LE COIN DU LABORATOIRE

La cinématographie ultra-rapide et l'ébullition à haute pression

High-speed cinematography and pool boiling under high pressure

PAR R. SÉMÉRIA,

INGÉNIEUR AU SERVICE DES TRANSFERTS THERMIQUES
CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES DE GRENOBLE

L'application de la cinématographie ultra-rapide (8 000 images/seconde) à l'étude de l'ébullition de l'eau à haute pression (330 °C - 140 kg/cm²) en vase ou canal conduit à la construction d'enceintes spécialement conçues pour la visualisation. L'auteur indique les difficultés rencontrées, les solutions utilisées et résume les résultats obtenus.

(Projection d'un film muet 16 mm de R. Séméria et A. Gouzy : ébullition en vase à haute pression.)

The use of high-speed cinematography (8,000 frames per second) in high pressure pool or canal boiling studies (330 °C - 140 kg/sq.cm) requires the construction of tanks specially designed for visual observation. The author describes the difficulties met with in this connection and the solutions adopted, and sums up the results obtained.

(A 16 mm silent film by R. Séméria and A. Gouzy on "Pool boiling under high pressure" goes with this paper.)

INTRODUCTION

La première étude cinématographique ultra-rapide de l'ébullition fut faite par W. Fritz [1] en 1935 avec une caméra à 600 images par seconde construite par W. Ende.

Les résultats et des photographies sont reproduites dans l'ouvrage de M. Jakob [2]. Ces étu-

des cinématographiques furent poursuivies à partir de 1945 dans de nombreux pays : aux Etats-Unis, par exemple, les travaux du Professeur Rohsenow au M.I.T. à Boston et du Professeur Westwater à l'Université de l'Illinois permirent de proposer des théories du mécanisme de l'ébullition fondée sur les mouvements induits par les bulles au voisinage de la paroi.

Mais la très grande majorité de ces études furent faites à la pression atmosphérique ou à faible pression alors que les applications essentielles (chaudières et surtout réacteurs nucléaires) exigent des pressions allant de 30 à plus de 140 kg/cm².

Il était donc indispensable de déterminer à haute pression les caractéristiques des bulles et de l'écoulement eau-vapeur avant d'extrapoler les théories vérifiées à la pression atmosphérique.

I. — DIFFICULTÉS DE LA VISUALISATION DANS L'EAU A HAUTE PRESSION ET HAUTE TEMPÉRATURE (140 kg/cm² - 330 °C)

Les difficultés proviennent de :

1° L'évolution des caractéristiques du liquide :

La différence d'indice entre le liquide et la vapeur diminue avec la température; toutefois, l'écart reste suffisant pour une bonne observation par transparence, sauf au voisinage de la pression critique.

De même en considérant la formule de Lorenz :

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{1}{\rho} = k$$

n = indice de réfraction;

ρ = masse spécifique;

k = réfraction spécifique.

on constate que $(dn/n) \approx 0,25 d\rho$ à 100 °C, et 0,26 $d\rho$ à 330 °C, et varie donc peu avec la température.

Le fait essentiel reste donc l'augmentation rapide du coefficient de dilatation cubique ρ de l'eau qui, de $0,75 \cdot 10^{-3}$ à 100 °C, atteint $8,25 \cdot 10^{-3}$ environ à 340 °C.

Or, dans le cas de l'ébullition en vase par exemple, les mouvements de convection naturelle parasites sont causés par une répartition non isotherme des températures sur les parois du vase : l'écart avec la température ambiante augmentant avec la pression, les mouvements parasites sont de plus en plus importants.

D'autre part, à gradient de température donné, les variations de densité donc d'indice augmentent avec la température, et la distorsion de l'image aussi.

2° L'évolution des bulles :

L'expérience montre que les dimensions des bulles diminuent rapidement avec la pression et que leur population augmente sur la paroi chauffante : la granulométrie devenant plus fine, le grossissement doit être augmenté; par contre le film thermique surchauffé adhérent à la paroi chauffante change peu d'épaisseur; les bulles,

au cours de leur croissance, sont alors noyées dans ce film à fort gradient de température, d'où risque supplémentaire de déformation de l'image si les rayons y ont un long parcours.

II. — INSTALLATION RÉALISÉE POUR L'OBSERVATION DE L'ÉBULLITION EN VASE

Elle comprend une chambre d'essai dans laquelle on place l'élément chauffant étudié et des dispositifs d'observations (fig. 1).

