Étude du mouvement d'une bulle de gaz dans un liquide à l'intérieur d'un diffuseur

PAR

Lucien Chincholle ET **Anatoli Sevastianov**

Professeur à l'Université Paris Sud
Laboratoire de Génie Electrique de Paris

Maitre Assistant à l'institut
Energétique de Moscou

La mécanique des émulsions intéresse de nombreux domaines tels que la chimie, l'hydraulique, l'énergie nucléaire, le chauffage urbain et également la magnétohydrodynamique utilisant des métaux liquides. Beaucoup de publications traitent de ce problème mais les résultats paraissent souvent divergents à cause, semble-t-il, des conditions expérimentales mal définies et qui sont propres à chaque appareil. Il est actuellement impossible d'effectuer une synthèse des résultats rencontrés dans la littérature sauf lorsque les appareils et les conditions expérimentales sont identiques ce qui est rarement le cas.

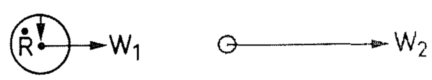
Les approches théoriques se font, soit en considérant l'émulsion comme un fluide spécial, soit en étudiant le mouvement d'une bulle isolée mais sans tenir compte bien souvent de l'inertie du liquide qui l'entoure. Ce travail est une première étape, en vue d'étudier le comportement des bulles de vapeur dans un divergent. Il devrait permettre de mieux comprendre les phénomènes physiques liés au mouvement d'une bulle de gaz de volume variable dans un diffuseur. Pour cela on utilise les conclusions d'une étude antérieure sur la mécanique des bulles [1] notamment la notion d'autopropulsion des bulles par effet fusée. Un problème analogue a déjà été abordé par Yeh [2] mais le traitement des équations par ordinateur ne permet pas, à notre avis, de bien comprendre l'influence des différents paramètres. Nous nous proposons donc d'étudier l'évolution d'une bulle d'air dans l'eau, à l'intérieur d'un diffuseur où existe un gradient de pression bien défini ; c'est le cas du diffuseur d'injecteur d'un dispositif de conversion d'énergie. La question qui se pose est de savoir si la bulle sera entraînée par le fluide, si elle va remonter à contre-courant ou bien si elle se propagera plus rapidement que lui vers la sortie du diffuseur.

1. Rappels sur l'effet fusée

Nous rappellerons succinctement quelques résultats relatifs au mouvement d'une bulle de volume variable dans un liquide.

Ne pouvant étudier le mouvement de façon générale, nous avons eu recours à quelques hypothèses classiques : liquide parfait, pression constante à l'intérieur de la bulle, absence de forces de gravité et de tension superficielle. D'autre part, nous avons supposé que les bulles d'un diamètre inférieur au millimètre restaient sphériques et que la vitesse du liquide, autour d'elles, dérivait d'un potentiel. Ceci nous a permis de tenir compte des forces d'inertie induite, paramètre souvent négligé, qui constitue le thème principal de notre étude et dont nous avons mis en évidence sa valeur intrinsèque.

Soit une bulle sphérique de diamètre D se déplaçant à la vitesse $\vec{W}_1$ (fig. 1a). Un point de la surface est animé par rapport au centre d'une vitesse radiale $\dot{R}$. Celle-ci peut être positive (la bulle grossit : explosion) ou négative (la bulle se réduit : implosion).



1a/

Le calcul se développe à partir de l'équation fondamentale de la dynamique, de l'équation de Bernoulli généralisée et de l'expression différentielle de l'énergie cinétique du liquide mis en mouvement. On obtient ainsi la pression en un point de la surface de la bulle. L'intégration de toutes les forces de pression sur cette surface donne la force résultante appliquée. Elle prend l'une des formes suivantes qui sont identiques entre elles

$$\vec{F} = - M' \frac{d\vec{W}}{dt} + \vec{W} \frac{dM'}{dt} \qquad (1)$$

$$\vec{F} = - M' \frac{d\vec{W}}{dt} + \vec{W} \frac{3}{D} \frac{dD}{dt} \qquad (2)$$

$$\vec{F} = - \frac{d\,(M'\vec{W})}{dt} \qquad (3)$$

M' représente la moitié de la masse de la goutte du liquide qui remplirait la bulle. Cette masse, appelée masse induite, joue un rôle très important, souvent méconnu. Elle donne à la bulle qui est une entité géométrique, une existence réelle. Comme les équations le suggèrent, nous montrerons qu'une bulle dispose d'une masse effective, d'une énergie cinétique de translation $T' = 1/2\ M'W^2$ et d'une énergie potentielle de pression. Celle-ci peut se transformer en énergie cinétique d'implosion $T'' = 1/2\ M''\dot{R}^2$ puis en énergie cinétique de translation.

