

ENSAM--74-5

**Publications**

**Scientifiques**

**et Techniques**

**1974**

**5**

We regret that some of the pages in the microfiche copy of this report may not be up to the proper legibility standards even though the best possible copy was used for preparing the master fiche.

7

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE

d'ARTS et METIERS

---

Publications Scientifiques et Techniques

---

ECOULEMENT DANS UNE CONDUITE DE SECTION CONSTANTE  
D'UN LIQUIDE QUI SE VAPORISE PARTIELLEMENT

par

L. VIVIER

Professeur à l'E.N.S.A.M. (Centre de PARIS)

VISUALISATION D'ECOLLEMENTS PAR BULLES

par

J.P. HENRY

Ingénieur à l'E.N.S.A.M. (Centre de PARIS)

---

Direction et Administration  
151, Bd de l'Hôpital - 75640 PARIS CEDEX 13

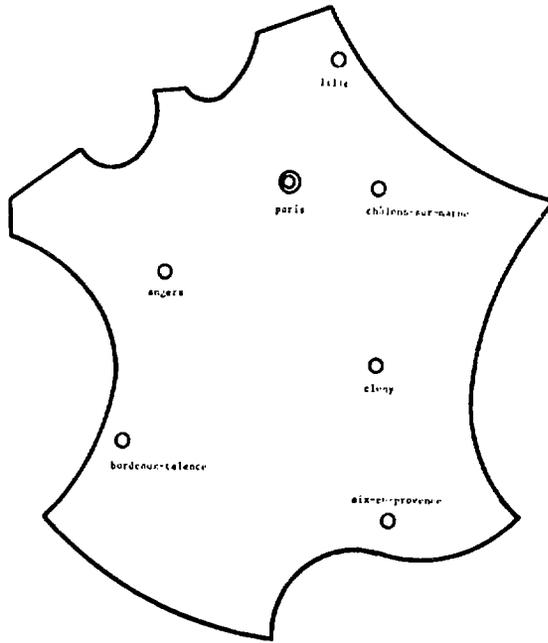
1974

5

PUBLICATIONS DEJA PARUES

- N° 1 BUTEES ET PALIERS HYDROSTATIQUES ALIMENTES  
1971 PAR DES SERIES D'ORIFICES  
par  
C. CHARCOSSET  
Professeur à l'E.N.S.A.M. (Centre de PARIS)
- N° 2 DETERMINATION AUTOMATIQUE DE STRUCTURES A JOINTS RIGIDES  
1972 par  
C. BERGER  
Professeur à l'E.N.S.A.M. (Centre de CHALONS/MARNE)
- COMPORTEMENT D'UN BETON EN SOLlicitATION TRIAXALE  
par  
H. GACHON  
Professeur à l'E.N.S.A.M. (Centre de PARIS)
- N° 3 ETUDE DYNAMIQUE DE LA DISTRIBUTION  
1972 DANS LES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE  
par  
B. GIRONNET et G. LOURADOUR  
Professeurs à l'E.N.S.A.M. (Centre de PARIS)
- N° 4 LES REGLEURS DE COURANT CONTINU DU TYPE HACHEUR  
1973 ET LEUR APPLICATION EN TRACTION ELECTRIQUE  
par  
F. LUCAS  
Maître de Conférence à l'E.N.S.A.M. (Centre d'AIX-EN-PROVENCE)

Centres de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers



- Centre régional
- ⊙ Centre interrégional

## S O M M A I R E

	Page
ECOULEMENT DANS UNE CONDUITE LI SECTION CONSTANTE D'UN LIQUIDE QUI SE VAPORISE PARTIELLEMENT.....	7
I - Etude du phénomène.....	10
II - Détermination du débit d'un tube de faisceau vaporisateur consécutif à une rupture franche accidentelle.....	17
III - Détermination du diamètre optimal d'une tuyauterie de transfert des purges des réchauffeurs d'eau d'alimentation d'une centrale thermique.....	25
<hr style="width: 20%; margin: 20px auto;"/>	
VISUALISATION D'ECOULEMENTS PAR BULLES.....	35
Introduction .....	37
1 - Détermination des vitesses $V(x_i, t)$ par la méthode chronophotographique.....	39
2 - Détermination des trajectoires $x = f(t)$ par la méthode photographique.....	48
Conclusion .....	55

ÉCOULEMENT DANS UNE CONDUITE DE SECTION CONSTANTE D'UN  
LIQUIDE QUI SE VAPORISE PARTIELLEMENT

Le phénomène de l'écoulement dans une conduite d'un fluide qui se vaporise partiellement a été étudié par MM. W. BENJAMIN et J.C. MILLER (Transactions of A.S.M.E. octobre 1942) qui en ont donné une explication claire et précise et mis en évidence l'existence d'un débit critique. Ils ont élaboré en plus une méthode numérique pour le calcul des conduites soumises à ces écoulements, en particulier les tuyauteries de purge.

Plus récemment Monsieur LIEBAUT a, sur le même problème, apporté une solution graphique plus rapide et plus sûre. (Le calcul des tuyauteries de purge. Publication de l'Institut Français des Combustibles et de l'Energie). Ayant eu, en dirigeant des travaux d'élèves effectués pour le compte d'E.D.F., l'occasion de nous occuper de ces écoulements nous avons été amenés à étudier une autre manière de procéder dans la détermination de ces conduites.

Nous tenons toutefois à préciser que la méthode exposée ci-après ne prétend pas à un caractère d'universalité. Conçue pour la résolution des deux problèmes bien précis qui nous furent posés, elle peut dans d'autres cas s'avérer d'un emploi plus malaisé.

Nous avons cru bon de rappeler rapidement la théorie du phénomène afin de ne pas exposer le lecteur non averti à un travail de recherche préalable. Cette partie n'a évidemment rien d'original et on la trouvera sous une autre forme dans les articles des auteurs indiqués ci-dessus.

---

Écoulement dans une conduite de section constante d'un  
liquide qui se vaporise partiellement

L'écoulement d'un fluide dans une conduite s'accompagne d'une chute de pression. Si ce même fluide est à une température et à une pression voisines de celles correspondant au début de vaporisation, la diminution de pression et l'apport des calories des frottements fluides provoquent la transformation d'une certaine quantité de liquide en vapeur.

L'existence de cette vapeur généralement négligeable en poids, mais rapidement importante en volume au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'origine de la conduite, produit une croissance rapide de la vitesse d'écoulement.

Dans certains cas, cette vitesse peut atteindre une valeur critique, le débit de la conduite se trouve stabilisé et devient totalement indépendant de la pression aval.

Le problème posé par ces écoulements est donc non seulement distinct de celui que l'on rencontre dans les conduites d'eau, mais également de celui posé par l'écoulement cylindrique classique des fluides compressibles, problèmes pour lesquels on n'a jamais affaire à un mélange des phases gazeuses et liquides en proportion variable.

Après l'exposé d'une théorie du phénomène, nous donnons la solution des deux problèmes qui nous ont amené à nous intéresser à l'étude de ces écoulements.

Le premier a trait à la détermination du débit d'un tube de faisceau vaporisateur d'un générateur de vapeur, débit consécutif à une rupture franche accidentelle. Dans le second, nous nous proposons de calculer le diamètre optimal d'une tuyauterie de transfert de purges des réchauffeurs d'eau d'alimentation d'une centrale thermique.

I - ETUDE DU PHENOMENE

Considérons (fig.1) un récipient R rempli d'eau à la pression  $p_0$  et à la température de vaporisation correspondante  $t_v$  et un tuyau de diamètre uniforme  $D$ , horizontal ou non, reliant la partie inférieure de ce récipient à

un autre récipient R' dans lequel règne la pression  $p_3$  ou débouchant dans une enceinte de dimensions théoriquement infinies où règne la même pression  $p_3$ . R est supposé suffisamment grand ou alimenté de telle manière que  $p_0$  et  $tv$  ne sont aucunement affectés au cours du temps par le débit de la conduite.

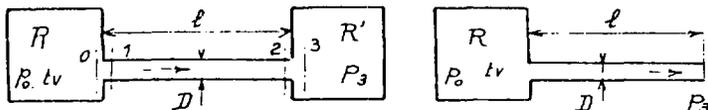


Fig. 1. Représentation schématique des écoulements étudiés.

En suivant l'écoulement d'une particule du fluide allant de R à R' nous distinguons trois étapes :

1 - De la zone 0 à l'amont immédiat de l'orifice du tube dans laquelle la vitesse  $v_0$  est nulle à la zone 1 à l'aval immédiat de ce même orifice où la vitesse est  $v_1$ , il y a mise en vitesse du fluide et perte de charge inhérente à celle-ci, la pression varie de  $p_0$  à  $p_1$

2 - De la zone 1 à la zone 2 à l'amont immédiat de l'orifice de sortie le fluide s'écoule dans la canalisation, la pression diminue jusqu'à la valeur  $p_2$  qui, dans certains cas, peut être supérieure à  $p_3$ , la vaporisation se produit et le titre du mélange liquide vapeur va en augmentant.

3 - Au débouché de la tubulure, détente et vaporisation éventuelle d'une partie ou de la totalité du liquide restant, dégradation de l'énergie cinétique des particules fluides jusqu'à la zone 3 où la vitesse est devenue pratiquement nulle.

Nous supposons que nous avons toujours affaire à un mélange homogène des phases gazeuse et liquide et nous appliquons au fluide au cours des deux premières étapes (la dernière ne présentant pas d'intérêt en ce qui concerne la solution du problème) l'équation générale de l'écoulement en régime permanent d'un fluide élastique.

$$\frac{v \cdot dv}{g} + d \cdot pv + dU + dz = dqe + \epsilon \zeta e \quad 1.$$

$V$ , vitesse,  $p$ , pression,  $v$ , volume spécifique,  $U$ , énergie interne,  $z$ , cote,  $q_e$ ,  $q_f$  chaleur et travail échangés avec l'extérieur ( $q_e = 0$ ).

De plus, si nous considérons un tube horizontal :  $dz = 0$ . Nous verrons plus loin l'influence d'une inclinaison du tube.

En remarquant que :

$$dU = dq_e + dq_f - pdv$$

La relation 1 devient :

$$\frac{V \cdot dV}{g} + v \cdot dp + dq_f = 0 \quad 2.$$

$dq_f$ , représentant les travaux de frottement transformés en chaleur (pertes de charge).

