Perte de pression, causée par l'étranglement ; avec :

$$\Delta P_n = \Delta P \left( 1 - \frac{d_1}{D} \right)^{+8,8 V_0^{-0,5}}$$

Pour le calcul de  $\Delta P_n$ , on utilise le tableau (7.4.3) ; suivant :

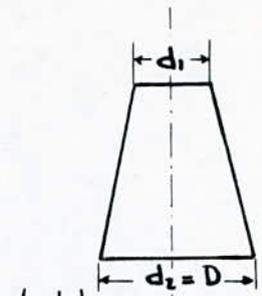
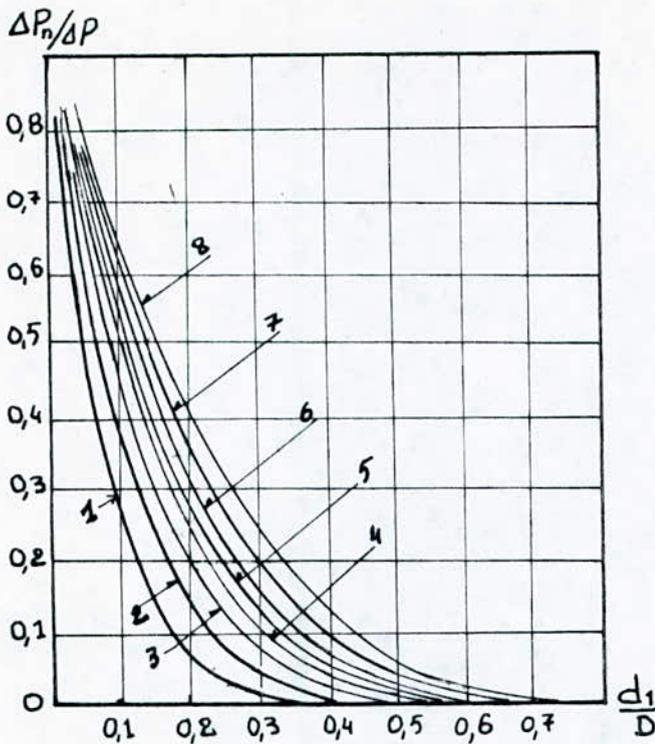


tableau (7.4.3)

- 1-  $v_0 = 0,5 \text{ m/s}$  ;
- 2-  $v_0 = 1,0 \text{ m/s}$  ;
- 3-  $v_0 = 1,5 \text{ m/s}$  ;
- 4-  $v_0 = 2,0 \text{ m/s}$  ;
- 5-  $v_0 = 2,5 \text{ m/s}$  ;
- 6-  $v_0 = 3,0 \text{ m/s}$  ;
- 7-  $v_0 = 4,0 \text{ m/s}$  ;
- 8-  $v_0 = 5,0 \text{ m/s}$  .

La perte, relative de la pression causée par l'étranglement à l'entrée du réservoir.

### VIII: 5 : Dispositifs anti-belier avec éléments en plastique :

Ce sont des corps métalliques remplis par des éléments en plastique pleins d'air, ces éléments en plastique peuvent être des tores, des chambres à air ou des conduites élastique.

le volume de corps métallique peut être déterminé par :

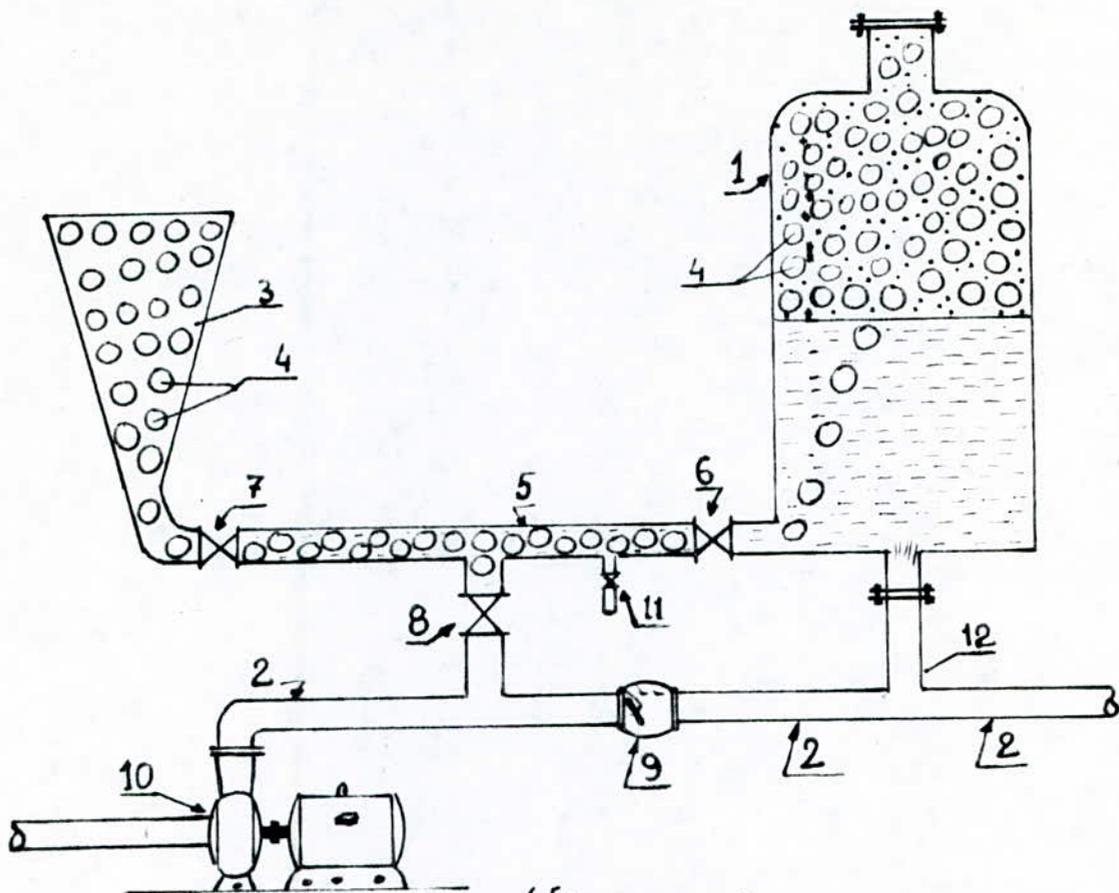
$$\{ W = K \cdot V \}$$

$K$  : coefficient de majoration de volume ;  $K = 0,1$  à  $1,3$  ;

$V$  : volume total des éléments en plastique [y compris de l'air].