Les trois relations ci-dessus qui caractérisent les forces d'inertie d'une bulle permettent de concevoir physiquement son évolution.

La présence du terme M' dans toutes les formules conduit à remplacer le mouvement complexe de translation d'une bulle dans un fluide par celui d'une particule de masse M' située dans le vide.

Définition de l'effet fusée

En l'absence de toute force extérieure, la relation (3) donne : $M'\vec{W}$ = constante. Elle exprime la conservation de la quantité de mouvement du "pébullon", qui est la particule équivalente à la bulle dans son mouvement de translation. Ce résultat spécifie la valeur que prend la quantité de mouvement. Nous avons précisé le profil des vitesses au cours d'une étude sur la formation du microjet qui suit la bulle en mouvement et qui transporte l'énergie cinétique [3].

On peut dire également que le pébullon est soumis à une force $\vec{W}\,dM'/dt$ (1) ou encore à une accélération que nous appelons accélération de l'effet fusée

$$\vec{\Gamma}_f = \frac{3\vec{W}}{D} \frac{dD}{dt}$$

En effet le pébullon éjecte la masse dM'/dt par unité de temps. Comme une fusée, il compense la perte de quantité de mouvement correspondante par une valeur égale et opposée, ce qui accroît sa vitesse.

De même, puisque une bulle présente les mêmes caractéristiques dynamiques, nous pouvons dire qu'elle s'autopropulse par effet fusée. Une variation de son volume entraîne une variation de sa vitesse de translation. Tout se passe comme si elle éjectait une partie de sa masse induite : au cours de son implosion par exemple, certaines particules du fluide ambiant retrouvent la vitesse nulle du liquide à l'infini. La conservation de la quantité de mouvement $\overrightarrow{M'W}$ implique un accroissement de la vitesse des autres particules en mouvement, c'est-à-dire finalement une accélération de la bulle.

En résumé, une bulle peut s'autopropulser par variation de volume : une diminution de volume l'accélère : effet fusée direct ; une augmentation de volume la freine : effet rétrofusée.

Afin de montrer l'importance de l'effet fusée lorsqu'il se développe pleinement nous signalerons par exemple, qu'une bulle de cavitation peut avoir, en fin d'implosion une vitesse de 1000 m/s et que, si elle heurte une paroi, le microjet qui la suit, d'un diamètre de l'ordre de 0.01 micron, créera une pression d'impact de l'ordre de 10000 bars.

Application au mouvement d'une bulle dans un diffuseur

L'effet fusée caractérise le rôle des forces d'inertie du liquide entourant la bulle. Lorsque le volume d'une bulle évolue, il se traduit par une variation de sa vitesse relative par rapport au liquide.

Dans un diffuseur la vitesse absolue d'une bulle le long de l'axe dépendra donc de la vitesse du liquide et du gradient de pression qui module son volume. Nous pouvons écrire l'équation de son mouvement en appliquant la formule fondamentale de la dynamique :

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \Sigma\ \vec{F}$$

m : masse propre de la bulle
$\vec{V}$: vitesse absolue de la bulle
$\Sigma\vec{F}$: somme de toutes les forces appliquées : forces de pression, forces de frottement et forces extérieures.

Pratiquement la masse propre m de la bulle est négligeable devant la masse induite M'. On peut alors utiliser le concept de la pébulle et considérer le mouvement d'une particule de masse M' dans le vide. Comme il est possible de mettre M' en facteur dans l'équation du mouvement on obtient par simplification une expression donnant la valeur de l'accélération :

$$\vec{\Gamma} = \vec{\Gamma}_f + \vec{\Gamma}_t + \vec{\Gamma}_A + \vec{\Gamma}_d + \Sigma\ \vec{\Gamma}_i$$

$\vec{\Gamma}_f = \dfrac{3\vec{W}}{D} \dfrac{dD}{dt}$: accélération due à l'effet fusée

D diamètre de la bulle
$\vec{\Gamma}_t$ accélération consécutive aux forces de frottement
$\vec{\Gamma}_A$ accélération relative aux forces d'Archimède
$\vec{\Gamma}_d$ accélération due à l'effet de divergence du canal
$\Sigma\vec{\Gamma}_i$ accélérations diverses.