1. La chambre d'essai.

La chambre d'essai est creusée dans un cylindre en acier inoxydable (fig. 2). Elle comporte des chauffages auxiliaires en fil chauffant Thermocoax compensant les fuites thermiques du cylindre. La pressurisation se fait par la vapeur au moyen d'un enroulement chauffant placé dans le tube supérieur. Des grilles de tranquillisation empêchent les mouvements de convection d'ensemble de traverser le volume utilisé par la visualisation.

L'éclairage et l'observation utilisent deux hublots, dont la mise au point fut assez délicate étant donné les exigences optiques; dans le montage utilisé actuellement (fig. 3), nous avons cherché non seulement à remplir les conditions d'étanchéité et de transparence indispensables, mais aussi à obtenir le minimum de perturbation thermique dans l'observation, en approchant au plus près le hublot de la surface à observer et en évitant des refroidissements de joints ou des fuites thermiques trop importantes au voisinage de l'élément. Le problème de la dissolution dans l'eau désionisée à 330 °C a été séparé de celui de l'étanchéité à haute pression en interposant une chambre d'azote, comprimé à une pression égale à celle de la chambre d'essai, entre le disque en fluorine en contact avec l'eau et le disque de quartz. Les joints utilisés sont en téflon.

Les disques actuellement en service sont plans, mais des disques à face courbe seront utilisés prochainement pour les essais à fort grossissement (les dioptries plans ne sont pas des systèmes stigmatiques).

Remarquons que le pyrex et le quartz se déposent très vite au contact de l'eau désionisée à haute température. Le mica peut assurer une bonne protection, mais n'est pas satisfaisant pour les observations à fort grossissement. Le saphir, qui est souvent utilisé aux U.S.A. dans ces conditions, a une bonne tenue, mais nous avons constaté une faible biréfringence qui gêne l'observation à fort grossissement. Cet effet peut être corrigé en croisant deux disques, ce qui

FIG. 1

Vue générale de l'installation pour l'étude de l'ébullition en vase (140 kg/cm^2 , 330°C).

complicque le montage. La fluorine ne présente pas ce défaut, mais est très sensible aux chocs thermiques et se dépolit très lentement à 300°C .

2. Dispositifs d'éclairage et d'observation.

Aux grossissements voisins de 1, l'éclairage en lumière diffuse est satisfaisant. Il suffit donc d'éclairer un verre dépoli ou une feuille Kodatrace par une lampe puissante.

Aux grossissements de l'ordre de 5 à 10 à la prise de vue, l'image est de meilleure qualité en éclairage dirigé, d'une part, parce que les aberrations sont moindres, d'autre part, le rendement lumineux est meilleur (au grandissement 10, il faut trente fois plus de lumière qu'au grandissement 1). On utilise alors une lampe ponctuelle, soit à filament, soit à arc concentré (type LMT AC 100); pour des phénomènes d'évo-

lution très rapide, nous avons utilisé des lampes à éclairs dans le xénon (durée de l'éclair : quelques microsecondes). Un condenseur forme l'image de la source dans le plan de l'objectif.

La distance frontale entre l'objet à examiner et l'objectif est supérieure à 100 mm; par conséquent un grandissement de 10 va nécessiter une distance de plus de 1 mètre entre la caméra et son objectif (fig. 1) en montage macrophotographique. Pour avoir un ensemble exempt de vibrations, l'éclairage, la chambre d'essai, l'objectif et la caméra sont sur des chariots posés sur un fer en U très rigide.

La caméra utilisée est une caméra Fastax 16 mm type WF 14; sa cadence maximale est de 8 000 images par seconde. Un dispositif à éclairs xénon Edgerton est synchronisable avec la caméra.

FIG. 2

Coupe de la chambre d'essai :

1 : cylindre d'acier inoxydable :

— D = 140 mm,

— L = 180 mm;

3 : tube supérieur de pressurisation;

b, d, f : enroulements chauffants auxiliaires;

8 : élément chauffant.

FIG. 3

Hublot d'observation :

1 : bride de raccordement;

4 : disque de fluorine;

5 : disque de quartz;

P₁ : chambre d'azote comprimé;

P₂ : chambre d'essai.

0 1 cm.

FIG. 4

Plaque chauffée sur une aire rectangulaire :
1. lame de cuivre de section $5 \times 0,5$ mm brasée sur 2;
2. feuille d'acier inoxydable, épaisseur 0,1 mm.