### VIII: 5.1 : Cas des boules sphériques : (fig VII 4.3.1)

Dans le cas des boules sphériques, le volume de corps métallique sera calculé par une majoration par  $K$  le volume de ces boules ;



(fig VIII . 4. 3. 1)

Dispositif anti-belier ; avec boules spheriques en plastique :

1: Carcasse

2: conduite de refoulement

3: cuve conique rempli par les boules.

4: boules spheriques compises d'air;

5: conduite intermediaire

6: vanne ;

7: vanne ;

8: vanne ;

9: Clapet.

10: pompe

11: évacuateur

12: tube de connexion .

le volume de ces boules est donné par :

$$W_{b.s} = (V'_{bs} + V''_{bs}) n_{b.s}$$

$V''_{bs}$  : volume d'air compris dans la boule ;  $[m^3]$

$V'_{bs}$  : Volume des éléments élastiques (corps de boule) ;

$n_{b.s}$  : nombre de boules :

nous savons que :

$$V'_{bs} = \frac{4}{3} \pi (R_e^3 - R_i^3)$$

$R_e$  : rayon extérieur ;

$R_i$  : rayon intérieur .

tandis que  $V''_{bs}$  est donné par la relation :

$$V''_{bs} = \frac{\omega \cdot L (P_m^2 C^2 V_0^2 - \Delta P^2) P_{b.s}}{2 P_m C^2 \left[ P_{b.s} \ln \frac{P_{b.s} + \Delta P_{b.s}}{P_{b.s}} + (K_c P_c - P_{b.s}) \left( 1 - \frac{P_{b.s}}{P_{b.s} + \Delta P_{b.s}} \right) \right] P_1}$$

$P_1$  : Pression absolue à l'intérieur de la boule , quand à l'extérieur agisse la pression atmosphérique .  $[Pa]$  ;

$P_{b.s}$  : Pression absolue à l'intérieur de la boule en régime permanent  $[Pa]$  .

$$P_{b.s} = P_1 + \frac{E_a}{E_a + \frac{2}{3} \frac{\delta_{b.s} E_{b.s}}{R_{b.s}}} (P_0 - P_a)$$

$E_a$  : Module d'élasticité de l'air .  $[Pa]$  .

$E_{b.s}$  : Module d'élasticité du matériaux de boules ,  $[Pa]$  ;

$\delta_{b.s}$  : épaisseur de paroi de la boule .  $[m]$  ;

avec:

$$\Delta P_{b.s} = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_a + \frac{2}{3} \frac{\sigma_{b.s} \epsilon_{b.s}}{R'_{b.s}}} \Delta P_0$$

avec;

$$R'_{b.s} = R_{b.s} \sqrt[3]{P_1/P_{0.s}}$$

$R'_{b.s}$ : Rayon de la boule après le coup de belier ; [m].

**VII:5:2**: Cas de chambre-à-air (tore): (fig VII 4.3.2)

Ce sont des tores élastiques remplis d'air.

Le volume total des tores est donné par:

$$V_T = 2 \pi a_T \cdot R_T \cdot n_T$$

$R_T$ : rayon de tore en [m];

$a_T$ : rayon moyen de tore [m];

$n_T$ : nombre de tores.

Le volume d'air comprimé à l'intérieur des tores est donné par:

$$n_T \cdot V_T = \frac{\omega \cdot L (\rho_m^2 c^2 V_0^2 - \Delta P^2) P_{0T}}{2 \rho_m c^2 \left[ P_{0T} \ln \frac{P_{0T} + \Delta P_T}{P_{0T}} + (K_c P_c - P_{0T}) \left( 1 - \frac{P_{0T}}{P_{0T} + \Delta P_T} \right) \right] P_a}$$

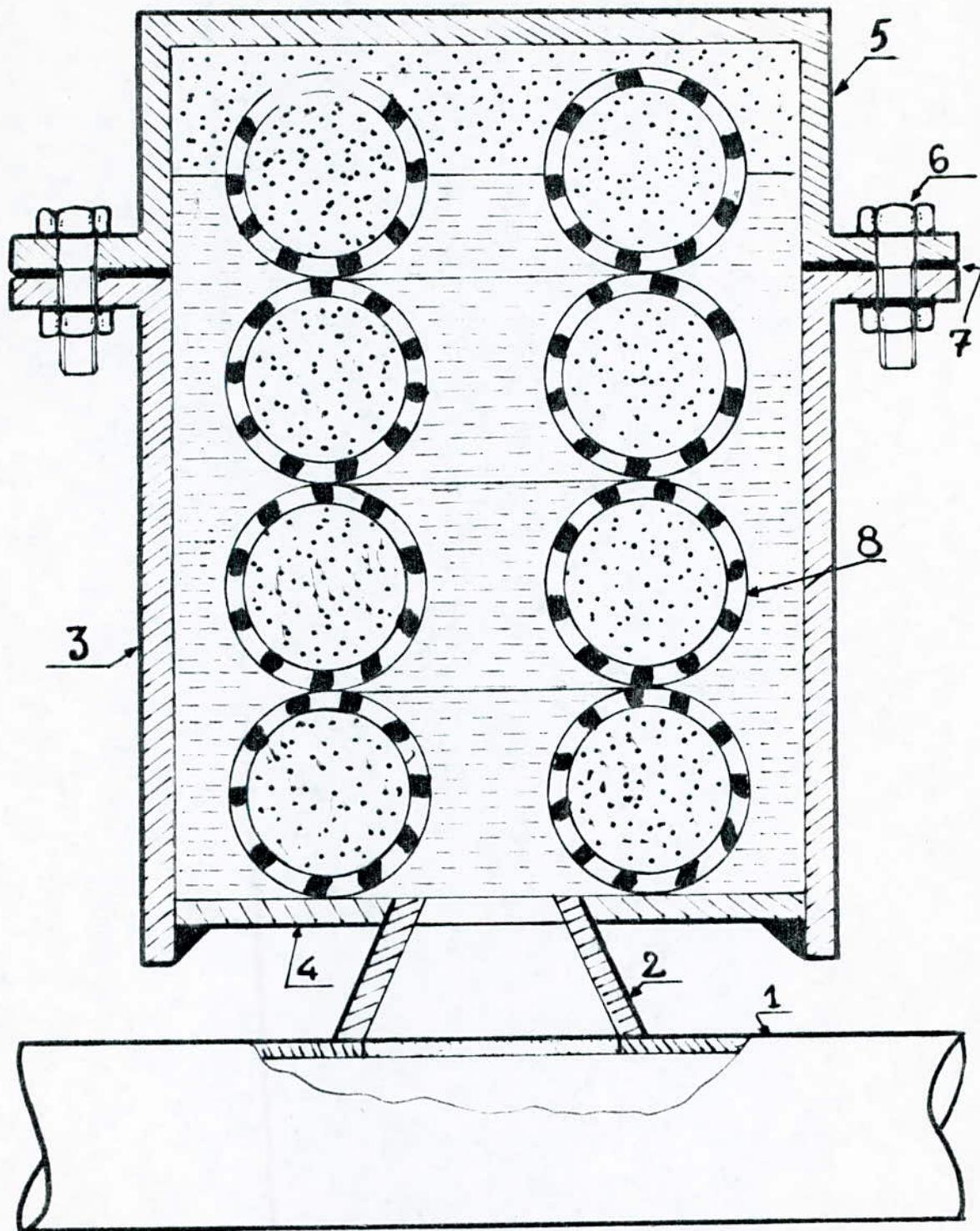
$P_{0T}$ : pression à l'intérieur de tore en régime permanent;  $P_c$  en [Pa].

