

Formation Ingénieur 2000,  
filière « Génie Energétique ».  
Simulation d'une bulle en ascension par la méthode  
VOF (Volume of Fluid).\*

F. Ravelet<sup>1</sup>, K. Croci<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Lab. DynFluid, Arts et Metiers ParisTech*  
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.  
contact: kilian.croci@ensam.eu, florent.ravelet@ensam.eu

17 octobre 2016



FIGURE 1 – Bulles de champagne.

---

\*Ce document a été écrit en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, en utilisant la distribution GNU/Linux Ubuntu (<http://www.ubuntu-fr.org/>).

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Prérequis / rappels</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Attention</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Problème posé</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Domaine de calcul</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>Simulation sous StarCCM+</b>	<b>5</b>
<b>7</b>	<b>Contrôles graphiques</b>	<b>6</b>
<b>8</b>	<b>Analyse des résultats</b>	<b>6</b>
<b>9</b>	<b>Rédaction du rapport</b>	<b>9</b>
<b>A</b>	<b>Procédure pour l'initialisation</b>	<b>9</b>
<b>B</b>	<b>Procédure pour le calcul de la vitesse moyenne</b>	<b>10</b>
<b>C</b>	<b>Choix du pas de temps</b>	<b>10</b>

# 1 Objectifs

A l'issue de ce TP, vous devez être capable de :

- Simuler un problème multiphasique sous StarCCM+ en utilisant la méthode VOF.
- Analyser les résultats issus de la simulation.
- Comparer les résultats à des données bibliographiques.

# 2 Prérequis / rappels

Une notice et des tutoriels sur StarCCM+ sont disponibles sur le site <http://florent.ravelet.free.fr/ge2nuk.html>.

# 3 Attention

Le temps de calcul est relativement long à l'échelle d'un TP (environ 30 minutes). Il est donc conseillé de ne pas perdre trop de temps au début de la séance.

# 4 Problème posé

Il s'agit de simuler la montée d'une bulle de gaz dans un liquide (voir par exemple la Fig. 1). La bulle est initialement sphérique et au repos et est soumise aux seules forces de gravitation. L'écoulement est contrôlé par deux nombres adimensionnels : le nombre de Bond ( $Bo$ ), qui représente le rapport entre les forces gravitationnelles (effets de flottabilité) et la tension de surface (effets de capillarité) sur une interface entre deux fluides, et le nombre de Morton ( $Mo$ ) qui rend compte de la physico-chimie du système :

$$Bo = \frac{\rho_l g D^2}{\sigma}$$

$$Mo = \frac{g \mu_l^4}{\rho_l \sigma^3}$$

avec :

- $\rho_l$  la masse volumique du liquide ;
- $g$  l'accélération gravitationnelle ;
- $\sigma$  la tension superficielle ;
- $\mu_l$  la viscosité du liquide ;
- $D$  le diamètre de la bulle.

Le nombre de Bond (ou nombre d'Eötvös) donne une idée de la déformation d'une bulle : lorsque  $Bo > 1$ , la tension superficielle devient relativement faible et la bulle qui monte dans le liquide sous l'effet de la gravité se déforme significativement.

Dans cette étude, on réalise une simulation en 2D axisymétrique, pour un diamètre de bulle donné, en choisissant un nombre de Bond et un nombre de Morton. Les paramètres seront choisis dans les mêmes gammes que celles étudiées par T. Bonometti et J. Magnaudet dans un article de référence, consacré à une méthode de simulation numérique originale [1].

Les contrastes de densité et de viscosité sont fixés :

- $\rho_l/\rho_g = 10^3$
- $\mu_l/\mu_g = 10^2$

Les valeurs suivantes sont également fixées :

- $D = 10^{-2}m$
- $\rho_l = 1000kg.m^{-3}$
- $\rho_g = 1kg.m^{-3}$
- $g = 10m.s^{-2}$

On va ensuite choisir une combinaison de viscosité et de tension de surface correspondant à un cas de l'article de référence [1]. Vous devrez choisir un cas parmi ceux proposés dans le tableau 1.

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8
$\mu_l$	0.8409	0.8409	0.8409	0.1778	0.1778	0.1778	0.0473	0.0266
$\sigma$	0.1	0.01	0.001	0.1	0.01	0.001	1	0.1
$\Delta t$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$

TABLE 1 – Combinaisons à choisir parmi les valeurs de viscosité du liquide, de tension de surface, et le pas de temps correspondant pour la simulation. Tout est en unités S.I. Chaque cas correspond à un cas du tableau 2 : à vous de trouver la correspondance (pendant que le calcul tourne)!

## 5 Domaine de calcul

Pour laisser plus de temps à l'analyse et à l'interprétation des résultats, le domaine de calcul sera créé et maillé sous forme de tutoriel en début de TP. Il est présenté sur la figure 2.

La géométrie du problème est un rectangle de hauteur  $Z = 8D$ , suivant l'axe (Ox) et de largeur  $R = 1.5D$  suivant l'axe (Oy). Le centre du repère est placé au coin inférieur gauche.