FIG. 5

Canal rectangulaire
(section intér. 30×12 mm)
pour étude
de l'ébullition locale
(140 kg/cm^2 , 330°C).

FIG. 6

Bulles sur un fil
de $1/10^{\text{e}}$ de mm
et sur une ligne chauffante :

E : bulles en équilibre;
B : bulle d'ébullition;
C : Bulle de coalescence.

3. Les éléments chauffants.

L'élément idéal du point de vue thermique, dans le cas de cette étude, est une plaque infinie fournissant dans le liquide à la température d'ébullition un volume infini de bulles. Sous pression, leur population est si élevée qu'une plaque circulaire de quelques millimètres de diamètre ne permet déjà plus l'observation du phénomène au voisinage de la paroi.

L'élément idéal au point de vue photographique est une ligne chauffante créant ainsi un rideau plan de bulles facilement observable (au grandissement 10, la profondeur de champ est ici de l'ordre de $2/100^{\text{es}}$ de mm). Nous avons choisi des éléments allongés tels que tubes, fils et plaques chauffées sur une aire rectangulaire (fig. 4) réalisant différents compromis entre les exigences thermiques et optiques.

Dans le cas de la convection forcée, nous étudions l'ébullition sur un ruban chauffant placé dans un canal rectangulaire observable par trois hublots (fig. 5).

Des essais préliminaires y ont été effectués à 50 et 80 kg/cm². Dans les essais ultérieurs, on utilisera de plus un dispositif de transfert d'image (grandissement 10) du genre de ceux utilisés pour l'étude de la pulvérisation [3].

III. — RÉSULTATS OBTENUS

Certains de ceux-ci ont été exposés aux VII^{es} Journées de l'Hydraulique [4]. Nous allons simplement ici projeter un film [5] illustrant les points importants découverts à haute pression et résumés ci-dessous :

Sous pression, nous sommes conduits à distinguer trois types de bulles de vapeur (fig. 6 et 7) :

— les bulles en équilibre (E) de grand diamètre, restant longtemps sur la paroi. Ces bulles n'existent pas en convection forcée;

— les bulles d'ébullition (B), dont le diamètre de départ diminue beaucoup plus rapidement avec la pression que ne le prévoit la formule de Fritz souvent utilisée. On ne les rencontre isolées qu'aux faibles flux de chaleur ϕ (pour $T_{\text{liq.}} = T_{\text{sat.}}$, $\phi < 15 \text{ W/cm}^2$);

— les bulles de coalescence, ou plus rapidement les coalescences (C), formées par l'agglomération des bulles précédentes. Nous avons montré que ces bulles jouent un rôle prépondérant dans les applications industrielles à haute pression : ce n'est pratiquement que ce type de bulle qu'on rencontre dans les écoulements eau-vapeur à faible titre dans les chaudières et les réacteurs nucléaires à eau pour des flux de chaleur modérés (fig. 8 et 9).

FIG. 7

Evolution des diamètres des bulles
avec la pression.

$$\varphi = 8,3 \text{ W/cm}^2$$

$$\varphi = 25 \text{ W/cm}^2$$

$$\varphi = 51,5 \text{ W/cm}^2$$

$$\varphi = 87,8 \text{ W/cm}^2$$

$$\varphi = 133,5 \text{ W/cm}^2$$

$$\varphi = 217 \text{ W/cm}^2$$

0 ————— 1 cm

FIG. 8

Ebullition à 50 kg/cm² sur un tube horizontal de 2 mm de diamètre. $T_{liq.} = T_{sat.}$

FIG. 9
Ebullition à 140 kg/cm².

BIBLIOGRAPHIE

[1] FRITZ (W.) et ENDE (W.). — <i>Physik Zeitschr.</i>, vol. 37, p. 391-401, 1936. [2] JAKOB (M.). — <i>Heat transfer</i>, vol. I, p. 614, 1949. [3] DIAMANT (W.). — <i>Chaleur et Industrie</i>, n° 436, p. 325-350, 1961.	[4] SÉMÉRIA (R.). — <i>VII^e Journées de l'Hydraulique</i>, 1962, Société Hydrotechnique de France, Paris, p. 90-97. [5] SÉMÉRIA (R.) et GOUZY (A.). — <i>Pool boiling under high pressure</i>, film muet 16 mm. Service des Transferts Thermiques, Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, 1962.