$$P_{0T} = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_a + \frac{\sigma_T \epsilon_T}{2 R_T}} (P_0 - P_a) + P_a ;$$

$\sigma_T$ : épaisseur de la paroi de tore [m],

$\epsilon_T$ : Module d'élasticité de matière de tore; en [Pa];

$\Delta P_T$ : variation de pression dans le tore pendant le coup de belier en [Pa];



(fig VII 4.3.2)

Dispositif anti-belier ; avec des tores en

Plastique :

- 1: Conduite de réfolement
- 2: tube conique .
- 3: carcasse .

- 4: fond
- 5: couverture
- 6: Boulon d'assemblage

- 7: joint
- 8: tore .

$$\Delta P_T = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_a + \frac{\delta_T \cdot \epsilon_T}{2 R_T'}} \cdot \Delta P ;$$

$R_T'$ : rayon diminué après le coup de belier en [m]

$$R_T' = R_T \sqrt{P_a / P_{0.T}}$$

### VI: 5.3 : Cas des conduites élastiques :- (fig VII 4.3.3)

Ce sont des conduites élastiques pliées régulièrement dans le corps métallique occupant un volume, qui peut être calculé par :

$$V_{CE} = V_{CE}'' + V_{CE}'$$

$V_{CE}''$ : Volume d'air à l'intérieur de la conduite ;

$V_{CE}'$ : Volume de matière de la conduite :

avec :

$$V_{CE}' = \frac{\pi}{4} L_{CE} (d_e^2 - d_i^2)$$

$d_e$ : Diamètre extérieur de la conduite ; en [m] ;

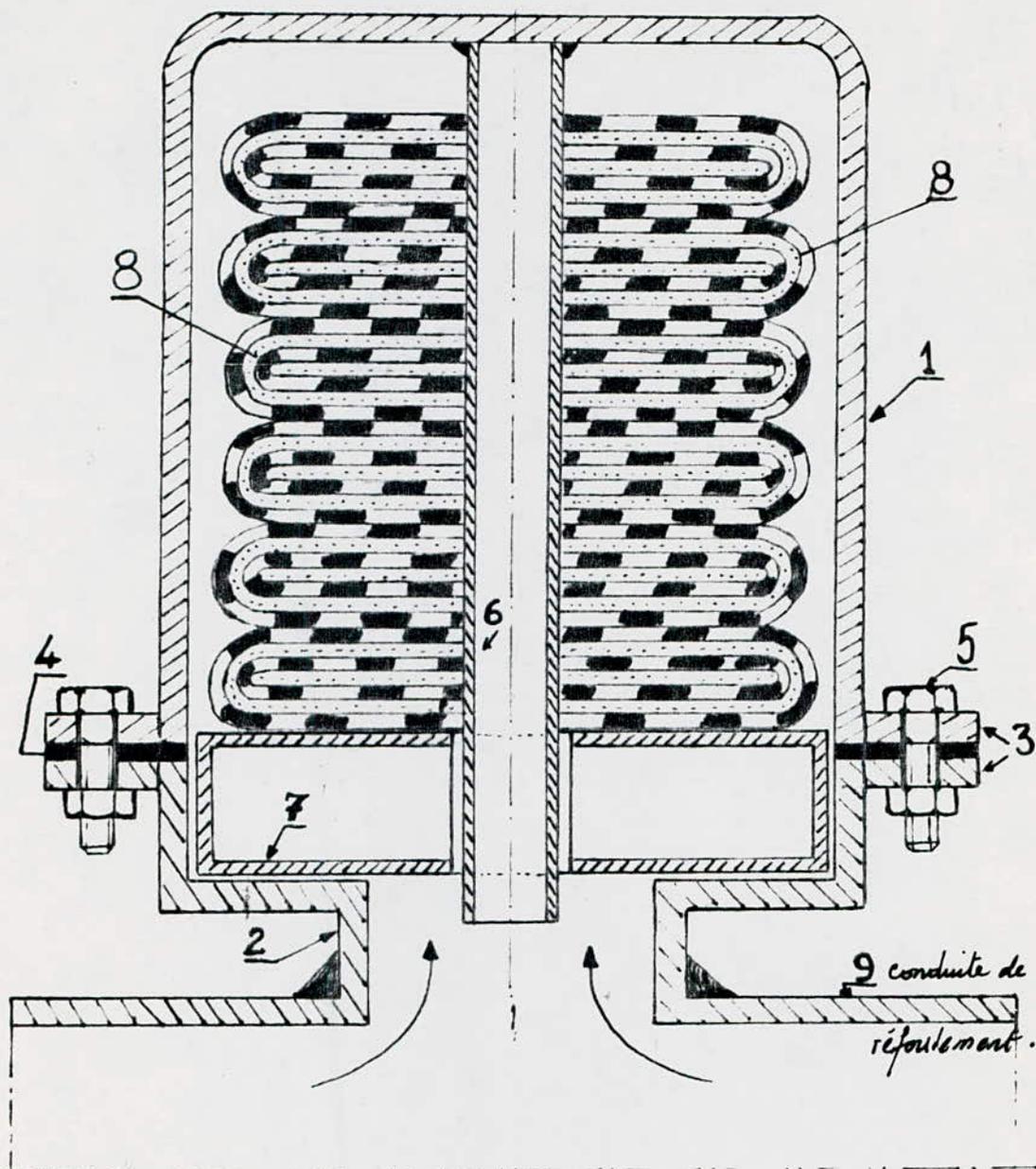
$d_i$ : Diamètre intérieur de la conduite en [m] ;

$L_{CE}$ : longueur de la conduite élastique en [m].

tandis que le volume d'air à l'intérieur de la conduite, est donné par :

$$V_{CE}'' = \frac{\omega \cdot L (P_m^2 C^2 v^2 - \Delta P^2) P_{CE}}{2 P_m C^2 \left[ P_{CE} \ln \frac{P_{CE} + \Delta P_{CE}}{P_{CE}} + (k_c P_c - P_{CE}) \left( 1 - \frac{P_{CE}}{P_{CE} + \Delta P_{CE}} \right) \right] P_a}$$

$P_{CE}$ : la pression à l'intérieur de la conduite élastique, en mouvement permanent en [Pa].



