

# ETUDE DE LA CONDENSATION DE VAPEUR D'EAU AU COURS D'UNE DETENTE RAPIDE DANS UN LONG TUBE

**J. P. BARRAND et E. RIEUTORD**

Département de Génie Mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon,  
69, Villeurbanne, France

(Reçu le 22 Mars 1972)

**Résumé**— Il est montré, par l'étude de la détente rapide d'un gaz humide contenu dans un tube de rapport longueur/diamètre suffisant, que cette technique est bien adaptée à l'analyse des phénomènes de condensation d'une vapeur.

Le début de condensation est détecté en une abscisse quelconque du tube par la perturbation de pression qui en résulte. L'instant d'apparition de cette condensation et la valeur de la pression correspondante sont enregistrés directement. Les autres paramètres thermodynamiques sont déduits de ces mesures par un calcul reposant sur des hypothèses vérifiées par des mesures de détente de gaz sec effectuées dans les mêmes conditions.

Les résultats obtenus pour un mélange de vapeur d'eau et d'argon ou d'hélium permettent d'analyser de manière détaillée les phénomènes observés globalement en chambre de Wilson et de compléter, dans le domaine des faibles taux de variation de température, les résultats, concernant le retard adiabatique à la condensation, obtenus en tuyères supersoniques ou en détente de Prandtl-Meyer.

## NOTATIONS

$a$ ,	célérité du son ;
$A$ ,	célérité du son réduite $a/a_0$ ;
$L$ ,	longueur du tube ;
$p$ ,	pression ;
$p_v$ ,	pression de vapeur ;
$p_\infty$ ,	pression de vapeur saturante ;
$t$ ,	temps compté à partir de l'instant de début d'ouverture de la membrane ;
$T$ ,	temps réduit $a_0 t/L$ ;
$u$ ,	vitesse ;
$U$ ,	vitesse réduite $u/a_0$ ;
$x$ ,	abscisse, comptée positivement dans le sens de l'écoulement, à partir de l'ouverture du tube ;
$X$ ,	abscisse réduite $x/L$ ;
$\theta$ ,	température ;
$\Delta\theta_{ad}$ ,	retard adiabatique à la condensation ;
$\theta_\infty$ ,	température correspondant au point d'intersection de la ligne de saturation avec l'isentrope issue du point $(p_{v0}, \theta_0)$ dans le plan $(p_v, \theta)$ ;

$\Phi$ , humidité relative ;  
 $\omega$ , humidité massique.

Indice

0, conditions initiales.

## INTRODUCTION

LES TRÈS nombreuses recherches consacrées à la condensation d'une vapeur sursaturée ont donné lieu au développement d'un nombre important de techniques expérimentales [1, 2]. Parmi celles-ci, les plus communément employées sont celles qui utilisent la détente adiabatique d'un mélange de vapeur et de gaz non condensable: chambre de Wilson, détente en tuyère supersonique et détente de Prandtl-Mayer autour d'un dièdre [3].

Or, assez paradoxalement, il ne semble pas que l'on ait mis à profit les possibilités d'analyse et de mesure qu'offre la détente brusque dans un tube de rapport longueur/diamètre suffisant pour que l'écoulement puisse être considéré

comme unidimensionnel (tube de Ludwig, chambre haute pression d'un tube à choc, ...)\*. En effet, bien que ce type de détente soit proche de celui obtenu en chambre de Wilson, il devient possible, dans ce cas, de suivre localement, tout comme en soufflerie supersonique, l'évolution au cours du temps des diverses grandeurs thermodynamiques (pression, température, ...) qui interviennent dans les phénomènes de condensation et qui, généralement, n'ont pu être mesurées que globalement [6].

Le changement de phase produit un dégagement de chaleur important qui modifie de façon appréciable les paramètres de l'écoulement. La perturbation ainsi créée, particulièrement sensible au niveau de la pression, peut être observée de façon précise au moyen de capteurs placés à la paroi. Les autres paramètres peuvent être, sous certaines hypothèses, déduits de l'analyse du système d'ondes produit lors de la rupture de la membrane.

Cette méthode semble, en outre, présenter certains avantages par rapport à la détente en soufflerie supersonique en permettant un contrôle précis des paramètres initiaux (pression, température et humidité) et une grande souplesse dans le choix de la vapeur et du gaz non condensable.