2. Equation du mouvement d'une bulle d'air dans un diffuseur

Nous établirons l'équation du mouvement d'une bulle d'après les hypothèses suivantes :

- L'écoulement du liquide dans l'axe du diffuseur et le déplacement de la bulle sont axiaux ce qui conduit à négliger la poussée d'Archimède.
- Le champ de pression est du type non uniforme stratifié plan.

- Les forces d'inertie sont données par la même expression que lorsque grad $p = 0$ [1].
- La bulle est soumise à une "poussée d'Archimède". On sait qu'en hydrostatique la poussée d'Archimède est la résultante des forces de pression s'exerçant sur la surface d'un corps immergé. Nous conserverons cette appellation quel que soit le champ de pression en prenant comme gradient de pression celui qui existe sur l'isobare passant par le centre de la bulle. Cette force est dirigée vers la zone de basse pression c'est-à-dire vers l'entrée du diffuseur.
- La bulle considérée est suffisamment petite pour que les forces de tension superficielle lui assurent une forme sphérique.
- La pression à l'infini de la bulle est constante et égale à celle de l'isobare passant par son centre de gravité
- La bulle est soumise aux forces de frottement.
- On ne tiendra pas compte des autres forces.
- La masse propre de la bulle est négligeable par rapport à la masse de la pébulle.
- La bulle renferme un gaz qui suit la loi de Mariotte et dont la valeur de la pression est celle de l'isobare déjà définie.

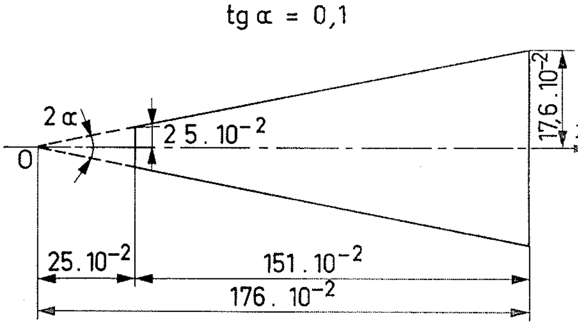
Analyse des forces mises en jeu

Le diffuseur est un canal divergent conique d'axe $\vec{Oz}$ et d'angle au sommet 2α (figure 1b). Si ρ est la masse spécifique du liquide, le gradient de pression sera égal à ρa.

- Accélération due à l'effet fusée : $\vec{\Gamma}_f = -\frac{3\vec{W}}{D}\frac{dD}{dt}$
- Accélération due à la "poussée d'Archimède" ; celle-ci a comme valeur $4/3\ \pi \rho R^3\ a$ (R : rayon de la bulle). L'accélération correspondante sera donc égale à $-2a$. On ne tient pas compte de la poussée d'Archimède verticale classique.
- Accélération correspondant aux frottements. Les forces de frottement peuvent se mettre sous la forme $\vec{F}_t = \frac{\epsilon}{2} C_x W^2 \rho \pi R^2$

C_x : coefficient de trainée expérimental qui est fonction de nombreux paramètres et notamment du nombre de Reynolds ; nous prendrons $C_x = 0{,}264$.

$\epsilon = \pm 1$ ($\epsilon = 1$ si $\vec{W}$ est positif).



1b/ Schéma du diffuseur

L'accélération s'écrit alors : $\vec{\Gamma}_t = W^2 \frac{3}{2} \frac{\epsilon C_x}{D}$

- Accélération du liquide due à l'effet de divergence du canal. On peut l'exprimer comme la dérivée de la vitesse du liquide le long de l'axe $\vec{Oz}$ soit $d\vec{V}_L/dt$; cette accélération est négative.