(fig IV 4.3.3)

Dispositif anti-belier ; avec des conduites élastiques :

- |                         |                                  |
|-------------------------|----------------------------------|
| 1: carcasse,            | 5: boulon d'assemblage.          |
| 2: conduite d'entrée ;  | 6: tige                          |
| 3: brides ;             | 7: flotteur glissant sur la tige |
| 4: joints d'assemblage. | 8: conduites en caoutchouc.      |

$$P_{CE} = P_a + \frac{\frac{4R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} (P_o - P_a)}{\frac{E_{CE}}{E_a} + 2 \left( \frac{R_e^2 + R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + \beta \right)} ;$$

avec  $\beta$ : coefficient de Poisson ;  $0,46 < \beta < 0,49$ .

$E_{CE}$ : conduite d'Young de matériau de la conduite ; en [Pa].

$R_e$ : Rayon extérieur de la conduite [m] ;

$R_i$ : Rayon intérieur de la conduite en [m] ;

$\Delta P_{CE}$ : Changement de pression à l'intérieur de la conduite élastique pendant le coup de belier, en [Pa].

$$\Delta P_{CE} = \frac{\frac{4R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \Delta P}{\frac{E_{CE}}{E_a} + 2 \left( \frac{R_e^2 + R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + \beta \right)} ;$$

$R_e'$ : Rayon extérieur diminué après le coup de belier ; il est égale à :

$$R_e' = R_e \left[ 1 - \frac{(P_o - P_a)}{E_{CE}} \cdot \frac{2(1 - \beta^2) + \frac{E_{CE}}{E_a} \left( \frac{R_e^2 + R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} - \beta \right)}{\frac{E_{CE}}{E_a} + 2 \left( \frac{R_e^2 + R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + \beta \right)} \right] ;$$

$R_i'$ : Rayon intérieur, diminué, il est égal à :

$$R_i' = R_i \left[ 1 - \frac{(P_o - P_a)}{E_{CE}} \cdot \frac{2 \frac{R_e^2}{R_e^2 - R_i^2}}{1 + 2 \frac{E_{CE}}{E_a} \left( \frac{R_e^2 + R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + \beta \right)} \right] ;$$

En pratique, ces calculs ne sont valable que si le rapport  $\sigma/D$  est supérieur à 20.

## VII:6: Calcul d'un reservoir d'équilibre, en utilisant la Méthode graphique de BERGERON:

C'est une méthode graphique de calcul des coups de belier dans les conduites de refoulement des pompes qu'il a ensuite étendue aux systèmes en charges quelconques en particulier aux conduites forcées.

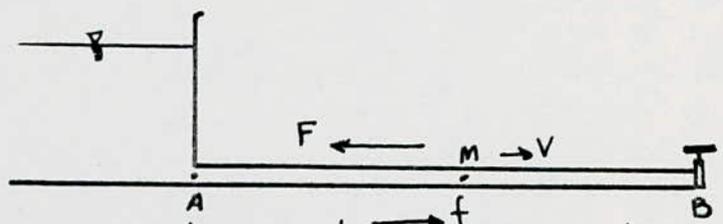
### VII:6:1 Principe de la Méthode:

La théorie d'Allievi a montrée que la surpression résulte de la superposition à la pression statique de deux ondes  $F$  et  $f$  se déplaçant en sens inverse l'une à l'autre avec une même célérité  $C$ .

$$\begin{cases} H - H_0 = F + f \\ V - V_0 = -g/c (F - f) \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} F = F(t - l/c) \\ f = f(t + l/c) \end{cases}$$

$F$ : Onde de la vitesse absolue  $C$  dirigée en sens inverse de la vitesse d'écoulement

$f$ : Onde de la vitesse absolue  $C$  dirigée dans le même sens que la vitesse d'écoulement.



En introduisant le débit  $Q = \omega \cdot V$ , les équations s'écrivent:

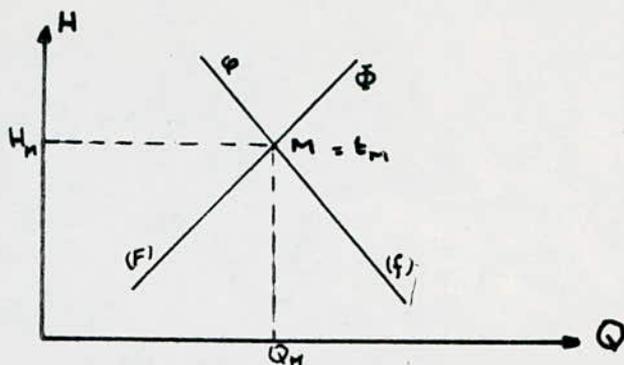
$$\begin{cases} H - H_0 = F + f \\ \frac{c}{g\omega} (Q_0 - Q) = F - f \end{cases}$$

Considérons un point  $M$  de la conduite et partons sur un graphique les valeurs de  $Q$  en abscisses et les valeurs de  $H$  en ordonnées:

$Q_M$  et  $H_M$  sont respectivement le débit et la pression (en hauteur d'eau).

au point M à l'instant t.