Dans le présent travail, nous examinons les principales caractéristiques de ce type de détente. Nous repérons le point d'apparition de la condensation en différentes abscisses du tube et déterminons les paramètres thermodynamiques qui y sont liés. Les résultats de ces mesures sont comparés à ceux obtenus en détente de Prandtl-Meyer.

#### DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Notre système de mesures est essentiellement constitué par un tube de 2,01 m de longueur et

de 8 cm de diamètre, fermé à une de ses extrémités par une membrane en acétate de cellulose de très faible épaisseur (60  $\mu\text{m}$ ).

Cette enceinte est, avant chaque essai, maintenue sous vide ( $\approx 0,3$  Pa) et plusieurs balayages sont effectués à l'aide du gaz non condensable choisi pour les expériences: argon ou hélium, dans le cas présent.

Une certaine masse d'eau, correspondant à la pression de vapeur désirée, est alors introduite par un passage chauffé qui assure sa vaporisation complète. Après remplissage en gaz non condensable, le mélange est laissé au repos jusqu'à ce que sa température atteigne uniformément la température ambiante.

Trois capteurs de pression, d'un diamètre de 2 mm et dont le temps de réponse est de quelques  $\mu\text{s}$ , sont placés à la paroi à des distances de 0,434 m, 1,224 m et 1,84 m de la section de sortie. Un dernier capteur est fixé sur le fond du tube. Les signaux en provenance de ces capteurs sont enregistrés simultanément à partir d'un oscilloscope à quatre voies.

#### ETALONNAGE

Afin d'étalonner la détente, un certain nombre d'essais ont été faits avec du gaz sec. Ils sont apparus parfaitement reproductibles dans la limite de l'épaisseur de la trace oscilloscopique. Leurs résultats ont été comparés à ceux correspondants à des modèles d'écoulements unidimensionnels et adiabatiques (avec ou sans frottement, correspondant à des détentes centrées ou non) de gaz parfaits.

Dans le cas d'un modèle isentropique, il est possible d'obtenir une solution analytique en toute section du tube à partir de la méthode de Riemann [7], étendue au cas d'un gaz monoatomique ( $\gamma = 5/3$ ). Pour une détente par onde centrée à l'origine (rupture instantanée de la membrane), celle-ci est immédiate dans le domaine d'onde simple. Dans le domaine où intervient la réflexion sur le fond du tube, cette solution est donnée par les relations:

\* Nous devons toutefois signaler, outre quelques observations faites par méthodes optiques (strioscopie ou méthode des ombres) et citées par I. I. Glass et J. Gordon Hall [4], une étude expérimentale de Wegener et Lundquist [5], effectuée en tube à choc, sur les conclusions de laquelle nous revenons à la fin de cet article.

$$T = [1 + 1/A^2 - U^2/(9A^2)]/(2A),$$

$$X - UT = -U/(3A) - 1.$$

La détente avec frottement a été calculée par la méthode des caractéristiques avec les hypothèses suivantes :

- l'écoulement est unidimensionnel et adiabatique,
- le coefficient de frottement, supposé identique à celui correspondant à un régime stationnaire, peut être déterminé, en chaque point, par les formules habituelles de pertes de charge (Poiseuille ou Colebrook suivant la nature de l'écoulement).

Enfin, le caractère non centré de l'onde de détente, résultant du temps d'ouverture non nul de la membrane, a été pris en compte en

considérant, sur cet intervalle de temps ( $\approx 0,1$  ms), une variation linéaire de la vitesse de sortie. A titre d'exemple de la validité des hypothèses ci-dessus, nous comparons (Fig. 1) la courbe expérimentale d'évolution de la pression au fond du tube à celles qui sont déduites des calculs précédents.