Entre les zones 0 et 1 l'équation 2 s'intègre par :

$$\frac{v_1^2}{2g} + \int_{p_0}^{p_1} v \cdot dp + q_{f_{01}} = 0$$

$q_{f_{01}}$  se réduit à la perte de charge par rétrécissement brusque que l'on prend généralement égale à :

$$\alpha \frac{v_1^2}{2g}$$

$\alpha$  variant suivant la manière dont la conduite est raccordée au réservoir, de 1 pour un orifice rentrant à 0,06 et même moins pour un orifice convenablement chanfreiné ou arrondi.

$$\int_{p_0}^{p_1} v \cdot dp = - (1 + \alpha) \frac{v_1^2}{2g} \quad 3.$$

L'expérience montre que la vaporisation ne commence qu'au-delà de l'embouchure du tube dans la partie contractée de la veine.

On schématise ce phénomène de retard :

- en supposant que l'espace 0-1 est franchi à la vitesse  $V_1$  par de l'eau liquide (dans les conditions régnant dans la zone 0)

- qu'au delà de la zone 1 la vaporisation se produit sans retard dans les conditions définies par une détente isentropique effectuée à partir des données initiales  $p_0, v_0$ .

L'équation 3 se simplifie et devient :

$$v_0 \Delta p_{01} = - (1 + \alpha) \frac{v_1^2}{2g} \quad 3'$$

Entre les zones 1 et 2, c'est-à-dire le long du tube, la valeur du terme dqf de l'équation 2 est donnée par la formule classique des pertes de charge en conduites cylindriques :

$$dqf = \lambda \frac{dl}{D} \frac{v^2}{2g}$$

pour un élément de longueur dl à l'extérieur duquel la vitesse d'écoulement est V.

Posons :

$$k_0 = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{D}$$

Nous admettrons  $\lambda$  (donc  $k_0$ ) constant pour un débit et un tube déterminés. En fait,  $\lambda$  est fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement qui varie le long de la conduite en raison de la variation de V, nous verrons plus loin la validité de l'hypothèse ainsi admise.

Posons également :

$$k_1 = \frac{S}{P}$$

invariable le long de la conduite.

S, section du tube, P, débit poids.

Dans ces conditions l'équation 2 devient :

$$dp = - \frac{1}{gk_1} (dV + k_0 \cdot V \cdot dl) \quad 4$$

dans laquelle on peut remplacer V par  $\frac{v}{k_1}$  car  $v = \frac{SV}{P} = k_1 V$

et dV par  $\frac{dv}{k_1}$

L'équation 4 se transforme en :

$$\frac{dl}{dp} = - \frac{gk_1^2}{k_0} \frac{1}{v} - \frac{1}{k_0} \frac{dv}{v} \quad 5$$

qui s'intègre par :

$$l = - \frac{g k_1^2}{k_0} \left( \frac{P}{P_1} \frac{dp}{v} - \frac{1}{k_0} \text{Log} \frac{v}{v_1} \right) \quad 6.$$

$\int_{P_1}^P \frac{dp}{v}$  peut être évaluée à partir des éléments fournis par les

tables des caractéristiques de la vapeur d'eau à condition que la loi d'évolution soit connue. Pour une conduite calorifugée il est normal de la supposer adiabatique.

#### Existence d'une vitesse critique

La longueur de conduite étant comptée positivement à partir de 0, la quantité  $\frac{dl}{dp}$  normalement négative change de signe pour :

$$\frac{dv}{dp} = - \varepsilon k_1^2 \quad 7.$$

Ce changement de signe étant physiquement inconcevable, la relation 7 ne peut être obtenue qu'à l'extrémité du tube. Cela signifie :

- que pour un tube de diamètre déterminé, une pression à l'origine donnée, il existe une longueur limite au-delà de laquelle on ne peut plus faire passer le débit prévu quelque soit la valeur de la pression aval

- que pour un tube de dimensions l et D et une pression initiale données, un abaissement de la pression aval au-dessous de la valeur critique ne modifie pas le débit.

Le volume spécifique du fluide croissant le long du tube en raison de la vaporisation provoquée par la détente et les chaleurs de frottements, la vitesse est maximale à l'extrémité du tube.

Il est intéressant de comparer cette vitesse critique à la célérité a de la propagation de l'onde de pression dans un fluide s'écoulant dans une conduite à parois rigides, exprimée par la relation :

$$a^2 = \frac{dp}{\rho}$$

$\rho$  masse spécifique du fluide au point considéré.

Soit avec :

$$\rho = \frac{1}{g v} \quad \text{et} \quad v = k_1 V : \quad \frac{dv}{dp} = -g k_1^2 \frac{v^2}{a^2} \quad 8.$$

Lorsque la relation 7 est satisfaite, la relation 8 exige :

$$\frac{v}{a} = 1$$

La vitesse critique est égale à la célérité de l'onde de pression dans le même milieu.

#### Cas du tube vertical

Dans ce cas l'équation 2 s'écrit :

$$V \cdot \frac{dV}{g} + k_1 \cdot V \cdot dp + k_0 \frac{v^2}{g} dl \pm dl = 0$$

+ courant ascendant, - courant descendant.

Ce qui conduit finalement à :

$$\frac{dl}{dp} \text{ tube vertical} = \frac{-g \frac{k_1^2}{k_0} \frac{1}{v} - \frac{1}{k_0} \frac{dv}{dp}}{1 \pm g \frac{k_1^2}{k_0} \frac{1}{v^2}} = \frac{\frac{dl}{dp} \text{ tube horizontal}}{1 \pm g \frac{k_1^2}{k_0} \frac{1}{v^2}} \quad 9.$$

L'intégration de l'équation 9 est évidemment plus pénible que celle de l'équation 5. Si une solution approchée est suffisante, on peut remarquer que pour un débit et des conditions de pression déterminés la longueur du tube vertical est égale à celle du tube horizontal modifiée au maximum dans le rapport :

$$\frac{1}{1 \pm g \frac{k_1^2}{k_0} \frac{1}{v_0^2}}$$

Loi de détente dans le tuyau

Nous avons admis une détente adiabatique du fluide dans le tuyau, mais ce fait ne suffit pas pour définir la loi d'évolution sur le diagramme entropique. Les pertes de charge entraînent un accroissement de l'entropie.

$$\Delta S_{02} = \Delta S_{01} + \Delta S_{12}$$

$$\text{Entre 0 et 1 : } \Delta S_{01} \approx \frac{qf_{01}}{T_{01}} \quad 10. \quad T_{01} = \frac{T_0 + T_1}{2}$$

$$\text{De 1 à 2 : } \Delta S_{12} = \int_1^2 \frac{dqf}{T} : \frac{\lambda}{2g \cdot D} \int_0^1 \frac{v^2 dl}{T} \quad 11.$$

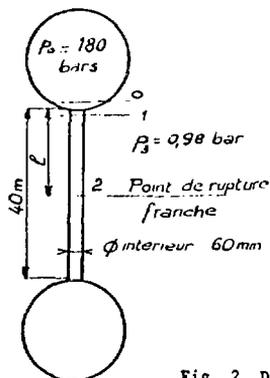
En réalité cet accroissement d'entropie reste très faible et l'évolution peut être représentée avec suffisamment de précision par une isentropique.

Dans le premier exemple,  $\Delta S$  calculé à partir des équations 10 et 11 avec les données des tableaux 1 (page 19) et 2 (page 20) ne dépasse jamais  $0,5 \cdot 10^{-3}$  kcal/kg.°, ce qui en fin de détente se traduit par une erreur infime sur le titre du mélange eau vapeur donc sur la vitesse d'écoulement.

Dans les exemples suivants les écarts sont encore plus faibles.

II - DETERMINATION DU DEBIT D'UN TUBE DE FASCEAU VAPORISATEUR  
CONSECUTIF A UNE RUPTURE FRANCHE ACCIDENTELLE.

Supposons un tube de faisceau vaporisateur de diamètre intérieur  
D = 60 mm rompu à la distance l du réservoir supérieur de la chaudière. Nous nous



proposons de déterminer, en fonction  
de l compris entre 0 et 40m, le débit  
s'échappant par les deux tronçons suppo-  
sés franchement séparés.

La pression dans les réservoirs, admis  
de contenance illimitée, est :  $p_0 = 180$   
bars.

La température de l'eau est celle de  
vaporisation sous cette pression soit  
 $t_v = 357^\circ\text{C}$ .

La pression  $p_3$  dans la chambre de com-  
bustion est sensiblement la pression  
atmosphérique.

Fig. 2. Disposition d'un tube  
de faisceau vaporisateur.

1- Détermination de la chute de pression à l'entrée du tube

(Zone 0-1) par mise en vitesse et perte de charge par rétrécissement  
brusque :  $\Delta p_{01} = p_0 - p_1$

La résolution de l'équation 3' n'offre pas de difficulté. Il suffit de  
se fixer diverses valeurs possibles du débit P.

Le diagramme de la figure 3 traduit les résultats obtenus avec :

$$\alpha = 0,1 \text{ vo (eau) } = 0,001840 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ et P variant de 55 à 170 kg/s.}$$

2 - Evolution du fluide à l'intérieur du tuyau

Pour chacun des débits envisagés tracer la courbe l (p) définie par  
l'équation 6, à partir de la valeur  $p_1$  déterminée ci-dessus et du volume  
spécifique  $v_1$  du mélange eau vapeur dans les conditions régnant dans la zone 1,  
le fluide évoluant suivant l'isentrope définie par les conditions  
initiales  $p_0$  vo.

Il convient donc :

a) de calculer le volume spécifique du mélange eau vapeur en détente isentropique, pour cela :

- se fixer un certain nombre de pressions intermédiaires, de 10 en 10 bars, par exemple, à partir de  $p_0 = 180$  bars

- calculer  $v$  sachant que :

$$v = v_{\text{eau}} + x.v_{\text{vapeur}} \quad x, \text{ titre, avec :}$$

$$x = \frac{s_0 - s'}{s'' - s'}$$

$s'$ , entropie de l'eau,  $s''$ , entropie de la vapeur saturée,  $s_0$ , entropie correspondant à la pression de départ (eau) :  $p_0 = 180$  bars.