Supposons un Observateur partant de M au temps t où l'onde F passe de M vers A, cet Observateur verra l'onde F



conserver sa valeur  $F_M = F$  et en tout lieu où il passera il constatera

que :

$$\begin{cases} \frac{c}{g\omega} (Q_0 - Q) = F_M - f \\ H - H_0 = F_M + f \end{cases} \quad (1)$$

alors qu'au départ, en M, on avait :

$$\begin{cases} \frac{c}{g\omega} (Q_0 - Q_M) = F_M - f_M \\ H_M - H_0 = F_M + f_M \end{cases} \quad (2)$$

en éliminant  $Q_0$  et  $H_0$  entre les deux équations (1) et (2), on obtient.

$$\begin{cases} \frac{c}{g\omega} (Q_M - Q) = f_M - f \\ H_M - H = f_M - f \end{cases}$$

et éliminant  $f_M - f$  :

$$H - H_M = \frac{c}{g\omega} (Q - Q_M)$$

Sur le diagramme (H, Q) cette équation est représentée par une droite  $\Phi$  passant par  $M(H_M, Q_M)$  et de coefficient angulaire  $c/g\omega$ .

Si l'observateur se déplace en sens inverse de M vers B avec la vitesse C, en quittant M en même temps que que f, c'est cette onde qui restera constante et égale à  $f_M$ . les mêmes calculs que ceux effectués précédemment montreraient alors que cet observateur on a :

$$H - H_M = -\frac{c}{g\omega} (Q - Q_M)$$

qui est l'équation d'une droite  $\varphi$  passant par M et de coefficient ang-

ulaire  $-C/g\omega$ , càd symétrique de la droite  $\Phi$  par rapport à une horizontale passant par M.

III: 6:2 Calcul du coup de belier: Méthode graphique de Bergeron. Arrêt brusque du groupe électropompe:

« EXEMPLE DE CALCUL ».

1) ayant les données de départ:

$$L = 3754 \text{ m}; \quad Q = 23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}; \quad D = 200 \text{ mm}; \quad V_0 = 0,732 \text{ m/s}.$$

$H_g$  = hauteur géométrique: 180 m.

$$E_L = 2,15 \cdot 10^9 \text{ Pa}; \quad E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa. (acier)}.$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3; \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

En utilisant ces données:

$$C = 1226,17 \text{ m/s}$$

2) Unité de temps:  $t = \frac{L}{C} \Leftrightarrow t = 3,06 \text{ s}$ .

3) valeurs maximales du coup de belier (Pression ou dépression):

$$b = \pm \frac{C V_0}{g} \Leftrightarrow b = \pm 91,5 \text{ m}.$$

4) Les abscisses seront graduées selon les vitesses.

- Les régimes seront considérées à rythme entier ou  $\Delta t = \frac{2L}{C}$ , en prenant  $L/C$  comme unité de temps.

+ Au temps "Zero" survient la disjonction et commence le régime transitoire

+ Au temps " $t_n$ ", au réservoir le régime est encore à l'état initial et le point 1R est obtenu par l'intersection de la vitesse  $V_0$  et de l'horizontale passant par  $Z_0 = H_0 + 10 + h$ , ( $h = 0 \text{ m}$ ).

+ De ce point 1R on trace la droite de pente  $+C/g\omega$ ,  $\omega$  étant la

section de la conduite, l'intersection de celle ci avec l'horizontale qui represente la pression dans la conduite, et donne le point  $2P$  qui sera trouvé comme suit :

Le Calcul se fait par approximations successives en choisissant une vitesse  $v_i$  arbitrairement telle que la vitesse finale  $v_{fi} < v_{f_{i-1}}$ .

5) On fixe un volume  $W_0$  arbitraire, dans le reservoir d'air.  $W_0 = 2 \text{ m}^3$ .

6) L'organe de perte de charge une tuyère ;

On dimensionne la tuyère ; le diamètre interieur "d" sera choisi de telle façon que le rapport  $v_1/v_f$  soit compris entre 15 et 20.

On choisit le diamètre de la tubulure  $D_t$ . , Pour notre cas on prend :

$$d = 0,05 \text{ m} \quad D_t = 0,1 \text{ m}.$$

Signalons qu'à la montée de l'eau, la tuyera ayra un coefficient de debit égal à 0,92 ; on aura :

$$K = \frac{v_1}{v_f} = \left( \frac{D}{0,92d} \right)^2 \text{ entre 15 et 20.}$$

$$K = 19$$

7) On calcul les pertes de charges au niveau de la tuyère : Ces pertes de charge varient suivant que l'eau monte ou qu'elle descende :

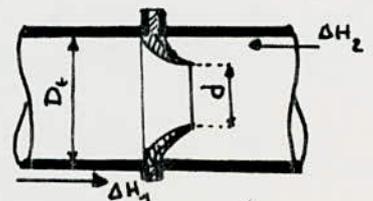
A) À La Montée :  $\Delta H_1$  :

Ces pertes sont calculées en fonction du rapport  $m_1$  des sections de la veine contractée et de la tubulure :

$$m_1 = \left( \frac{d'}{D_t} \right)^2 = \left( \frac{0,92 d}{D_t} \right)^2$$

$$m_1 = 0,2116.$$

ayant  $m_1$  et à l'aide de l'abaque donnant le coefficient de perte de charge dans une tuyere.



"C<sub>1</sub>" étant tiré, on calcul les p.d.c à la montée :  $\Delta H_1$ ;  $C_1 = 0,63$ .

$$\Delta H_1 = C_1 \frac{V_1^2}{2g} \quad V_1 \text{ vitesse dans la tubulure.}$$

B) A la descente .  $\Delta H_2$  :

A la descente de l'eau, la tuyère de diamètre d'incorporée dans la tubulure de diamètre D<sub>t</sub>, agit comme un ajutage de borda avec un coefficient de contraction 0,5, le rapport des vitesses :

$$V_2/V_f = \frac{\pi D^2/4}{0,5 \pi d^2/4} = 2 D^2/d^2 = k_2^2 \quad ; \quad V_2 = k_2 \cdot k \quad (\text{avec } k = \frac{V_1}{V_f})$$

V<sub>2</sub>: vitesse de la descente de l'eau dans la tuyère ;

$$k_2 = 32.$$

on aura donc :  $m_2 = d^2/d_t^2 \cdot 2 \Rightarrow m_2 = 0,125$

ayant m<sub>2</sub>, on tire C<sub>2</sub> de l'abaque : et enfin les p.d.c seront :

$$\Delta H_2 = C_2 \cdot V_2^2/2g. \quad C_2 = 0,79$$

B) Variation du volume d'air dans le reservoir :

$$\Delta W = \pm \omega \cdot V_m \cdot \theta ; \text{ avec : } \theta = 2L/c.$$

V<sub>m</sub>: vitesse moyenne egale à la moyenne arithmetique des vitesses au debut et à la fin de chaque intervalle.

$$V_{mi} = \frac{V_{(i-1)p} + V_{2ip}}{2} ; \text{ en premier temps}$$

$$V_m = \frac{V_0 + V_{f1}}{2} ;$$

V<sub>0</sub>: vitesse de l'écoulement avant la disjonction ;

V<sub>f1</sub>: vitesse à la fin de l'intervalle .