Equation du mouvement de la bulle

$$\vec{\Gamma} = \vec{\Gamma}_f + \vec{\Gamma}_t + \vec{\Gamma}_A + \vec{\Gamma}_d$$

$$\frac{d\vec{V}_b}{dt} = -\frac{3\vec{W}}{D}\frac{dD}{dt} - W^2 \frac{3}{2}\frac{\bar{\epsilon} C_x}{D} - 2\vec{a} + \frac{d\vec{V}_L}{dt}$$

ou :

$$\frac{d\vec{V}_b}{dt} + \vec{W}\frac{3}{D}\frac{dD}{dt} + W^2 \frac{3}{2}\frac{\bar{\epsilon} C_x}{D} + 2\vec{a} - \frac{d\vec{V}_L}{dt} = 0$$

L'accélération de la bulle dans son mouvement de translation dépend notamment du terme dD/dt qu'on peut transformer en appliquant le théorème de Bernoulli le long d'une ligne de courant :

$$p + \frac{1}{2}\rho V_L^2 = C_o = \text{constante}$$

Le débit est égal à : débit $= V_L\ \pi \rho\ \mathrm{tg}^2 \alpha\ z^2$

ce qui donne : $p = C_o - \frac{1}{2}\rho \frac{C_1^2}{z^4}$

avec : $C_1 = \frac{\text{débit}}{\pi \rho\ \mathrm{tg}^2 \alpha} = \text{constante}$

On peut calculer le gradient de pression le long de l'axe $\vec{Oz}$.

$$\frac{dp}{dz} = \rho \frac{2C_1^2}{z^5}$$

Comme : $dp/dz = \rho a$ on en tire la valeur de a :

$$a = \frac{2C_1^2}{z^5} = \frac{C}{z^5} \quad \text{avec} \quad C = 2C_1^2$$

et celle de p : $\quad p = C_o - \frac{\rho a}{4} z$

La loi de Mariotte permet d'écrire : $p D^3 =$ constante d'où :

$$\frac{1}{p}\frac{dp}{dt} = -\frac{3}{D}\frac{dD}{dt}$$

On en tire la valeur de la vitesse d'implosion de la bulle :

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{DV_b}{3}\frac{4\rho a}{4C_o - \rho a z}$$

Son signe ne dépend que de celui de V_b. Si $V_b > 0$ c'est-à dire si la bulle va vers la zone de haute pression, son volume diminue. Si $V_b < 0$, elle remonte vers l'origine et son volume augmente.

Enfin, l'accélération due à l'effet de divergence du canal peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{dV_L}{dz}\frac{dz}{dt} = V_L \frac{dV_L}{dz} = \frac{-C}{z^5} = -a$$

L'accélération absolue de la bulle prend alors la forme :

$$\Gamma = W^2 \left(\frac{4\rho \frac{C}{z^5}}{4C_0 - \rho \frac{C}{z^4}} - \frac{3\,\epsilon\, C_x}{2\ D} \right) + W \frac{4\rho \frac{C}{z^5}}{4C_o - \rho \frac{C}{z^4}} \cdot \frac{C_1}{z^2} - \frac{3C}{z^5}$$

Plaçons-nous en un point où z est fixe. On obtient alors une équation du second degré dont on peut calculer les racines W_1 et W_2. Pour une valeur de W comprise entre ces racines on a une valeur négative de l'accélération. Au contraire celle-ci est positive en dehors de cet intervalle. Ce sont les conditions initiales notamment $\vec{W_o}$, V_{Lo}, D_o qui définissent l'accélération ou le ralentissement de la bulle et par suite sa vitesse relative $\vec{W}$ en un point de l'axe $\vec{Oz}$.

En faisant varier le paramètre z on obtient une famille de courbes W_1 (z) et W_2 (z) ce qui définit les zones d'accélération positive ou d'accélération négative (fig. 2 et fig. 3). Il peut arriver qu'une bulle qui parcourt l'axe $\vec{Oz}$ traverse ces courbes : elle voit alors son accélération changer de signe.

La résolution de l'équation est difficile à cause du signe de ϵ. C'est pourquoi, en première approximation nous ne tiendrons pas compte du frottement.