$v_{\text{eau}}$ ,  $v_{\text{vapeur}}$ ,  $s_0$ ,  $s'$ ,  $s''$ , sont lues sur les tables des caractéristiques de la vapeur d'eau (1). Voir tableau 1.

b) de tracer la courbe  $\frac{1}{v}$  en fonction de  $p$  à partir de  $p_0 = 180$  bars

c) pour chaque valeur du débit  $P$

- d'évaluer graphiquement l'intégrale  $\int_{p_1}^p \frac{dp}{v}$  ( $p_1$ , pression à l'entrée du tube compte tenu de la mise en vitesse et de la perte de charge par rétrécissement brusque évaluée au § 1)

- de calculer la longueur  $l$  pour diverses valeurs de  $p$  au moyen de l'équation 6. Un tableau tel que celui indiqué ci-dessous (tableau 3), dressé pour  $P = 60$  kg/s facilite le tracé de la courbe  $l(p)$ , pour suivre ce tracé jusqu'au sommet, point au-delà duquel cette courbe n'a plus de sens physique.

Le tube est supposé horizontal, la correction de verticalité sera faite ensuite.

$\lambda$  fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité des parois pour un tube de diamètre donné est évalué au moyen de l'équation de Colebrook (voir diagramme fig.5). Les vitesses élevées d'écoulement, la faible viscosité

---

(1). Nous avons utilisé : Propriétés thermodynamiques de l'eau et de la vapeur d'eau. M.P. Voukalovitch. Dunod.

Tableau 1.

Détente isentropique à partir de  $p_e = 180$  bars

$$s_0 = 0,9248 \frac{\text{kcal}}{\text{kg. deg.}}$$

p bars (env.)	p kgf/cm <sup>2</sup>	v eau $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	v vapeur $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	s' $\frac{\text{kcal}}{\text{kg. deg.}}$	s'' $\frac{\text{kcal}}{\text{kg. deg.}}$	x	v $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$\frac{1}{v}$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
180	183,64	0,001840	0,007499	0,9243	1,2195	0	0,001840	544
170	172,81	0,001764	0,008425	0,9085	1,2381	0,0495	0,002094	478
160	162,52	0,001707	0,009379	0,8937	1,2544	0,0863	0,002369	423
150	152,73	0,001658	0,01037	0,8798	1,2690	0,116	0,002669	375
140	143,44	0,001615	0,01141	0,8663	1,2824	0,1405	0,002986	335
130	132,88	0,001569	0,01274	0,8510	1,2972	0,165	0,003412	294
120	122,95	0,001529	0,01417	0,8360	1,3111	0,187	0,003893	257
110	112,11	0,001488	0,01599	0,8191	1,3264	0,208	0,004512	222
100	102,02	0,001452	0,01801	0,8026	1,3411	0,227	0,005211	192
90	91,38	0,001416	0,02059	0,7842	1,3569	0,245	0,006114	164
80	81,60	0,001384	0,02351	0,7662	1,3720	0,262	0,007180	139
70	71,59	0,001352	0,02728	0,7461	1,3884	0,278	0,008560	117
60	61,60	0,001320	0,03220	0,7240	1,4060	0,294	0,010399	96,2
50	51,05	0,001286	0,03938	0,6978	1,4266	0,304	0,013514	74
40	40,56	0,001251	0,05006	0,6672	1,4503	0,320	0,017660	56,6

Tableau 2.

P kg/e	50	55	60	70	80	90	100
$1,1 \frac{V^2}{2g}$ m	59,3	71,6	85,4	116	152	192	237
P kg/s	110	120	130	140	150	160	170
$1,1 \frac{V^2}{2g}$ m	287	332	402	465	535	610	685

Fig. 3. Détermination de la pression  $p_1$  à l'entrée de la conduite et du débit maximal

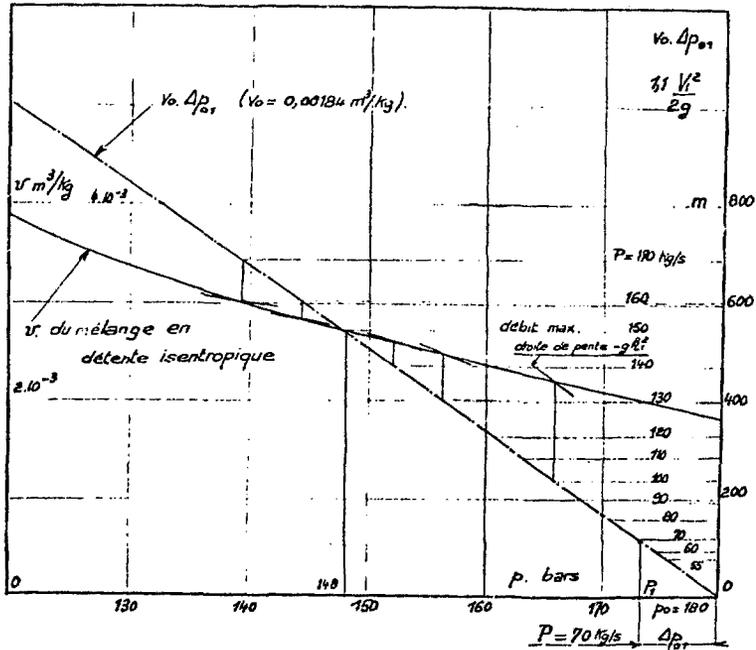


Tableau 3.

$P = 60 \text{ kg/s}$	$p_1 = 175,4 \text{ bars}$
	$v_1 = 1960 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$
	$k_1^2 = 22,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4/\text{s}^2/\text{kg}^2$

P bars	$\frac{g \cdot k_1^2}{k_0} \int_{p_1}^P \frac{dp}{v} \text{ m.}$	$\frac{1}{k_0} \text{Log} \frac{v}{v_1} \text{ m}$	1 m
175,4	0	0	0
170	3,43	0,475	2,955
160	10,10	1,33	8,77
150	16,05	2,12	13,93
140	21,28	2,88	18,4
130	26	3,76	22,24
120	30,05	4,62	25,43
110	33,6	5,6	28
100	36,7	6,58	30,12
90	39,3	7,65	31,65
80	41,5	8,7	32,8
70	43,5	9,9	33,6
60	45	11,2	33,8
50	46,2	12,9	33,3

de l'eau à température élevée, conduisent à des valeurs de  $Re (> 10^7)$  telles que  $\lambda$  est pratiquement indépendant du Reynolds.

Nous prenons  $\lambda = 0,018$  d'où  $k_0 = 0,15 \text{ m}^{-1}$

Les débits possibles n'augmentent pas indéfiniment, il existe un maximum correspondant à une longueur de tube nulle. Pour le déterminer remarquer que pour  $l = 0$ ,  $v_2 = v_1$  l'équation donne :

$$\left. \frac{dv}{dp} \right|_1 = -gk_1^2$$

ce qui conduit à rechercher graphiquement le débit pour lequel la pente de la tangente à la courbe  $v(p)$  du mélange a pour valeur  $-gk_1^2$  au point d'abscisse  $p_1$ .

Dans le cas envisagé le débit maximal est de 150 kg/s environ correspondant à  $p_1 = p_2 = 148$  bars. Voir fig. 3

On obtient ainsi, figure 4, le faisceau des courbes  $l(p)$  de paramètre  $P$  limitées à leur sommet, point pour lequel la vitesse limite est atteinte. Etant donnée la pression qui règne dans la chambre de combustion, la vitesse limite est toujours atteinte quelque soit le point de rupture du tube et la courbe utile pour la solution du problème posé est celle qui joint les sommets des caractéristiques  $l(p)$ . Cette courbe est cotée en débits et c'est sur elle que nous avons porté la correction de tube vertical courants ascendant et descendant, qui est surtout sensible pour les faibles débits.