\* Le volume d'air dans le reservoir :  $\left\{ \begin{array}{l} -\Delta W ; \text{ lorsque le reservoir se vide;} \\ +\Delta W ; \text{ lorsque le reservoir se remplit.} \end{array} \right.$

$$W_i = W_{i-1} \pm \Delta W$$

g) On calcule la pression dans le reservoir d'air par :

$$Z_i = \frac{Z_0 \cdot W_0^{1,4}}{W_i^{1,4}} ;$$

$z_0 = H_0 + 10 + h_0 + \Delta H$ , pour notre cas nous avons pris  $h_0 = 0$ .

$H_0 =$  Hauteur géométrique de refoulement au delà de la prise de l'antibelier :

$$z_0 = 207,5 \text{ m.}$$

10) On calcule les pertes de charge dans le refoulement  $S$ :

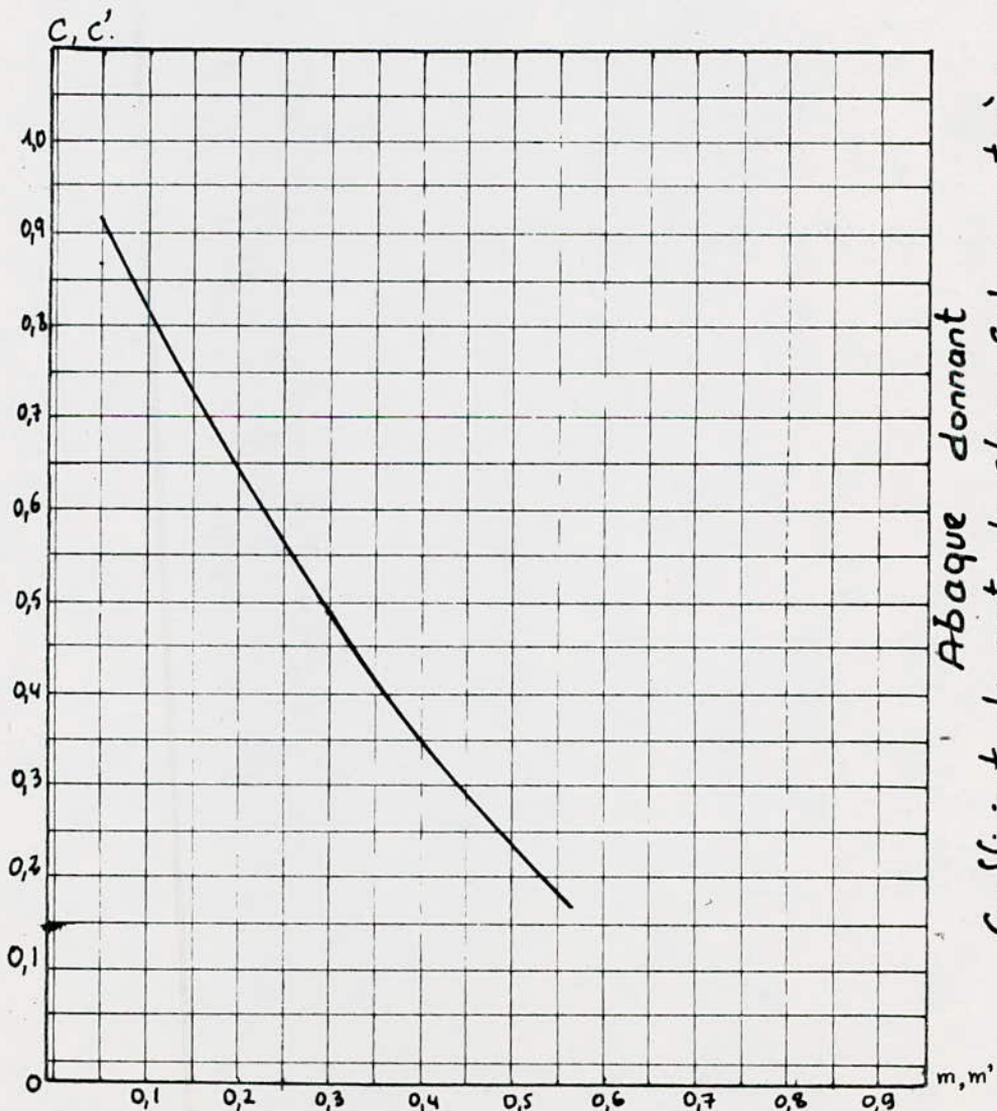
$$S = k \cdot v^2 \quad k = \frac{f}{D} \frac{1}{2g} L_e \quad L_e = 1,15 L_g$$

$$f = \left( 1,14 + 0,86 \ln \frac{\epsilon}{D} \right)^2 \text{ formule de Nicoradzé.}$$

on prend :  $\epsilon = 8,8 \cdot 10^{-4}$

11) la pression finale absolue dans la conduite en aval de diaphragme fictif (tenant compte des p.d.c).

$$\begin{cases} Z - \Delta H_1 - S & \text{montée} \\ Z + \Delta H_2 - S' & \text{Descente} \end{cases}$$



Abaque donnant Coefficient de perte de charge C dans une tuyère.

$$\delta = 32,63 V_f^2.$$

C'est avec cette précision qu'il faut mener l'horizontale qui coupe la droite  $C/gw$  en un point tels que , 2P, 4P, 6P, ...