L'équation s'écrit alors :

$$\Gamma = W^2 \frac{4\rho \frac{C}{z^5}}{4C_o - \rho \frac{C}{z^4}} + W \frac{C_1}{z_2} \frac{4\rho \frac{C}{z^5}}{4C_o - \rho \frac{C}{z^4}} - \frac{3C}{z^5} \qquad (4)$$

ou

$$\Gamma = V_b^2 \frac{4\rho \frac{C}{z^5}}{4C_o - \rho \frac{C}{z^4}} - V_b \frac{C_1}{z^2} \frac{4\rho \frac{C}{z^5}}{4C_o - \rho \frac{C}{z^4}} - \frac{3C}{z^5} \qquad (5)$$

En prenant z comme paramètre on peut calculer les racines des deux équations pour $\Gamma = 0$. On obtient :

$$W_1 = \frac{-V_L}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{12C_o}{\rho} - 5V_L^2}$$

et

$$W_2 = \frac{-V_L}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{12C_o}{\rho} - 5V_L^2}$$

ou

$$V_{b1} = \frac{V_L}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{12C_o}{\rho} - 5V_L^2}$$

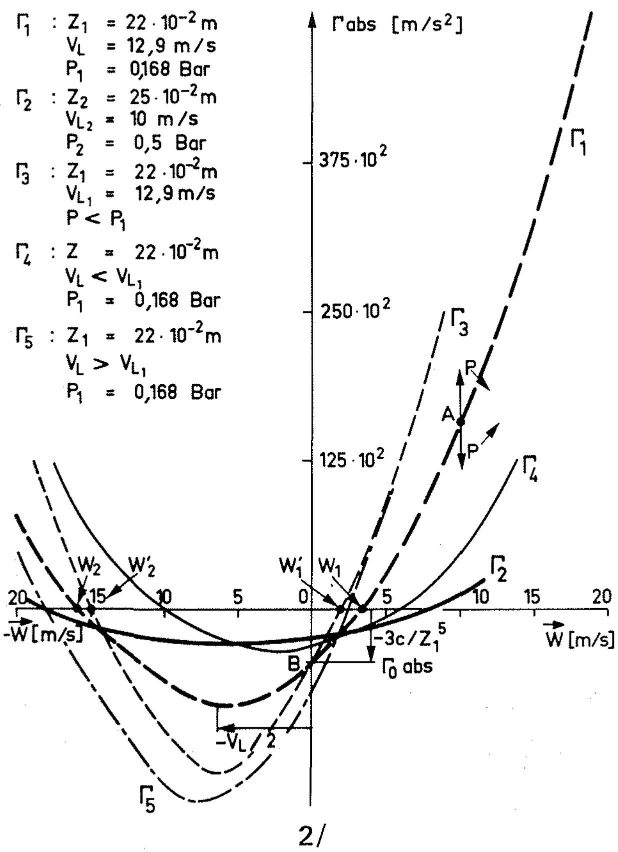
et

$$V_{b2} = \frac{V_L}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{12C_o}{\rho} - 5V_L^2}$$

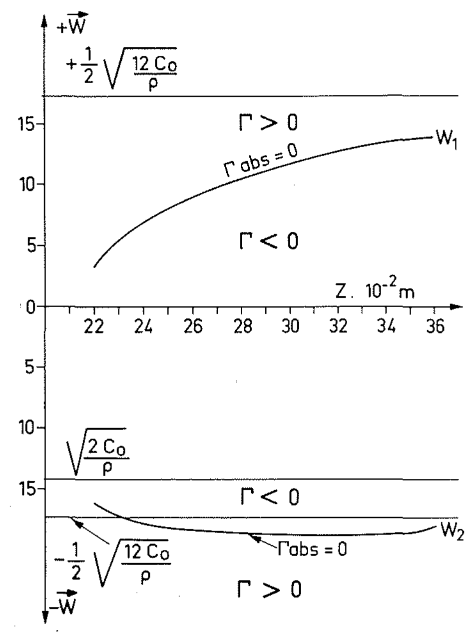
Etude des courbes $\Gamma = f(W)$

Pour les valeurs :

$$\frac{-V_L}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{12C_o}{\rho} - 5V_L^2} < W < \frac{-V_L}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{12C_o}{\rho} - 5V_L^2}$$



2/



3/ Variations de la vitesse relative caractéristique d'une bulle le long du diffuseur pour une accélération nulle

l'accélération Γ est négative c'est-à-dire que :

- si la bulle va vers la sortie elle ralentit
- si elle remonte le courant elle accélère dans cette direction.