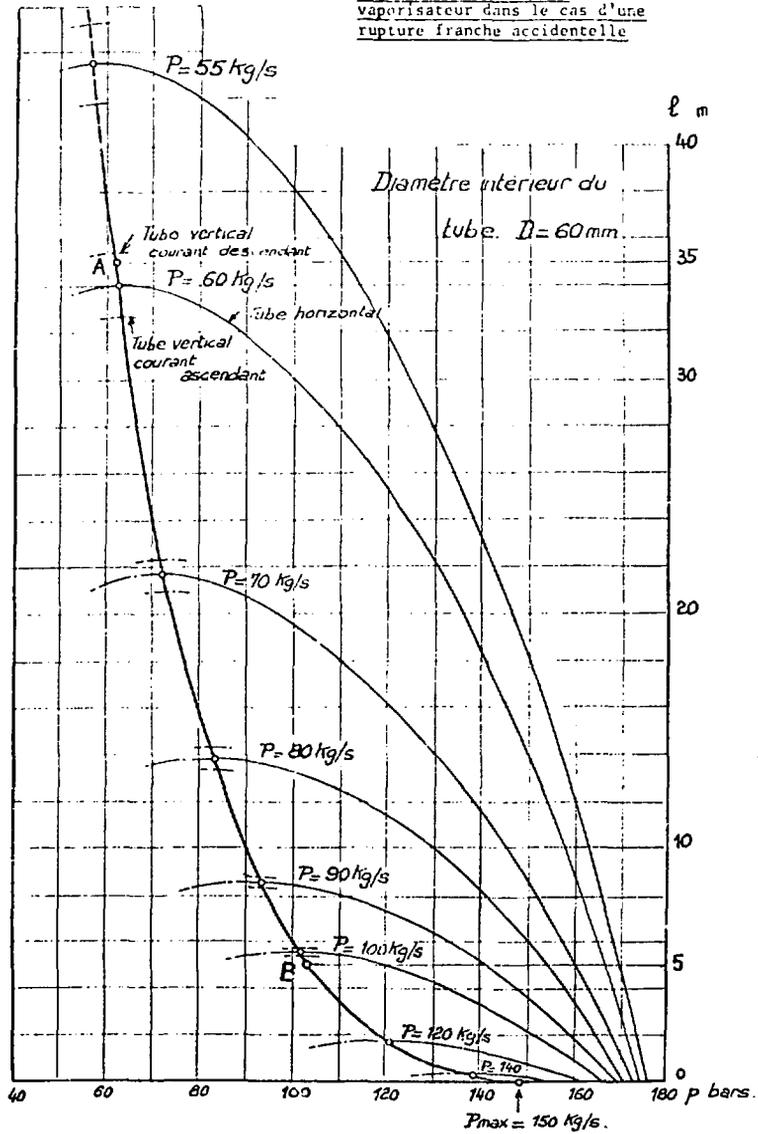
#### Exemple d'utilisation

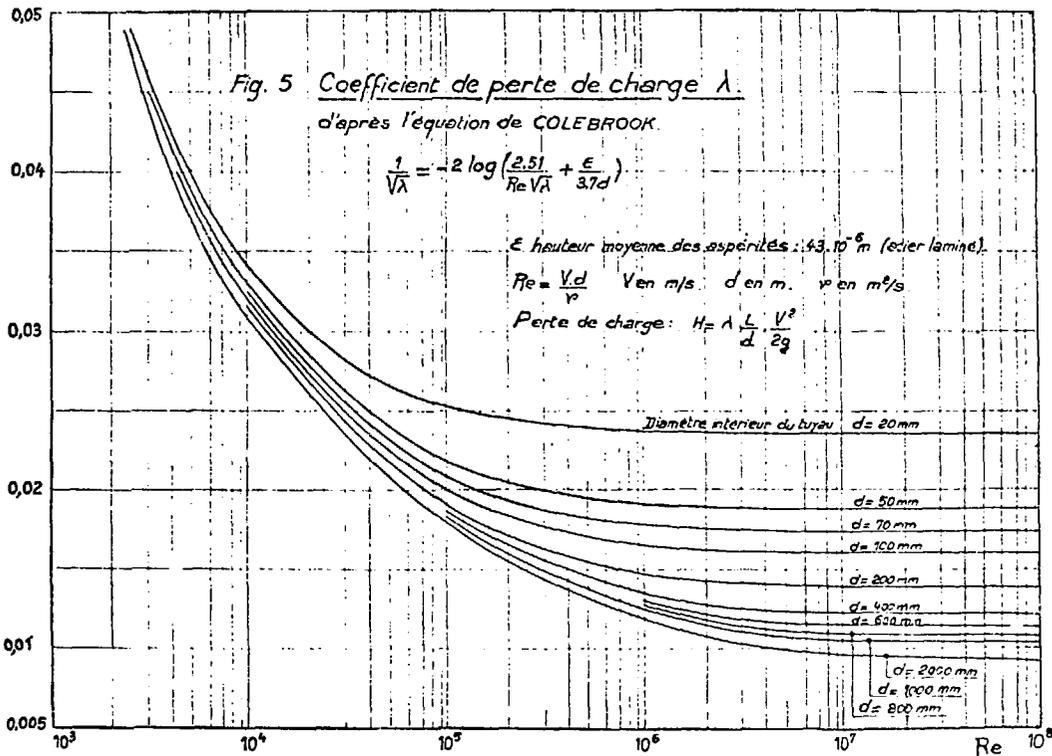
Tube rompu à 35 m du réservoir supérieur.

Débit par le tronçon supérieur, courant descendant : environ 60 kg/s  
point A.

Débit par le tronçon inférieur, courant ascendant : environ 102 kg/s  
point B.

Fig.4. Débit d'un tube vaporisateur dans le cas d'une rupture franche accidentelle





III - DETERMINATION DU DIAMÈTRE OPTIMAL D'UNE TUYAUTERIE DE TRANSFERT DES PURGES D'UN RECHAUFFEUR D'EAU L'ALIMENTATION D'UNE CENTRALE THERMIQUE

Données du problème :

Débit à transférer :  $P$  kg/s

Longueur du tube : 1 m. Voir figure 1.

Réservoir amont : pression  $p_0$ , température  $t_v$  (eau)

Réservoir aval : pression  $p_3$ , température  $t'$  v (vapeur).

$t_v$  et  $t'$  respectivement températures de vaporisation aux pressions  $p_0$  et  $p_3$ .

Principe du calcul

Admettons une détente isentropique à partir de  $p_0$  et traçons, comme nous l'avons fait dans le problème précédent, les courbes  $l(p)$  définies par l'équation 6 en gardant cette fois le débit constant et en prenant comme

paramètre le diamètre  $D$  du tube. Nous obtenons un faisceau analogue à celui de la figure 4 que nous schématisons sur la figure 6. Les courbes  $l(p)$  n'ont un sens physique qu'à droite de la ligne  $\Gamma$  qui joint leurs sommets et qui partage le plan  $l-p$  en deux parties A et B.

Dans le domaine A la vitesse limite n'est pas atteinte au cours de l'écoulement et la pression  $p_2$  qui règne dans la veine débouchant du tube dans l'enceinte  $R'$ , est égale à  $p_3$ , en conséquence un tube de diamètre  $D_1$ , de longueur  $l$ , évacue un débit  $P$  entre les pressions  $p_0$  et  $p_3 = p_2$ , point représentatif : M

Dans le domaine B, la vitesse limite est atteinte et  $p_2$  est supérieure à  $p_3$ , le point représentatif de l'écoulement, N, se place sur  $\Gamma$ . Dans ces conditions, une conduite de longueur  $l$

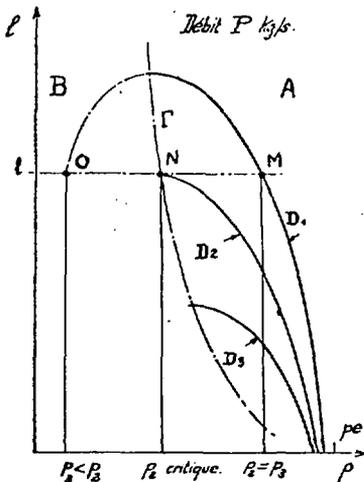


Fig.6. Courbes  $l(p)$  à débit constant

assurera le débit prévu si son diamètre est  $DZ$ , paramètre de la courbe  $l(p)$  dont le sommet est en  $N$ .

Le tracé du réseau des courbes  $l(p)$  telles que nous venons de les définir n'est toutefois pas nécessaire pour la résolution du problème, lorsque la vitesse limite n'est pas atteinte au cours de l'écoulement.

La vitesse limite n'est pas atteinte

Négligeons, en première approximation, la chute de pression à l'entrée du tube par mise en vitesse et perte de charge par rétrécissement brusque (zone 0-1)

L'équation 6 :

$$l = - \frac{g k_1^2}{k_0} \int_{P_0 = P_1}^{P_2} \frac{dp}{v} - \frac{1}{k_0} \text{Log} \frac{v_2}{v_0}$$

qui régit l'écoulement à l'intérieur du tube dans la zone 0-1 devient en exprimant  $k_0$  et  $k_1$  en fonction de  $D$  :

$$l = - \left[ \frac{g \pi^2}{8} \frac{1}{\lambda P^2} \right] \int_{P_0 = P_1}^{P_2} \frac{dp}{v} \quad D^5 - \frac{2}{\lambda} \text{Log} \frac{v_2}{v_0} \quad D \quad 12.$$

Il convient évidemment de donner à  $\lambda$  une valeur arbitraire mais plausible et de supposer l'écoulement caractérisé par un Reynolds suffisamment élevé pour justifier l'invariabilité de ce coefficient tout le long de la tuyauterie. Hypothèse dont il conviendra de vérifier l'exactitude par la suite.

Dans le cas où la vitesse limite n'est pas atteinte, la pression dans le jet débouchant librement dans l'enceinte,  $R'$  est  $p_3$  et les expressions

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dp}{v} = \int_{P_0}^{P_3} \frac{dp}{v} \quad \text{et} \quad \text{Log} \frac{v_3}{v_0} = \text{Log} \frac{v_2}{v_1}$$

peuvent être calculées (détente isentropique).

L'expression 12 devient une équation du 5ème degré en  $D$  dont la résolution ne présente pas de difficulté.

Cette première approximation du diamètre permet :

- d'estimer la chute de pression à l'entrée du tube, équation 3, inconnue  $p_1$

- de rectifier, s'il y a lieu, la valeur de  $\lambda$  adoptée
  - de donner une nouvelle expression de l'équation 12 conduisant à une nouvelle approximation du diamètre meilleure que la première et ainsi de suite.
- En pratique, on peut s'en tenir à cette dernière valeur.

Il convient de vérifier l'hypothèse relative à la vitesse limite qui ne doit pas être atteinte, ceci se traduit par une valeur négative de  $\frac{dl}{dp}$  (équation 5) dans les conditions régnant à l'extrémité du tube.

Exemple 1.

Débit :  $F = 23,75$  kg/s. Longueur du tube :  $l = 10$  m.

Réservoir amont :  $p_0 = 21$  kgf/cm<sup>2</sup> (eau à la limite de vaporisation).

Réservoir aval :  $p_3 = 16$  kgf/cm<sup>2</sup> (vapeur à la limite de saturation).

Les pressions indiquées sont des pressions absolues.

Pretons  $\lambda = 15 \cdot 10^{-3}$ . Dans ces conditions :

$$\frac{1}{k_0} = 133,33 D$$

$$\frac{g \cdot k_1^2}{k_0} = 1,43 D^5$$

En envisageant une détente isentropique à partir de  $p_1 = p_0 = 21$  kgf/cm<sup>2</sup>

nous calculons  $\int_{p_0}^{p_3} \frac{dp}{v}$  de la même manière que précédemment (voir

problème II § 2). On trouve :

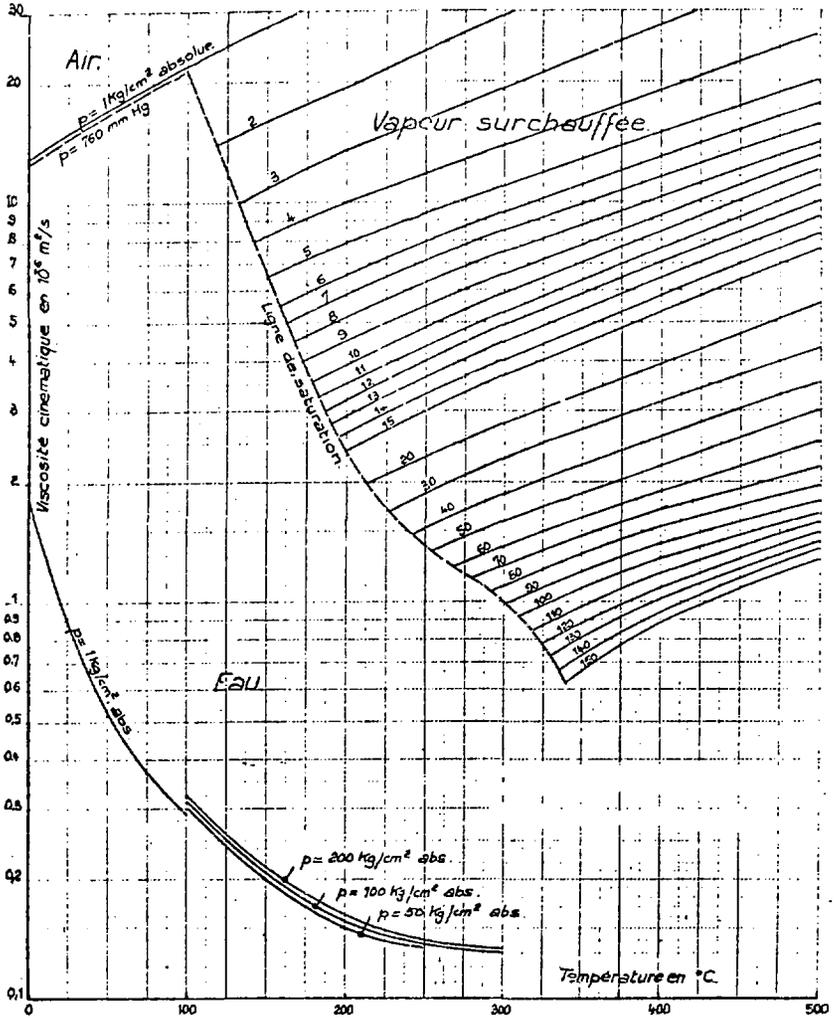
$$\left\{ \begin{array}{l} p_3 = 16 \text{ kgf/cm}^2 \\ \int_{p_0}^{p_3} \frac{dp}{v} = -20,525 \cdot 10^6 \text{ kgf}^2 \cdot \text{m}^{-5} \\ p_0 = 21 \text{ kgf/cm}^2 \\ \text{Log} \frac{v_3}{v_0} = 1,4487 \end{array} \right.$$