On cherche ensuite  $V_{fi}$  qui doit être égale à  $V_{fi}$  choisie (environ), sinon avec d'autres vitesses, on refait les approximations jusqu'à trouver  $V_{fi}$  correspondante.

les calculs seront détaillés dans le tableau

en rappelant que :

$$W_0 = 2 \text{ m}^3.$$

$$\Delta H_1 = 0,03214 V_1^2.$$

$$\Delta H_2 = 0,0403 V_2^2.$$

$$\delta = 1K \cdot V_f^2 = 32,63 V_f^2.$$

$$z_0 = 207,5 \text{ m}.$$

$$V_0 = 0,732 \text{ m/s}.$$

On travail dans le tableau et sur la graphe en parallèle :

$$\Delta P_{\text{max}}^+ = 7 \text{ m}.$$

$$\Delta P_{\text{max}}^- = 15,0 \text{ m}.$$

Remarque:

trace de la droite  $C/gw$ .  $\Rightarrow C/gw = 3980,63$ .

$$Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}.$$

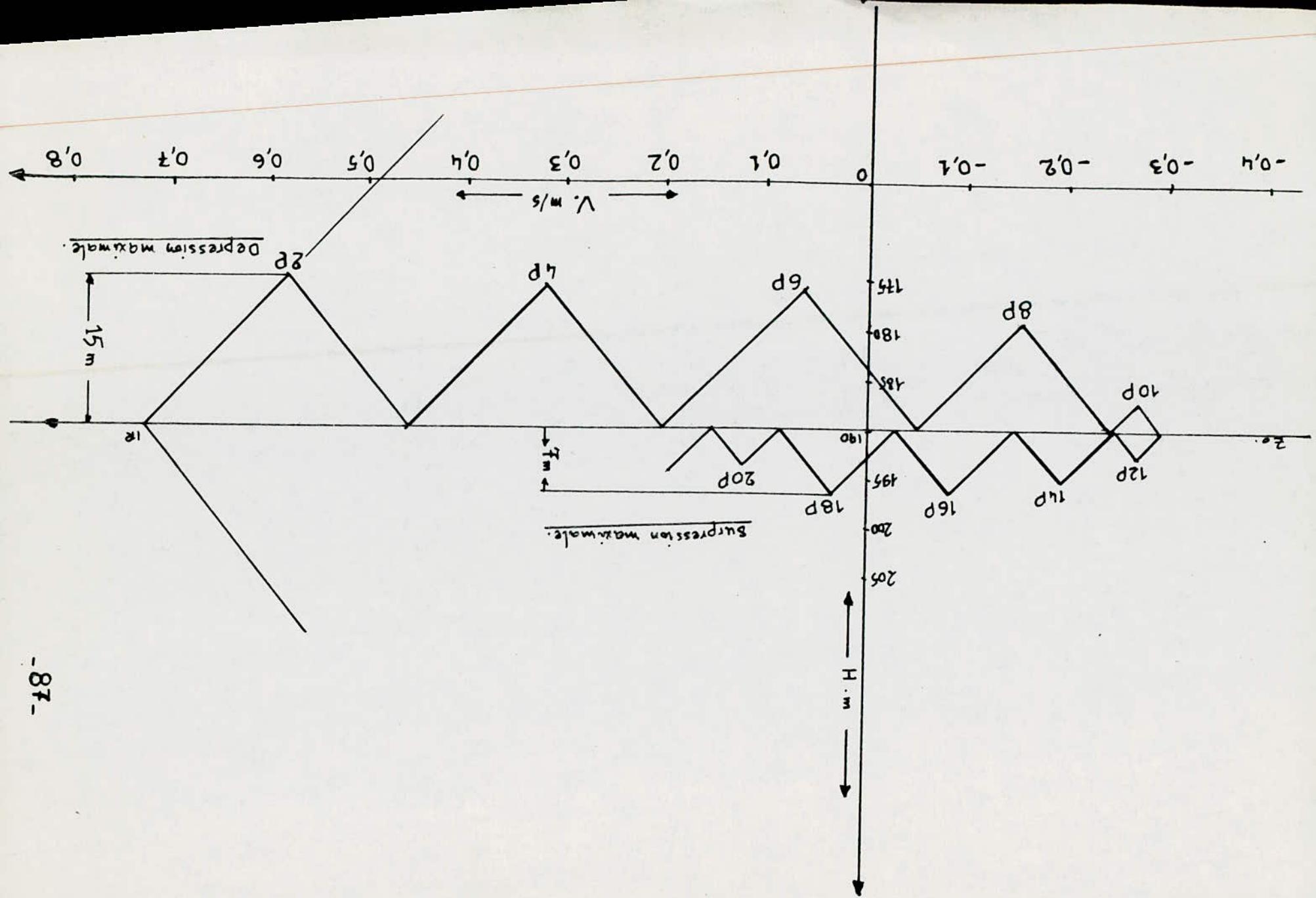
$$\left. \begin{array}{l} 5 \text{ m} \longrightarrow 1 \text{ cm} \\ 3980,63 \longrightarrow x \end{array} \right\} \Rightarrow x = \frac{3980,63}{5} = 796,12$$

$$\left. \begin{array}{l} 0,1 \cdot 0,0314 \text{ m}^2/\text{s} \longrightarrow 2 \text{ cm} \\ 1 \text{ m}^2/\text{s} \longrightarrow y \end{array} \right\} y = 636,94.$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{x}{y} = 1,245 \quad \underline{\underline{d = 51^\circ}}$$

1	Intervale de temps $\theta = 2t/c$	Variation du volume d'air: $\Delta W = \pm 0,192168 V_m$	Volume d'air dans la cloche $W_n = W_{n-1} \pm \Delta W$	Pression dans le reservoir d'air $Z_n = \frac{507,6}{W_n^{1,4}}$	Vitesse de l'eau dans la tuyère monter: $V_1 = 19 V_f$ descende: $V_2 = 32 V_f$	Perte d.c dans la tuyère: monter: $\Delta h_1 = 0,63 \frac{V_1^2}{2g}$ descende: $\Delta h_2 = 0,99 \frac{V_2^2}{2g}$	Pression dans la conduite avec P.d.c. $Z = \Delta H_1$ monter $Z + \Delta H_2$ descende	Perte de charge dans le refoule- ment S	Pression dans la conduite sans P.d.c. $Z = \Delta H_1 - S$ monter $Z + \Delta H_2 + S$ descende	Vitesse due au la opographique $V_{fn}$	Designation du point $P_n$	Vitesse moyenne $V_n = \frac{V_{fn} + V_{fn-1}}{2}$	Vitesse finale choisis $V_{fn}$
0	0	2 m <sup>3</sup>	207,5	-	-	-	17,5	-	-	1R	-	0,732	
10	+0,1263504	2,1263504	190,44	11,115	3,97	186,47	11,5	175	0,585	2P	0,6575	0,585	
20	+0,086956	2,2133064	180	6,08	1,19	178,81	3,3	176,5	0,32	4P	0,4254	0,32	
30	+0,0374727	2,2507791	175,85	1,33	0,056	175,794	0,02	175,7	0,07	6P	0,195	0,07	
40	-0,0081674	2,2426117	176,769	4,96	0,991	177,76	1,0	178,7	-0,155	8P	-0,0425	-0,155	
50	-0,0408357	2,2017760	181,37	8,64	3,00	184,37	2,5	187	-0,27	10P	-0,2125	-0,27	
60	-0,0518853	2,149891	184,53	8,64	3,00	190,53	2,5	193,03	-0,27	12P	-0,27	-0,27	
70	-0,041986	2,1056924	193,068	6,08	1,49	194,56	1,0	195,56	-0,19	14P	-0,23	-0,19	
80	-0,0259426	2,079749	196,45	2,56	0,26	196,71	0,2	196,8	-0,08	16P	-0,135	-0,08	
90	-0,0043237	2,0754253	197,02	1,12	0,05	196,97	0,04	196,98	+0,035	18P	-0,0225	+0,035	
100	+0,0153734	2,0907993	194,99	2,375	0,181	194,809	0,5	194,3	+0,125	20P	+0,08	+0,125	

Calcul du coup de belier: Arrêt brusque du groupe électropompe.