La figure 2 montre les courbes Γ (W) représentatives des solutions de l'équation, pour certaines valeurs de z.

En chaque point du diffuseur caractérisé par la cote z, on obtient par exemple, Γ_1 pour $z_1 = 0{,}22$ m et Γ_2 pour $z_2 = 0{,}25$ m. Ce sont des paraboles qui coupent :

- l'axe $\overrightarrow{OW}$ en W_1 et W_2 racines de l'équation (4) pour $\Gamma = 0$
- l'axe $\overrightarrow{O\Gamma}$ au point Γ_o de valeur $\Gamma_o = -3C/z^5$; en ce point la vitesse relative est nulle mais la bulle est soumise à une accélération négative qui tend à la ramener vers l'origine.

Cette courbe définit l'accélération de la bulle dans des conditions déterminées de vitesse relative et de position. Elle présente un minimum pour :

$$W = \frac{-V_L}{2}$$

qui donne l'accélération

$$\Gamma_m = \frac{-\rho}{2} \frac{C^2}{z^9 \left(4C_o - \rho \frac{C}{z^4}\right)} - \frac{3C}{z^5}$$

Influence de la pression. La courbe Γ_1 correspond à une pression statique de 0,168 bar. Quand celle-ci prend une valeur inférieure on obtient la courbe Γ_3. Cette famille de courbes coupe l'axe $\overrightarrow{O\Gamma}$ au même point B qui est indépendant de la pression. On remarque également que l'intervalle entre les racines diminue, ainsi que l'accélération minimale. L'évolution de la courbe Γ_1 en fonction de la pression est indiquée en A.

Influence de la vitesse du liquide. Lorsque la vitesse du liquide augmente, la courbe se décale vers la gauche et le minimum diminue : on peut comparer ainsi les courbes Γ_1, Γ_4 et Γ_5.

Etude des variations de la vitesse relative $\vec{W}$ le long de l'axe Oz.

Sur la figure 3 on a représenté le long de l'axe $\overrightarrow{Oz}$ les valeurs particulières de $\vec{W}$, correspondant à une accélération nulle de la bulle ($\Gamma = 0$). Les points des deux courbes W_1 et W_2 sont en fait successivement les racines de l'équation du mouvement que nous avons déjà calculées en un point z.

La courbe W_1 tend vers $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{12C_o}{\rho}}$ pour une vitesse V_L nulle lorsque z tend vers l'infini et vers zéro lorsque la pression statique tend vers zero.

La deuxieme courbe W_2 tend vers $-\sqrt{\frac{2C_o}{\rho}}$ lorsque p tend vers zéro et vers $-\frac{1}{2}\sqrt{\frac{12C_o}{\rho}}$ lorsque z tend vers l'infini (vitesse du liquide nulle).

Quand la pression tend vers zéro, le diamètre de la bulle tend vers l'infini. Cette limite ne sera donc pas atteinte.

Le comportement de la bulle le long de l'axe $\overrightarrow{Oz}$ dépend des conditions initiales à l'entrée du diffuseur. Sur la figure 4 nous représentons les variations des vitesses relative $\vec{W}$ et absolue $\vec{V_b}$ d'une bulle le long de l'axe $\overrightarrow{Oz}$ avec les conditions initiales suivantes :

- point de départ de la bulle : $z_o = 0{,}25$ m
- diamètre de la bulle : $D_o = 0{,}001$ m
- vitesse du liquide : $V_L = 10$ m/s
- pression : $p_o = 0{,}5$ bar.