L'équation 12 devient :

$$29,35 \cdot 10^6 D^5 - 193,2 \cdot D - 10 = 0$$

qui conduit à :

$$D = 0,0593 \text{ m} \quad (59,3 \text{ mm})$$



**Fig.7 Viscosité cinématique**  
**Eau. Air. Vapeur surchauffée**

La correction de mise en vitesse et perte de charge initiale peut maintenant être effectuée par résolution de l'équation 3' d'une manière analogue à celle utilisée au problème II 5 1.

On obtient ainsi :  $p_1 = 18,25 \text{ kgf/cm}^2$ .

La rectification de  $\lambda$  demande la connaissance du nombre de Reynolds à l'entrée du tube où :

$$V_1 = 7,62 \text{ m/s}, \quad t_1 = 206,7 \text{ }^\circ\text{C}, \quad x_1 = 0 \quad Re_1 = 3,25 \cdot 10^6$$

et à la sortie où :

$$V_2 = 20,11 \text{ m/s}, \quad t_2 = 200,4 \text{ }^\circ\text{C} \quad x_2 = 0,03 \quad Re_2 = 8,30 \cdot 10^6$$

La viscosité cinématique étant déterminée au moyen du diagramme fig. 7  $Re$  est suffisamment élevé pour que ses variations le long de la conduite n'influent pas sensiblement sur  $\lambda$  qui peut être pris égal à  $17,5 \cdot 10^{-3}$ , voir diagramme figure 5.

Dans ces conditions l'équation 12 devient :

$$1 = -1,5 \left\{ \begin{array}{l} p_3 = 16 \text{ kgf/cm}^2 \\ \frac{dp}{v} \\ p_1 = 18,25 \text{ kgf/cm}^2 \end{array} \right. D^5 - 114 \cdot \log \frac{v_3}{v_1} D$$

$$\text{soit : } 17,9 \cdot 10^6 \cdot D^5 - 110,5 \cdot D - 10 = 0$$

$$\text{qui donne : } D = 0,062 \text{ m (62 mm)}$$

Une précision plus grande n'est pas nécessaire,  $D$  devant être choisi parmi les diamètres normaux des tubes dont le plus proche est 66 mm (tube de  $2 \frac{1}{2}$  ").

La valeur de  $\frac{dl}{dp}$  calculée au moyen de l'équation 5 dans les conditions à la sortie du tube est :

$$\frac{dl}{dp} = -302 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kgf}^{-1}$$

qui confirme que la vitesse limite n'est pas atteinte.

La vitesse limite est atteinte

Le diamètre  $D_1$  calculé par l'équation 12 dans laquelle on a posé  $P_2 = P_3$  caractérise une courbe  $l(p)$  passant par le point figuratif 0 (figure 6)

qui appartient à la branche dénuée de sens physique. Cette valeur ne donne évidemment pas la solution du problème mais elle est utile car, ainsi que de nombreux exemples nous l'ont montré, le diamètre  $D_1$  trouvé n'est pas très éloigné de la valeur réelle. Il devient donc possible à l'aide de cette valeur :

- d'effectuer la correction de chute de pression à l'entrée du tube et la rectification de  $\lambda$  adopté a priori.

- de limiter les tâtonnements dans le choix des diamètres à essayer pour définir le réseau des courbes  $l(p)$  à débit constant qu'il est nécessaire cette fois de tracer, au moins ce qui s'avère indispensable pour encadrer le point N avec la précision désirée.

### Exemple 2

Débit :  $P = 33,24$  kg/s. Longueur du tube :  $l = 10$  m.

Réservoir amont :  $p_0 = 0,19$  kgf/cm<sup>2</sup> (eau à la limite de vaporisation).

Réservoir aval :  $p_3 = 0,035$  kgf/cm<sup>2</sup> (vapeur à la limite de saturation)

Les pressions indiquées sont des pressions absolues.

Prenons  $\lambda = 16.10^{-3}$ , dans ces conditions :

$$\frac{1}{k_0} = 125 D \qquad \frac{g \cdot k_1^2}{k_0} = 0,685 D^5$$

Une détente isentropique de  $p_1 = p_0 = 0,19$  kgf/cm<sup>2</sup> à  $p_2 = p_3 = 0,035$  kgf/cm<sup>2</sup>

conduit à :

$$\int_{p_0 = 0,19 \text{ kgf/cm}^2}^{p_3 = 0,035 \text{ kgf/cm}^2} \frac{dv}{p} = - 32846 \text{ kgf}^2 \text{ m}^{-5} \qquad \text{Log } \frac{v_3}{v_1} = 7,64$$

et :

$$22500. D^5 - 955. D - 10 = 0 \qquad \text{soit } D = 0,455 \text{ m.}$$

La correction de mise en vitesse et perte de charge initiale est négligeable :  $p_1 = p_0$ . Nous pouvons donc tracer les courbes  $l(p)$  en essayant quelques diamètres inférieurs à 0,455 m permettant d'encadrer la valeur  $l = 10$ m. Nous avons essayé successivement 0,43 m. puis 0,42 m. 0,428 m. et enfin 0,427 m qui donne la solution. Figure 8.

On remarquera la faible chute de pression entre l'entrée et la sortie de la tuyauterie ainsi que la valeur particulièrement basse de la vitesse limite :  $V \text{ limite} = 0,325 \text{ m/s}$ .

La valeur de  $\lambda$  varie légèrement entre l'entrée et la sortie du tube (de  $15,5 \cdot 10^{-3}$  à  $16,25 \cdot 10^{-3}$ ). Si une grande précision est recherchée, il est possible de tenir compte de ce fait dans la détermination de  $l$  par l'équation 6 au prix d'une légère complication du calcul.

### Conclusion

Le diamètre trouvé est un diamètre optimal en ce sens qu'il est le seul qui, dans les conditions amont et aval prévues, permettra d'assurer l'écoulement du débit imposé.

La valeur ainsi déterminée peut conduire à une vitesse d'écoulement excessive, tout au moins dans la partie terminale du tuyau. Si le critère d'usure de la conduite est défini par la quantité de mouvement par unité de temps (1) :

$$\frac{P \cdot V}{g} \leq 24 \text{ kgf.} \quad 13$$

$P$ , débit en poids,  $V$ , vitesse en m/s,  $g$  accélération de la pesanteur.

Il est évident que le diamètre trouvé dans le premier exemple ne convient pas, il devient nécessaire de choisir une valeur plus grande, si le débit est impétatif un organe de réglage s'impose.

La présence de celui-ci, s'il est placé en amont, se traduit sur le diagramme 1 (p) par une perte de charge  $\Delta p$  et le déplacement (ainsi que la déformation) de la courbe de paramètre  $D_2$ . Figure 9.

Le fait que la vitesse limite soit atteinte au cours de l'écoulement n'est pas obligatoirement l'indice d'un risque d'usure par érosion, cette vitesse pouvant être particulièrement basse ainsi que le montre le second exemple.

---

(1) Ce critère d'origine américaine a été indiqué par Monsieur Liebaut dans son article : Le calcul des tuyauteries de purge. Publication de l'Institut Français des combustibles et de l'énergie.

Debit:  $P = 33,24 \text{ Kg/s}$ .

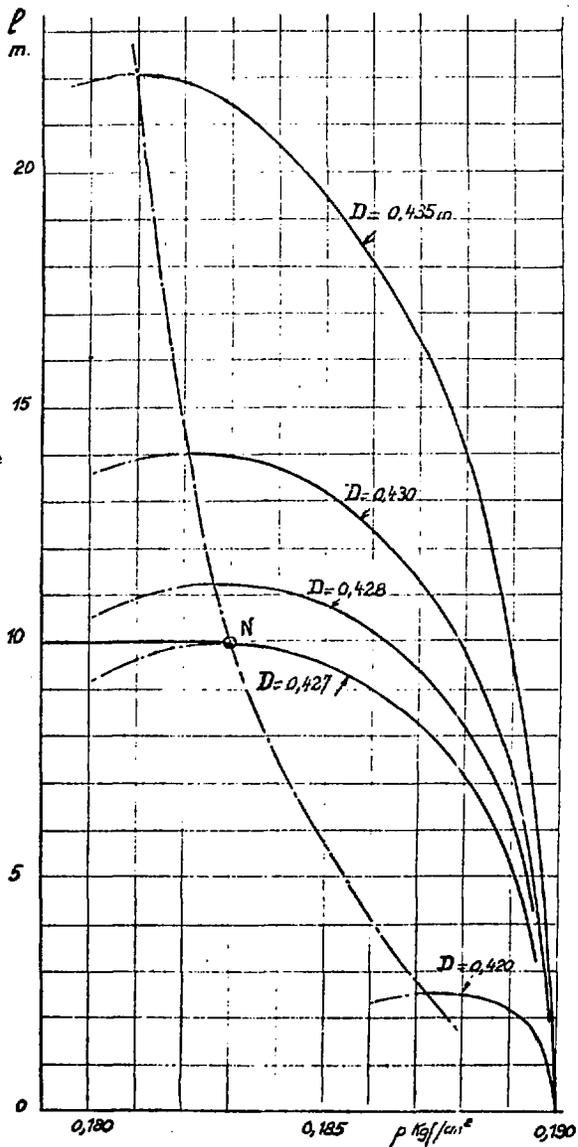


Fig.8

Recherche du diamètre  
d'une tuyauterie de  
transfert de purge  
(cas où la vitesse  
limite est atteinte)

Le diamètre optimum  
est  $D = 427\text{mm}$

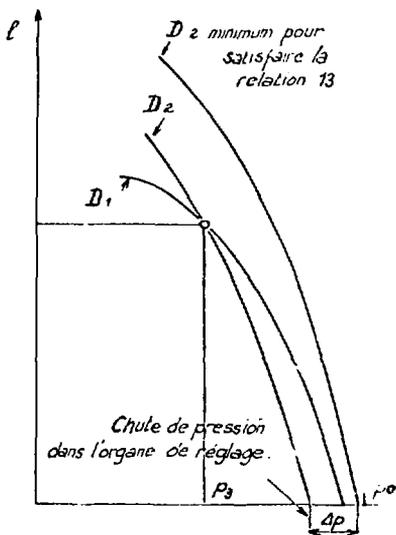


Fig. 9 Utilisation d'un tube  $\overline{D_2} > D_1$  avec organe de réglage de débit

Le calcul des tuyauteries de transfert de purges tel que nous l'avons indiqué ci-dessus, exige un travail assez long, en raison de l'intégration graphique des expressions  $\int v dp$  et  $\int \frac{dp}{v}$ . Ce calcul peut toutefois se justifier dans le cas d'installations importantes.