**ANALYSE DES ENREGISTREMENTS**

La Fig. 2 donne un enregistrement simultané des réponses des différents capteurs de pression obtenues avec de l'argon pour les conditions initiales suivantes :

$$p_0 = 2,095 \cdot 10^5 \text{ Pa}, \quad p_{atm} = 0,998 \cdot 10^5 \text{ Pa},$$

$$T_0 = 296,4 \text{ K}, \quad \omega_0 = 2,9 \cdot 10^{-3}.$$

A la détente humide est superposée, directe-

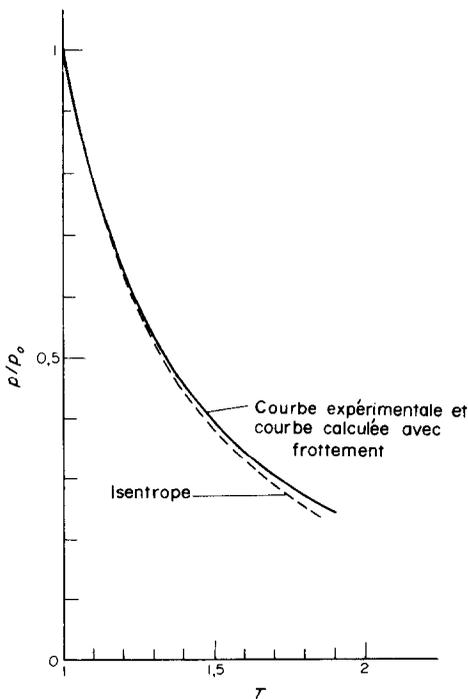


FIG. 1. Comparaison de la courbe expérimentale de variation de pression au fond du tube avec les courbes calculées pour une détente isentropique centrée et pour une détente non centrée avec frottement.

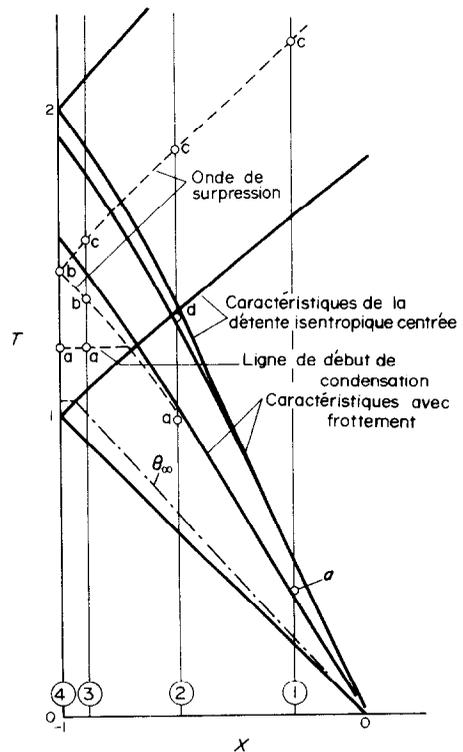


FIG. 3. Diagramme d'ondes.

ment sur l'écran de l'oscilloscope, une détente sèche qui, sur ce cliché, apparaît très légèrement en avance par suite du manque de fidélité du système de déclenchement extérieur utilisé.

Le diagramme adimensionnel ( $X, T$ ) (Fig. 3) représente les courbes caractéristiques de la détente isentropique pour une onde centrée correspondant aux conditions indiquées plus haut. Quelques courbes caractéristiques pour une onde de détente non centrée et avec frottement sont également tracées, afin de rendre compte de l'importance relativement faible de ces facteurs dans notre cas. Le report dans ce diagramme des points particuliers des différents enregistrements de la Fig. 2 permet d'expliquer qualitativement la nature des phénomènes responsables des singularités que présentent ces courbes.

Si l'on admet, en première approximation, que d'une part, le mélange gaz-vapeur se comporte, avant condensation, comme un gaz parfait et que, d'autre part, le frottement a une influence négligeable, on obtient immédiatement la configuration des isothermes dans ce plan. Dans le domaine d'onde simple de la détente isentropique, les isothermes correspondent aux droites caractéristiques issues de l'origine. Dans le domaine où intervient la réflexion sur le fond du tube, un calcul rapide, à l'aide des relations données plus haut, montre que, dans ce diagramme, les isothermes sont sensiblement des droites parallèles à l'axe  $X$ . En effet, leur pente  $|\partial T/\partial X|$ , nulle au fond du tube, reste, dans la partie de ce domaine qui nous intéresse, inférieure à 0,03.

On constate, ainsi, que les points expérimentaux, notés "a", caractérisant le début de condensation, se situent sensiblement sur une même isotherme, l'influence du taux de variation de la température apparaissant, de ce fait, assez faible. A titre de comparaison, le point de franchissement de la ligne de saturation par les différentes particules fluides a été représenté, dans ce diagramme, par l'isotherme notée  $\theta_\infty$ .