Trois cas particuliers ont été considérés :

$$\vec{W} > \vec{W}_1 \quad ; \quad \vec{W} < \vec{W}_2 \quad ; \quad \vec{W}_1 > \vec{W} > \vec{W}_2 \ ;$$

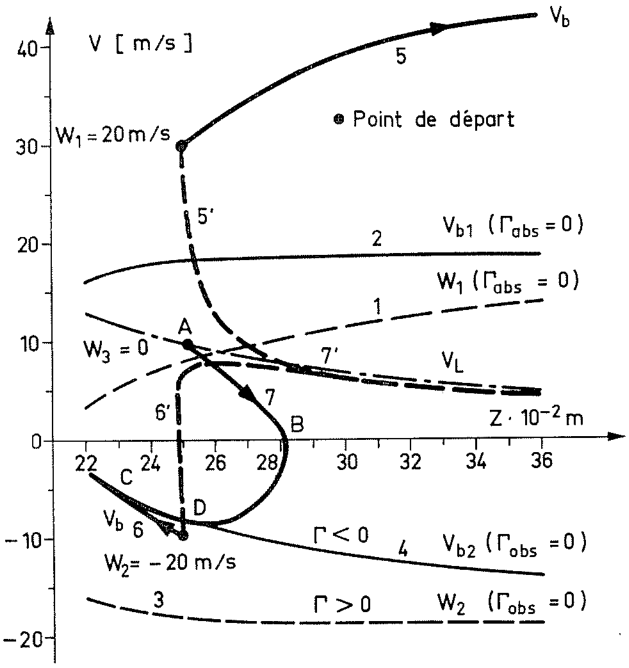
Les courbes limites W_1 (courbe 1), V_{b1} (courbe 2), W_2 (courbe 3) et V_{b2} (courbe 4) ont été établies pour $\Gamma = 0$.

L'accélération est négative entre les courbes W_1 et W_2 et positive à l'extérieur.

Les courbes 5, 6 et 7 de la figure 4 représentent les variations de la vitesse absolue $\vec{V_b}$ de la bulle le long de l'axe $\overrightarrow{Oz}$, successivement pour les vitesses initiales suivantes :

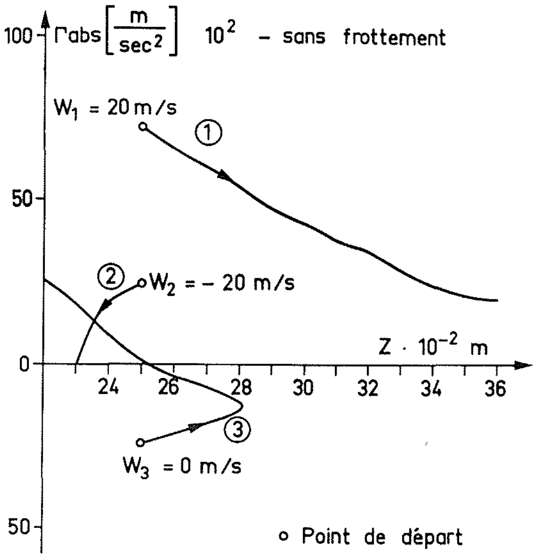
$\vec{W} = 20$ m/s valeur supérieure à W_1
$\vec{W} = -20$ m/s valeur inférieure à W_2
$\vec{W} = 0$ valeur comprise entre W_1 et W_2

Premier cas : $\vec{W} = 20$ m/s. L'accélération est positive et la bulle se déplace vers la sortie du diffuseur plus rapidement que le liquide. L'effet fusée étant prépondérant il augmente la vitesse relative de la bulle. Toutefois



4/

——— V_b (sans frottement) : vitesse absolue de la bulle
– – – V_b (avec frottement) : vitesse absolue de la bulle
–·–·– V_L : vitesse absolue du liquide
——— V_{b1} et V_{b2} : vitesses caractéristiques absolues de la bulle correspondant à une accélération nulle.
– – – – W_1 et W_2 : vitesses caractéristiques relatives de la bulle correspondant à une accélération nulle.



5/ Variations de l'accélération d'une bulle le long du diffuseur pour différentes valeurs de vitesses relatives.

l'accélération Γ diminue car le gradient de pression décroît (Fig. 4.5 et Fig. 5.1).

Deuxième cas : $\vec{W} = -20$ m/s. L'accélération est également positive mais comme la bulle se déplace vers l'origine, la valeur absolue de sa vitesse va diminuer ainsi que l'accélération (fig. 4.6 et fig. 5.2). Celle-ci s'annule en C à la traversée de la courbe 4 puis devient négative ce qui ramène la bulle sur la courbe 4 qui constitue pour elle un écoulement stable. Elle se dirige donc vers l'origine. La poussée d'Archimède est prépondérante. L'effet fusée freine et travaille en effet rétrofusée.