On peut aussi songer à l'établissement d'une série d'abaques, mais les paramètres en jeu, pressions de départ, débits, diamètres des conduites sont très nombreux et le nombre des diagrammes nécessaires risque, si l'on recherche une précision suffisante, de devenir prohibitif.

VISUALISATION  
D'ÉCOULEMENTS  
PAR BULLES

## INTRODUCTION

---

La connaissance d'un écoulement aérodynamique sur ou autour d'un obstacle, en fluide incompressible subsonique est complète si l'on connaît en tout point le coefficient local de pression.

Ce coefficient peut-être déterminé :

- soit par la mesure de la pression locale P :  $C_p = \frac{P - P_0}{q_0}$

- soit par la mesure de la vitesse V :  $C_p = 1 - \left( \frac{V}{V_0} \right)^2$

Dans le cas d'écoulements tridimensionnels ces méthodes sont difficilement applicables et ne permettent pas de déterminer : les composantes u, v, w, de la vitesse, les trajectoires et les lignes de courant de particules.

Les méthodes consistant à introduire au sein du fluide des particules de même densité, permettent par observation de déterminer (sans perturber l'écoulement), pendant un temps très court, le champ des vitesses  $V(x_i, t)$ , les lignes de courant si la quantité de particules injectées est suffisante et, pendant un temps très long, la détermination des trajectoires  $x_i = f(t)$  de particules.

Les méthodes conventionnelles utilisées pour rendre visible l'écoulement de l'air consistent à fixer les fils de laine sur les maquettes à étudier, ou à insuffler de la fumée dans le tunnel, mais on s'aperçoit que les fils ne renseignent que là où ils ont été préalablement fixés et la fumée présente l'inconvénient de se dissiper trop rapidement. Les particules matérielles (poudres, flocons, bulles...) par contre se dégradent très peu sous l'effet cinétique.

Les bulles de savon, gonflées par un gaz de densité plus faible que celle du fluide, peuvent convenir, sous certaines conditions, à la résolution de ce problème ; elles se doivent d'être résistantes pour parcourir tout le champ d'exploration, sans éclater, ni changer de texture et assez petites pour permettre une exploration précise du champ aérodynamique ; cette visualisation par bulles ne remplace pas celle, classique de mesure de pression à la paroi, mais fournit des informations supplémentaires, précieuses à l'aérodynamicien au voisinage de l'obstacle et plus particulièrement, à la mise en évidence : des zones tourbillonnaires, des décollements, et, éventuellement, de la recirculation.

Une étude des possibilités d'applications des bulles de savon à la visualisation d'écoulements a fait l'objet d'un mémoire<sup>(1)</sup> dans lequel sont traités d'une part, une étude des caractéristiques physiques des bulles : masse, pression interne, vitesse limite de la chute  $C_x$ , d'autre part, des recherches expérimentales à caractère appliqué.

(1) J.P. HENRY : Chronophotographie des champs aérodynamiques  
Mémoire CRAM 1972.

1 - DETERMINATION DES VITESSES  $V(x_i, t)$  PAR LA METHODE CHRONOPHOTOGRAPHIQUE

La détermination de la vitesse d'une particule consiste à éclairer un domaine limité du champ de visualisation et à photographier la particule diffusante<sup>(2)</sup> de manière à ce qu'aucune lumière directe ne pénètre dans les objectifs de prise de vues ; cette méthode, combinée à un dispositif d'éclairage par stroboscope, permet la mesure de la vitesse d'une particule.

Les positions successives de celle-ci à des intervalles de temps connus permettent de déterminer la vitesse moyenne en différents points du champ, en mesurant sur le cliché l'élément de trajectoire  $\Delta s$ , parcouru pendant le temps  $\Delta t$  séparant deux photographies du phénomène.

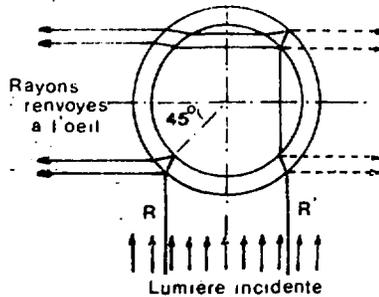


Fig.1. Chemins optiques des rayons lumineux issus d'une bulle.

(2) - Le cheminement des rayons optiques au travers d'une bulle peut s'analyser de la façon suivante : si un rayon R aboutit sur la sphère au point de latitude  $\theta > 45^\circ$  (Fig.1.), il est renvoyé directement à l'oeil après une seule réflexion, tandis qu'un autre R', qui aboutit au point diamétralement opposé, est renvoyé après une réflexion et deux réfractions.



En réalité si l'on considère un éclairage monochromatique, il y a d'autres réfractons dans l'épaisseur des parois qui dédoublent chaque rayon. Enfin si nous observons en lumière blanche des bulles à très mince paroi, les différentes radiations se sépareront et l'intervalle compris entre deux traits aura un aspect irisé ; il se trouve que dans ces conditions moyennes, la légèreté à laquelle on arrive alors est précisément celle nécessaire et suffisante pour que les bulles suivent exactement toutes les singularités de l'écoulement.

### 1.1. LA SOUFFLERIE

La plupart des visualisations présentées ont été obtenues dans la soufflerie de l'ENSAM, dont la vue en plan est donnée par la figure 2.

Cette soufflerie est du type à retour et à veine semi-guidée. La vitesse maximale est de 40 m/s dans une veine d'expérience de section  $1,35 \times 1,65 \text{ m}^2$ . La longueur de la veine dépasse 1,80m, ce qui autorise la mise en place en aval des modèles ou maquettes à étudier d'éléments annexes de montage, tels que : miroir, projecteur, etc...

### 1.2. L'INJECTEUR

L'injection d'une bulle au sein du fluide est obtenue par un dispositif représenté schématiquement fig.3

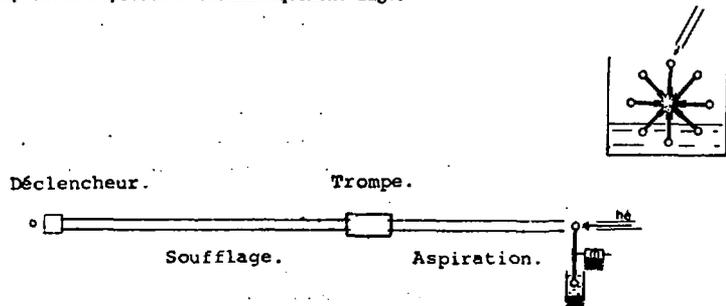


Fig.3. Schéma de principe de l'injecteur.

Ce dispositif est constitué d'un anneau plongeant dans le liquide tensio-actif ; par un mouvement de rotation un voile liquide se présente devant le tube de l'éjecteur, un jet d'hélium gonfle et détache une bulle qui se trouve aspirée et soufflée au moyen d'une trompe. Un dispositif électronique placé à l'extrémité de l'injecteur déclenche simultanément les obturateurs des appareils photographiques.

### 1.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Des essais effectués ont permis de préciser quelques caractéristiques d'écoulements autour de modèles en soufflerie aux vitesses moyennes  $V_0 < 30$  m/s et pour des nombres de Reynolds  $Re < 5.10^5$  avec  $Re = \frac{V_0 L}{\nu}$  où L est une longueur de référence de la maquette et  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide.

#### 1.3.1. Etude sur modèle rigide d'une tour de grande hauteur

La détermination des effets du vent naturel sur les édifices, en vue d'applications techniques est un problème complexe sous la forme générale<sup>(3)</sup>. Cette complexité a plusieurs causes parmi lesquelles :

- L'inégalité de régime des vents naturels quant à la vitesse et l'orientation.
- La grande variété de forme des constructions actuelles.
- L'importance des interactions (effet de masque) qui s'exercent entre édifices voisins.

Les essais en soufflerie sont effectués sur des modèles dont l'échelle géométrique est connue : le vent de soufflerie peut représenter convenablement le vent naturel à condition de respecter certains critères de qualité : gradient et turbulence.

(3) - Le lecteur trouvera des détails dans les annales de l'I.T.B.T.P. N°38  
Aérodynamique du bâtiment et des ouvrages d'art,  
par : G.WIANECKI et J.DRIVIERE.

La figure 4. mémorise une étude de l'écoulement autour du modèle rigide en forme elliptique représentant à l'échelle 1/200 la Tour de la Villette.