Comme l'écoulement est partout subsonique, la perturbation de pression, produite par le

dégagement de chaleur de condensation, se propage dans les directions positive et négative, à une vitesse égale ou supérieure à celle correspondant à la pente des caractéristiques. Donc, sur les enregistrements où la condensation apparaît dans le "domaine d'onde simple" (capteurs 1 et 2 de la Fig. 2), l'instant d'arrivée de de l'onde de surpression, due à la condensation dans les sections plus proches de l'ouverture, est presque confondu avec le début de condensation locale. Cet intervalle de temps est directement lié à la vitesse de propagation de la surpression et, par conséquent, à la masse de vapeur condensée. C'est ainsi que quelques unes de nos mesures, effectuées avec une humidité  $\omega_0$  élevée, semblent même indiquer que cette onde de surpression peut atteindre une section avant que n'y débute la condensation, entraînant ainsi un retard important de celle-ci. Dans tous les cas, la condensation locale n'est marquée que par un très court palier issu de la courbe de détente sèche et qui précède un choc important (Fig. 4).

Il n'en est plus du tout de même au voisinage du fond du tube (capteurs 3 et 4) où la condensation locale se produit bien avant l'arrivée de l'onde de surpression provenant du "domaine d'onde simple" (Fig. 5).

## RESULTATS

La valeur de la pression de vapeur, au point d'apparition de la condensation, étant déduite directement des enregistrements, il est possible de déterminer la température correspondante  $\theta$  à partir des résultats des calculs d'étalonnage en détente sèche non centrée et avec frottement. Cependant, en raison des faibles écarts rencontrés, nous avons considéré, en première approximation, que cette température est très voisine de celle qui résulte d'une détente isentropique, notamment au voisinage du fond du tube où les vitesses sont faibles.

De la valeur de ce paramètre au point d'apparition de la condensation, nous déduisons le retard adiabatique  $\Delta\theta_{ad} = \theta_\infty - \theta$  reporté (Fig. 6) en fonction de l'humidité relative

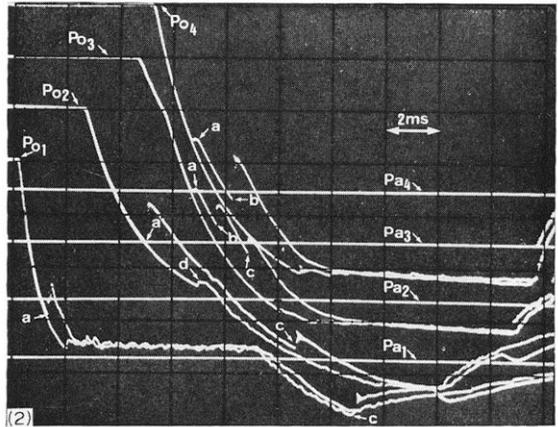


FIG. 2. Réponses des différents capteurs de pression pour des détenteurs d'argon avec et sans présence de vapeur d'eau. Les horizontales notées Pa correspondent à un enregistrement de la pression atmosphérique après repos complet du gaz.

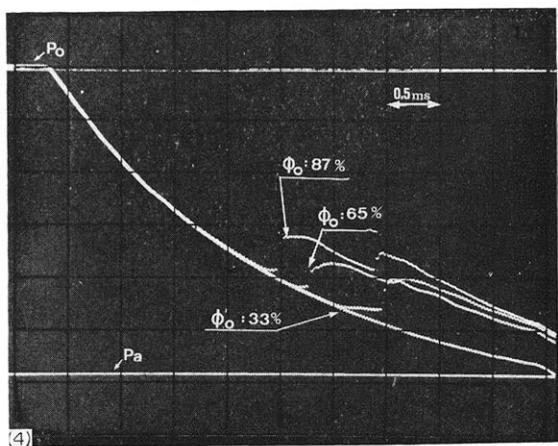
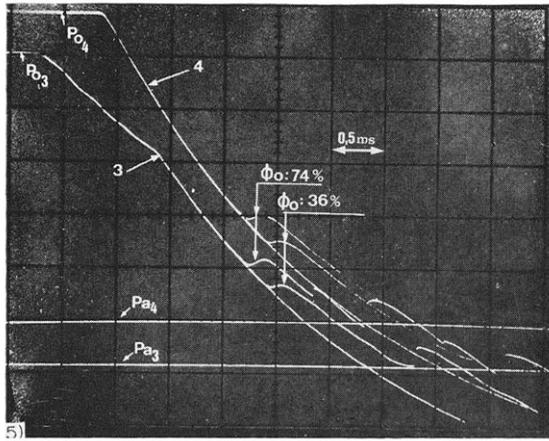


FIG. 4. Superposition à une détente sèche des réponses du capteur 2 pour différentes humidités relatives.