Troisième cas : $\vec{W} = 0$ m/s. La bulle se trouve en A et sa vitesse est égale à celle du liquide (fig. 4.7). L'accélération étant négative la bulle sera freinée jusqu'à ce que sa vitesse s'annulle en B. Ensuite la vitesse deviendra négative et croîtra en valeur absolue car l'accélération est négative. En D la courbe 7 rencontre la courbe 4 correspondant à une accélération nulle. Comme précédemment la bulle va suivre cette courbe qui est un écoulement stable.

En résumé, la bulle se déplacera vers la sortie en ralentissant puis s'arrêtera et reviendra vers l'origine.

La poussée d'Archimède est prépondérante mais l'effet rétrofusée la réduit.

Remarques sur l'influence des forces de frottement

Les calculs ont été effectués en prenant comme valeur du coefficient de traînée $C_x = 0{,}264$, dans l'équation générale du mouvement. Nous avons considéré successivement les trois valeurs de vitesses relatives initiales déjà considérées.

a) $\vec{W} = 20$ *m/s.* La courbe 5 établie sans tenir compte du frottement est alors remplacée par la courbe 5'. Dans les conditions considérées on voit que la chute de vitesse est très rapide jusqu'à ce que la bulle soit entraînée par le liquide avec un léger glissement dû notamment à la poussée d'Archimède.

b) $\vec{W} = -20$ *m/s.* La courbe 6' fait apparaître l'importance des forces de traînée qui ramènent rapidement la bulle à une vitesse voisine de celle du liquide.

c) $\vec{W} = 0$ *m/s.* On retrouve le même résultat.

Dans les conditions expérimentales choisies on a un effet fusée négligeable. Toutefois, il pourrait être très important et conduire à une courbe de même allure que la courbe 5, en remplaçant la bulle de gaz qui suit la loi de Mariotte par une bulle de vapeur dont l'implosion est très rapide lors de la condensation. Ceci a été vérifié dans le cas de l'ébullition avec des bulles de vapeur en mouvement.

Bien entendu, on peut concevoir le cas intermédiaire mettant en jeu des bulles contenant un mélange de gaz et de vapeur. On observerait alors des accélérations bien plus importantes susceptibles de donner à la bulle des vitesses très diverses suivant les conditions initiales ; elle pourrait aussi bien accélérer vers la sortie que remonter vers l'entrée du diffuseur, le problème se compliquant par ailleurs avec les rebonds auxquels elle serait soumise et qui, parfois donneraient naissance à un mouvement oscillant.

C'est également le cas du diffuseur d'injecteur où la pression passe de 0,1 à plusieurs dizaines de bars ; le comportement d'une bulle de vapeur est intéressant à étudier à cause de l'importance que prend l'effet fusée.

Conclusion

Bien que le problème de l'écoulement d'une bulle ait été abordé par d'autres chercheurs utilisant l'équation du mouvement et son traitement par ordinateur nous avons voulu montrer qu'on pouvait le résoudre de manière plus physique et plus simple par le biais du modèle physique que constitue la particule équivalente à la bulle (pébulle). Les résultats sont satisfaisants. On peut voir notamment qu'à l'intérieur d'un diffuseur, suivant les conditions initiales, une bulle s'écoulera vers la sortie ou bien remontera vers l'entrée où encore suivra successivement ces deux trajets.

En permettant de comprendre le mécanisme physique du comportement d'une bulle dans un champ de pression ou de température, cette technique de travail devrait apporter une aide dans la conception de dispositifs industriels tels que les machines hydrauliques soumises à la cavitation ou les diffuseurs d'injecteurs dans les systèmes de conversion d'énergie.

Bibliographie

[1] CHINCHOLLE (L.) – Etude de l'écoulement d'une émulsion, Thèse Paris 1967.

[2] YEH (H.C.), YANG (W.J.) – Dynamics of bubbles moving in liquids with pressure gradient. *Journal of Applied Physics*. Vol. 39, N° 7, 1968.

[3] CHINCHOLLE (L.), QUICHAUD (G.) – Etude du microjet qui suit une bulle animée d'un double mouvement de translation et d'implosion. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences.* T. 265 Série A, 1967, p. 882.