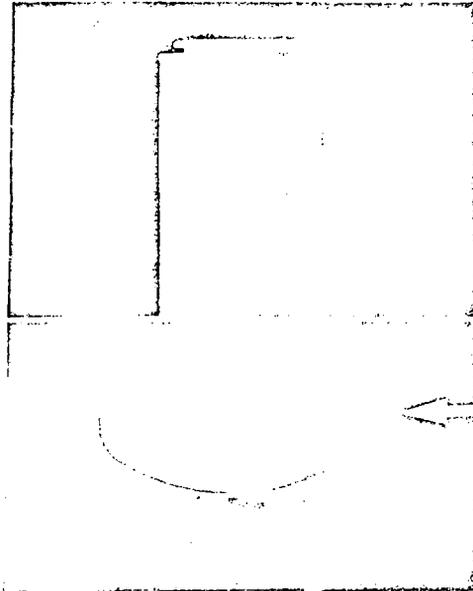


Fig.4. Ecoulement autour d'un modèle en soufflerie

vues simultanées a) suivant OY  $V_0 = 4 \text{ m/s}$

b) suivant OZ  $f = 167 \text{ Hz}$

$R = 6,610^4$

$i = 0^\circ$

Les composantes  $V_x$ ,  $V_y$  et  $V_z$  de la vitesse peuvent être déterminées en fonction de l'abscisse du point de mesure ; la connaissance du rapport  $\frac{V_{\text{bulle}}}{V_0 \text{ amont}}$  permet alors de déterminer en tout point de la trajectoire, le

coefficient de pression local  $C_p = 1 - \left(\frac{v}{V_0}\right)^2$

### 1.3.2. Etude de la déflexion

La figure 5 est relative à l'étude de la deflexion au sommet d'un groupe d'immeubles. L'examen de cette figure montre que :

a) - La déflexion est produite par le décollement de l'air au niveau de l'arête amont de la tour nord.

La trajectoire qui tangente cette arête met en évidence la limite du sillage du sommet de cette tour.

b) - L'influence mutuelle des tours se fait sentir par l'effet d'écran : la bulle vient mourir au sommet de la tour sud.

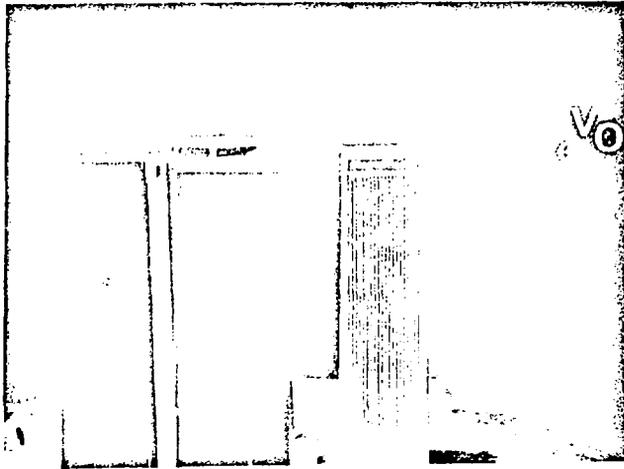


Fig.5. Etude de la déflexion au sommet d'une tour.

### 1.3.3. Etude de l'écoulement de l'air au travers d'une hélice ventilateur

L'étude d'un circuit de refroidissement de moteur de véhicule automobile est assez complexe si l'on veut concilier l'efficacité et l'absorption minimale de puissance ; les emplacements des prises d'air

et d'orifices d'évacuation ont à cet égard une très grande importance.

La méthode de visualisation trouve ici une nouvelle application, le cliché de la figure 6 montre les trajectoires de bulles en aval du ventilateur.

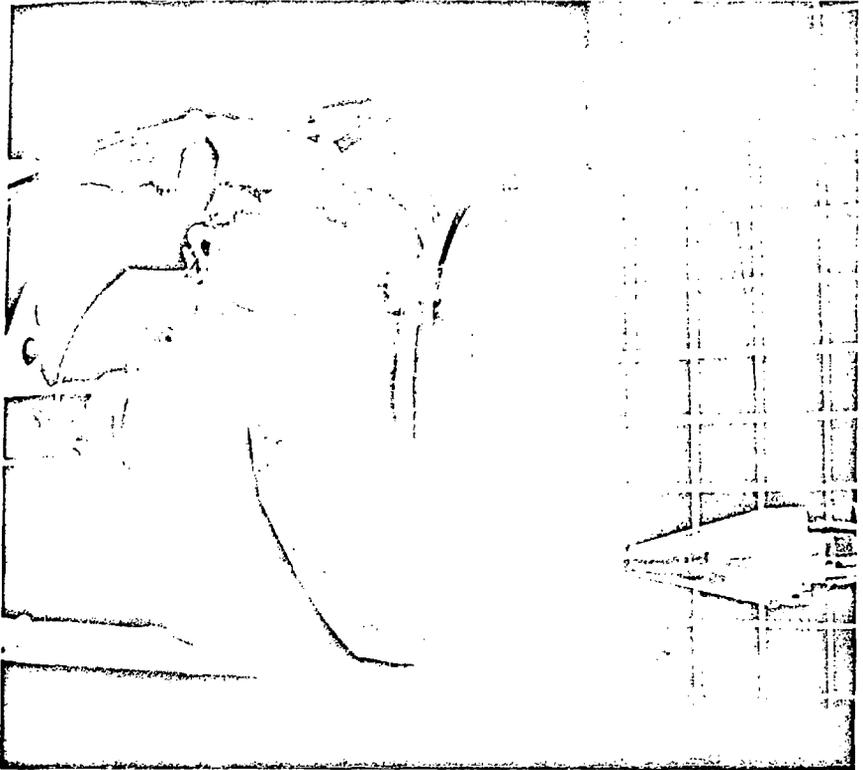
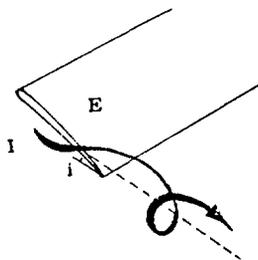


Fig.6. Trajectographie d'écoulements au  
travers d'une hélice ventilateur.

Les bulles de savon sont émises en amont du ventilateur, un carénage en plexiglas non polarisé, moulé, permet l'observation des trajectoires ; les reflets causés par l'éclairage sont en partie supprimés avec l'emploi d'un filtre polarisant fixé sur l'objectif de l'appareil de prise de vues.

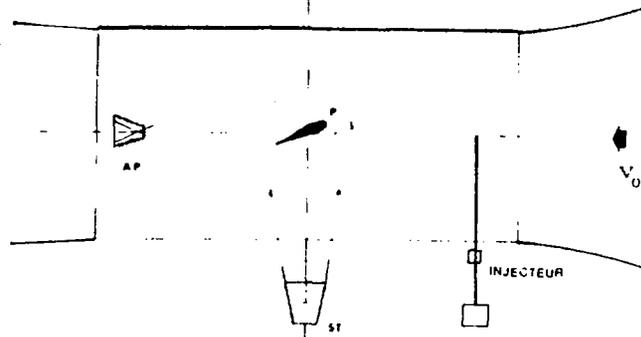
#### 1.3.4. Etude du tourbillon marginal d'une aile sustentatrice



De chaque extrémité de l'aile fonctionnant sous une incidence notable, s'échappe un tourbillon dit marginal dont l'axe est sensiblement parallèle à la direction moyenne de l'écoulement. La méthode chronophotographique permet de déterminer la répartition des vitesses en fonction de la distance à l'axe et d'en déduire l'inclinaison des trajectoires, la rotation angulaire des filets tourbillons, la valeur du vecteur tourbillon et celle de la pression.

Les bulles sont émises soit en amont de l'aile, soit au cœur du tourbillon ; l'appareil photographique et la lampe à éclairs sont placés orthogonalement par rapport à la ligne d'émission des bulles comme le montre le schéma de la figure 7.

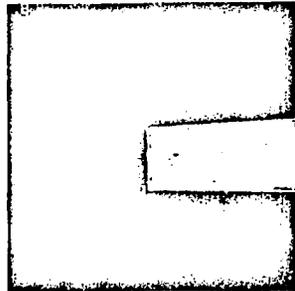
Les clichés a et b sont pris à la même incidence et à la même vitesse, leur examen montre bien le phénomène tourbillonnaire de l'écoulement à l'extrémité de l'aile (Fig.7 a) et la déflexion de la trajectoire (Fig.7 b).



Implantation des matériels en soufflerie.



a) Tourbillon marginal.



b) Déflexion.

Fig.7. Montage expérimental et résultats d'essais

2 - DETERMINATION DES TRAJECTOIRES  $x = f(t)$  PAR LA METHODE PHOTOGRAPHIQUE

Dans cette deuxième phase expérimentale, il s'agit d'enregistrer non pas la trajectoire d'une bulle isolée, mais l'enveloppe globale des trajectoires issues d'un même point d'injection. A cette fin, les bulles sont éclairées au moyen d'un faisceau de lumière plan parallèle constitué par un projecteur au XENON d'une puissance de 75W ; l'enveloppe des trajectoires est obtenue par intégration photographique de l'image sur des temps d'exposition relativement longs.

2.1. L'INJECTEUR

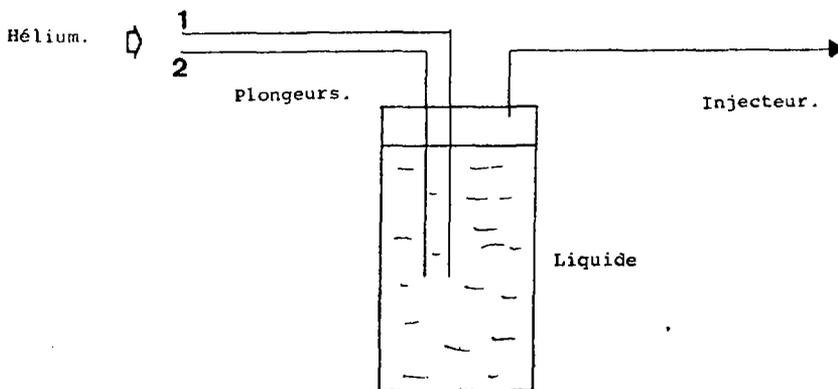


Fig.8. Schéma de principe de l'injecteur

L'hélium est amené, par l'intermédiaire de deux tubes plongeurs, dans le réservoir contenant le liquide. Sous l'effet de la pression, des voiles se forment à la surface libre du liquide. Ceux-ci sont évacués à l'injecteur constitué d'une aiguille hypodermique de quelques 1/10e de diamètre.

Le réglage des débits 1 et 2 étant supposé correct, la bulle qui se forme à l'extrémité de la sonde va grossir jusqu'à ce qu'un équilibre se produise entre :

- Les tensions capillaires qui la font adhérer à l'arête de la sonde
- La résultante des forces de pression interne et externe
- La résultante des efforts dûs au courant d'air qui tend à détacher la bulle.