5) FIG. 5. Superposition à une détente sèche des réponses des capteurs 3 et 4 pour différentes humidités relatives.

En effet, la possibilité d'un contrôle rigoureux

of moist air around a sharp corner, *AIAA JI* 9, 2035-2037 (1971)

## CONDENSATION DE VAPEUR D'EAU

105

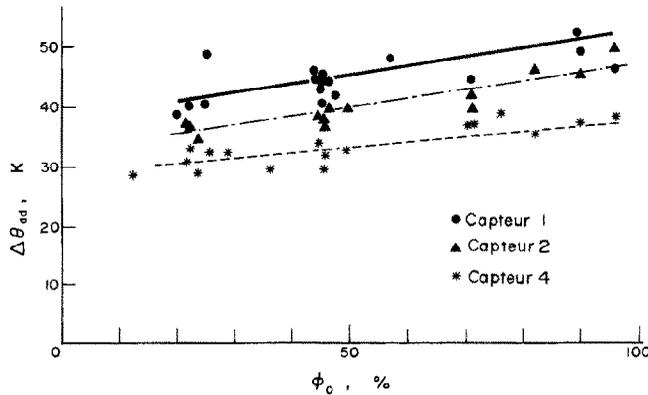


FIG. 6. Variation du retard adiabatique à la condensation en fonction de l'humidité relative.

initiale  $\Phi_0$ . Le sens de variation de  $\Delta\theta_{ad}$  que nous notons en fonction de  $\Phi_0$  confirme les résultats d'une compilation, effectuée par Lukasiewicz et citée par Stever [8], de diverses études de condensation faites en soufflerie. Par ailleurs, un certain nombre de mesures effectuées pour différentes valeurs de l'humidité massique  $\omega_0$ , confirment également l'indépendance du retard adiabatique à l'égard de ce dernier paramètre.

Les expressions isentropiques données plus haut permettent le calcul, pour une onde centrée, du taux de variation de température, le long de la trajectoire, au point d'apparition de la condensation, par la relation :

$$\frac{d\theta}{dt} = 2 \frac{a_0 \theta_0}{L} A^2 \frac{3 + 4A^2 - 9A^3 T - 3A^2(X+1)^2/(3AT-1)^2}{A(X+1)^2/(3AT-1) + 15A^3 T^2 - 9A^2 T - 3T + A}$$

La valeur de ce taux étant, dans les conditions de nos mesures, de l'ordre de 0,03 K/ $\mu$ s, il est possible de compléter les résultats obtenus par Smith [3] en détente de Prandtl-Meyer (Fig. 7).

Deux remarques peuvent cependant être

—Pour une valeur donnée de  $(d\theta/dt)$ , l'humidité relative a sur le retard adiabatique une influence plus importante que celle qui a été notée par Smith.

—Pour les enregistrements effectués avec argon en dehors du domaine d'onde simple, les valeurs de  $\Delta\theta_{ad}$  sont nettement inférieures, sans que la raison en apparaisse clairement.

En tout état de cause, les retards adiabatiques mesurés sont nettement supérieurs à ceux déduits de la relation empirique proposée par Smith, à partir de ses résultats. Par ailleurs, l'amplitude de ces retards semble bien indiquer que le changement de phase correspond à une condensation homogène.

Un certain nombre d'expériences ont été conduites en utilisant de l'hélium comme gaz non condensable. Cependant, le temps de rupture de la membrane a une influence relative beaucoup plus importante en raison de la valeur élevée de la célérité du son de ce gaz. Une mesure

денсации определяется по возмущениям давления. Остальные термодинамические параметры рассчитаны при допущениях о расширении газа при тех же условиях, проверяемых экспериментально.

Результаты, полученные для смеси водяного пара и аргона или гелия, дают возможность подробно проанализировать явления, наблюдаемые в туманной камере. Это позволяет провести обобщение данных, полученных для сверхзвуковых сопел или расширений Прандтля-Майера и опубликованных в других работах для более низких скоростей.