### VI 6.3. Dimensionnement de réservoir d'air:

D'après le tableau du calcul de l'épure, on déduit que:

Pendant la phase de dépression, le volume d'air passe de  $2,0 \text{ m}^3$  à  $2,2508 \text{ m}^3$

Pendant la phase de surpression le volume atteint  $2,0754 \text{ m}^3$ , on prend donc un volume de  $2,5 \text{ m}^3$ .

Forme du réservoir: Cuve cylindrique à 2 fonds bombés avec un diamètre intérieur:

$$\begin{array}{|l} D_{\text{int}} = 1,5 \text{ m} \\ D_{\text{ext}} = 1,55 \text{ m} \end{array}$$

la hauteur du fond prise égale à  $0,3$ ;  $h_c = 0,3 \text{ m}$ .

le volume des deux calottes elliptiques:  $W_1 = \frac{4}{3} \pi r^2 h_c = 0,7065 \text{ m}^3$ .

le volume de la partie cylindrique  $W_2$ ;  $W_2 = W - W_1 = 2,5 - 0,7065 = 1,7935 \text{ m}^3$

la section de la cuve:  $S = \frac{\pi D^2}{4} = 1,76625 \text{ m}^2$ .

la hauteur de la partie cylindrique:  $h = \frac{W_2}{S} = 1,015 \text{ m}$ .

la hauteur totale de la cuve:  $H = h + 2h_c = 1,015 + 2(0,3) = 1,615 \text{ m}$ .

la hauteur occupée par l'air en régime normal; volume d'air =  $2 \text{ m}^3$ ;

volume elliptique du sommet  $0,35325 \text{ m}^3$ ;

volume de la partie cylindrique  $1,64675 \text{ m}^3$

Hauteur correspondante:  $h_a = \frac{1,64675}{1,76625} = 0,93 \text{ m}$

Donc le niveau normal dans le réservoir est à:  $h_a + h_c$  du sommet.

$$h_1 = h_a + h_c = 1,23 \text{ m}$$

Lors de la dépression, le volume augmente de:  $\Delta W = 0,25078 \text{ m}^3$ .

- hauteur correspondante:  $h_{\text{dep}} = \frac{W}{S} = 0,142 \text{ m}$ .

Hauteur maximale à partir du sommet:  $H_{\text{max}} = h_1 + h_{\text{dep}}$

$$H_{\text{max}} = 1,23 + 0,142$$

$$\boxed{H_{\text{max}} = 1,37 \text{ m}}$$

## CONCLUSION

Ce projet m'a permis d'approfondir mes connaissances sur le phénomène du coup de belier et les moyens de protection contre ses effets.

Il résulte de ce qui précède qu'il faut réduire au minimum la pression dans la canalisation.

J'ai cité les inconvénients du volant d'inertie et son utilisation restreinte aux courts refoulements; il peut rendre, néanmoins, service dans certaines installations car il ne nécessite aucun entretien.

Nous avons pu remarquer que dans le cas de protection de la pompe avec un clapet de retenue, l'augmentation de la pression derrière celui-ci peut être très violente, ce qui peut éclater la conduite.

Les vanteuses sont destinées principalement pour l'évacuation d'air englobé aux sommets de distorsion de la canalisation. La construction avec flotteur apparaît la plus encombrante et la plus économique et peut être très réalisable dans notre pays.

Les soupapes de sécurité sont des bons dispositifs, mais toutes erreurs dans le calcul de l'épaisseur de la membrane de rupture [augmentation par exemple] devrait être nuis à la canalisation, il faut que le choix de la membrane sera fait en fonction de la nature du liquide en jeu (basicité, acidité ou neutralité).

En adduction gravitaire une cheminée d'équilibre pourra être envisager comme moyen très efficace pour assurer la protection de la conduite et la maintenir pleine quelles que soient les modalités de

L'écoulement ou de l'exploitation.

La protection la plus simple est le réservoir d'air en bout de la conduite, ce réservoir pouvant jouer le rôle ; en exploitation courante, de récipient de dégazage.

Enfin, nous avons proposés des dispositifs avec éléments plastique (généralement en caoutchouc). La plasticité de ces éléments joue un rôle appréciable dans la protection. Ces dispositifs peuvent être réalisables en Algérie et peuvent être économique.

Le volume d'air nécessaire, dans ces cas et ainsi dans le cas d'un réservoir d'air, est calculé par les méthodes russes qui donnent directement le volume pour amortir une surpression (SP) calculée par la formule de Jawkovski, ce qui nous permet de ne pas passer par la méthode graphique de Bergeron ; c'est pour cela que nous n'avons pas pris en grande importance cette méthode.

---

---fin---

# Bibliographie

Michel HUG : Mécanique des fluides appliquée d'Aménagement et d'Energétique.

Edition : Eyrolles.

A. DUPONT : Hydraulique Urbaine : tome II.

Edition : Eyrolles.

\* M. CARLIER : Hydraulique générale et appliquée.

Edition : Eyrolles : 1972

\* L. BERGERON : Du coup de belier et coup de foudre en électricité.

Edition : Dunod : 1949.

\* R. GINOCCHIO : L'Energie Hydraulique

Edition : Eyrolles : 1978

\* A. LENCASTRE : Manuel d'Hydraulique Générale :

Eyrolles 1986

РУКОВОДСТВО

ПО ЗАЩИТЕ НАНОРНЫХ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ  
СИСТЕМ

ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ

ТБИЛИСИ 1981.

traduit par le promoteur M<sup>r</sup>. Metrivelli

"le coup de belier et les moyens de protection des installations"

Meisnuepda 1981.