Le phénomène a une période bien régulière mais qui est fonction de la pression du gaz dans le réservoir et de son débit, de la viscosité du liquide, des dimensions de l'orifice de sortie et de la vitesse du courant d'air ambiant

## 2.2. LA MAQUETTE TRIDIMENSIONNELLE

Des maquettes d'ailes en flèche ont été définies pour servir de support expérimental aux études du décollement tridimensionnel.

La maquette utilisée est constituée d'une plaque plane métallique à bord d'attaque aigu. L'aile est munie de volets ; elle est fixée sur un plateau circulaire servant de piège à couche limite. L'ensemble est solidaire du plateau tournant de la veine d'expérience.

Les appareils de mesures utilisés pour la visualisation sont rendus solidaires de ce plateau par un portique métallique (Figure 9).

## 2.3. LES RESULTATS

Le cliché de la figure 10 mémorise l'écoulement tridimensionnel sur une aile de 50° de flèche, sur une incidence de 10° et un braquage du volet de 45°. Temps de pose 1/2 seconde,  $V_0 = 22$  m/s.

Pour obtenir une localisation des trajectoires, une mire de repérage comportant un quadrillage de référence est nécessaire sur le plan de la maquette côté extrados.

Les appareils de prise de vues disposés dans les plans orthogonaux du plan d'éclairage, permettent l'enregistrement des bulles diffusantes.

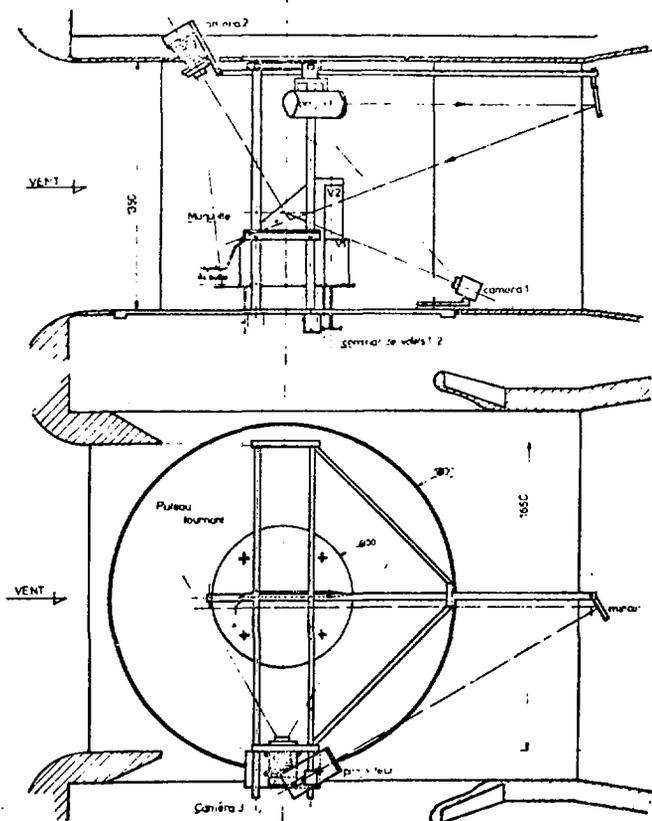


Fig. 9. Schéma d'implantation des matériels de mesures en soufflerie

AILE  $\Delta$  50°

$V_0 = 22$  m/s

$i = 12^\circ$  ;  $\beta = 25^\circ$

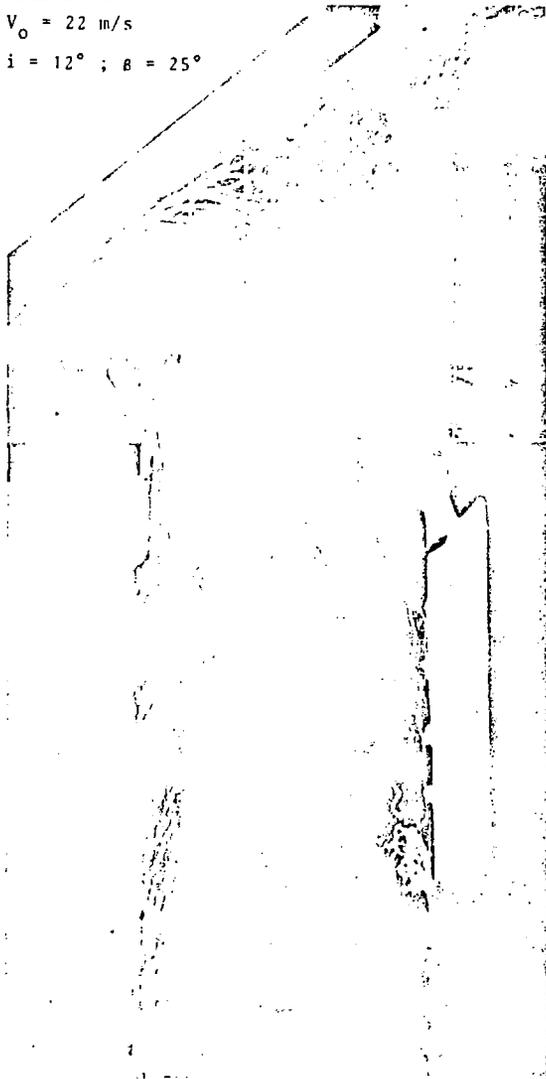


Fig. 10.

Écoulement  
tridimensionnel  
sur une aile  
en Flèche.

Vues simultanées

- a) suivant OY
- b) suivant OX
- c) suivant OZ

Du fait de l'observation à 90° la lumière diffusée, recueillie par les objectifs, est faible et nécessite l'emploi de films à haute rapidité.

Les difficultés d'enregistrement sont liées principalement à l'élimination de la lumière parasite dans le dispositif.

Pour tenter d'éliminer ces reflets, les parois de la maquette et tous les accessoires doivent être peints en noir mat avec application d'un produit anti reflet.

#### 2.4. ETUDE AERODYNAMIQUE SUR TELESCOPE

Le but de cette étude est la détermination expérimentale des phénomènes tourbillonnaires dus à l'ouverture de fenêtres et de hublots d'une coupole en plexiglas constituant la salle d'observation d'un télescope du type Schmidt. L'ensemble est placé dans la veine d'expérience de la soufflerie et peut être mis en incidence au moyen du plateau tournant de la veine d'expérience.

Le cliché de la figure 11 rend compte des phénomènes tourbillonnaires existant dans la salle d'observation ; il apparaît un écoulement rasant la paroi interne de la coupole, ce type d'écoulement se développe jusqu'au niveau des hublots pour se transformer en mouvement circulaire autour et à la base du télescope, enfin un courant tourbillonnaire ascendant prend naissance autour de l'axe central vertical de la coupole.

#### 2.5. VISUALISATION D'ECOULEMENTS AUTOUR DE VEHICULES AUTOMOBILES

Une part importante de la puissance d'un véhicule est utilisée pour vaincre la résistance de l'air. La valeur de cette résistance dépend non seulement de la vitesse, mais encore de la forme du véhicule et de la surface du maître couple.

L'augmentation de la vitesse du véhicule peut se traduire par une amélioration de la "finesse aérodynamique" de la voiture nécessitant des essais en soufflerie sur maquette ou véhicule grandeur nature.

Un exemple d'application de la méthode de visualisation par bulles de savon sur maquette est donné figure 12 et fait apparaître les phénomènes tourbillonnaires à l'arrière du véhicule.

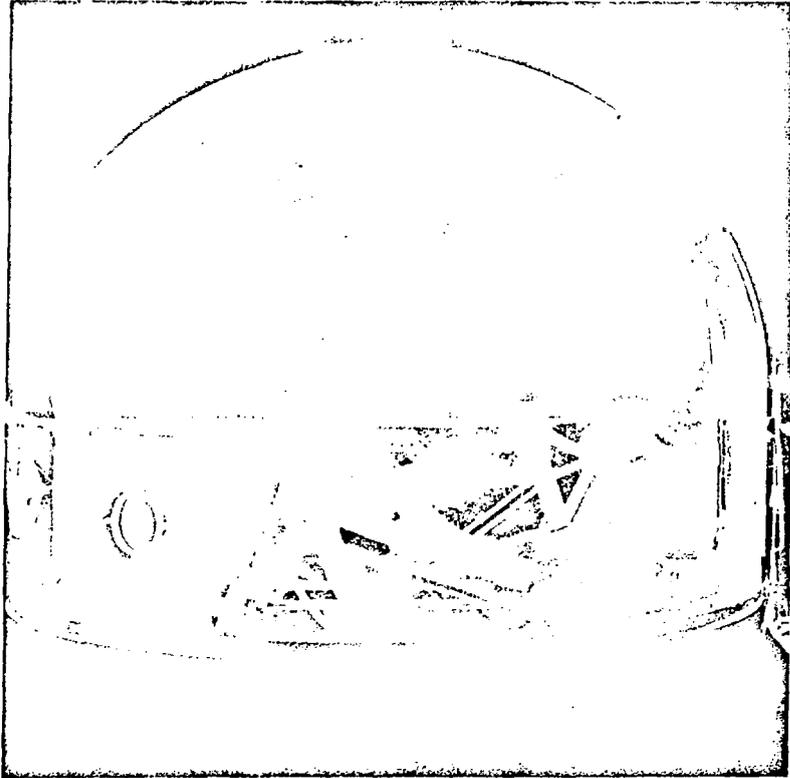


Fig.11. Ecoulement tourbillonnaire à l'intérieur de la coupole



Fig. 12. Visualisation d'écoulement autour d'une maquette en soufflerie

## C O N C L U S I O N

---

La visualisation des écoulements a toujours été une aide à l'interprétation des phénomènes physiques qui leur sont liés.

Parmi les procédés de visualisation actuellement connus, ceux qui mettent en oeuvre les bulles de savon apportent leur contribution d'une manière non négligeable, comme le montrent les quelques exemples d'application décrits dans cet exposé.

Les bulles flottantes, non polarisées, gonflées à l'hélium ont permis de suivre l'écoulement de l'air jusqu'à des vitesses de 30 m/s.

Les mesures qualitatives sont obtenues en réglant le temps de pose (vitesse de fermeture des obturateurs), de manière à saisir un nombre déterminé de bulles traversant le champ de vision.

En mesures quantitatives, la méthode d'échantillonnage optique est nécessaire si l'on veut connaître les vitesses en grandeur et direction, plus particulièrement dans les zones tourbillonnaires, l'exploitation des clichés de la méthode photographique nécessite des dépouillements précis et assez longs, ce qui exige l'aide d'un analyseur d'images et d'un ordinateur. Une étude est en cours. Les premiers résultats obtenus sont encourageants.

\*oo\*