On a alors trois zones pour les conditions aux limites :

- La paroi latérale (3), de type *wall* avec condition de glissement ;
- L'axe de symétrie du système (4) (type *axis*) ;
- Les parois du bas (1) et du haut (2) sont des parois solides (de type *wall*).

Le domaine est maillé en éléments structurés, d'une taille de  $\Delta x = D/50$  et contient donc 30000 éléments.

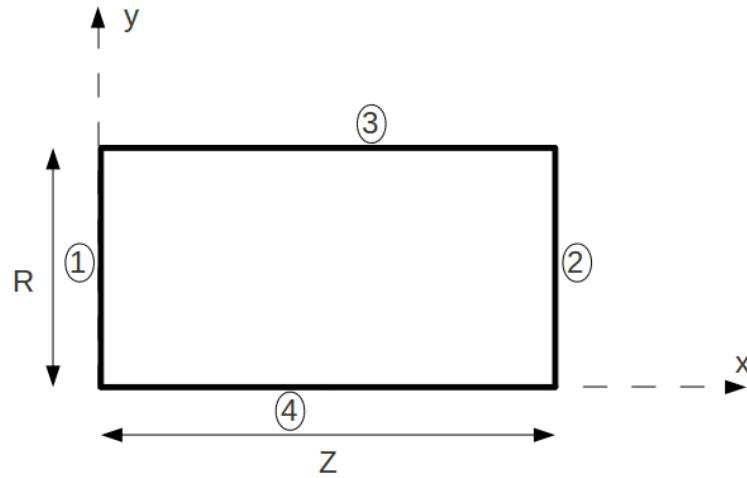


FIGURE 2 – Domaine maillé. Attention, sous StarCCM+, en axisymétrique, l’axe de symétrie doit être l’axe  $x$ , et donc la gravité est dirigée selon  $-x$ !

## 6 Simulation sous StarCCM+

1. Créer un dossier.
2. Démarrer le logiciel.
3. Sauver votre simulation dans le dossier créé.
4. Suivre les instructions données en séance de TP pour dessiner la géométrie, la mailler, définir les frontières et passer en 2D.
5. Suivre les instructions données en séance de TP pour paramétrer le calcul : on effectue une simulation instationnaire, axisymétrique, implicite de second ordre en temps et en espace. Le calcul est diphasique et basé sur la méthode Volume of Fluid (VOF), qui est une méthode efficace pour suivre l’interface dans le problème étudié<sup>1</sup>. Les forces gravitationnelles sont prises en compte dans le calcul, ainsi que la tension de surface.
  - Sélectionner les modèles adéquats.
  - Choisissez un cas du tableau 1.
  - Créer les deux phases et indiquer leurs propriétés physiques.
6. Initialisation : suivre la procédure décrite en annexe A page 9.
7. Post-traitement : pour étudier l’évolution temporelle de la vitesse de la bulle, il faut calculer, pour chaque pas de temps, la vitesse axiale moyenne  $\langle v_x \rangle$  définie comme :

$$\langle v_x \rangle = \frac{\int_D \alpha v_x}{\int_D \alpha}$$

---

1. il existe d’autres méthodes décrites par exemple dans la référence [1].

Suivre la procédure décrite en annexe B page 10.

8. Lancement des calculs : il faut choisir le pas de temps dans “Solver”  $\Rightarrow$  “Implicit unsteady”. Il faut l’adapter selon votre cas (voir Tab. 1 et annexe C pour plus d’explications). Cliquez ensuite sur le petit bonhomme qui court.

## 7 Contrôles graphiques

Il est possible d’afficher une carte de la fraction volumique d’une des deux phases (“Scene”  $\Rightarrow$  “Scalar”). En cours de calcul, il est possible de sauver des images afin d’étudier l’évolution de la bulle à intervalles réguliers. On pourra également afficher l’évolution de la quantité de gaz au cours du temps, ...

N’hésitez pas à demander de l’aide pour mettre en place ces post-traitements.

## 8 Analyse des résultats

Pendant la simulation, en attendant d’obtenir les résultats :

1. Repérer à quel cas de l’article de Bonometti & Magnaudet [1] correspond votre simulation. Le tableau 2 permet de retrouver les formes de bulles attendues, présentées en Fig. 3, et les signaux de vitesse ascensionnelle présentés en Fig. 4. Le but est bien sûr de comparer les résultats avec ceux obtenus dans cette étude lors de l’analyse.
2. Déduire de la vitesse terminale (Fig. 4) le coefficient de frottement pour la bulle de votre cas. Comparer aux valeurs données lors du précédent TD pour une bulle sphérique.
3. Cet article est disponible, vous pouvez le lire. Cela peut-être ardu. Néanmoins, il y a dedans quelques images issues d’expériences, qui peuvent nous rassurer quant-à nos simulations.
4. Un autre article [2] est disponible. Il est de lecture plus aisée. Vous prendrez ainsi conscience du fait que notre simulation où on force l’axisymétrie de l’écoulement et où la bulle est donc contrainte à rester sur l’axe ne serait sûrement pas physique pour d’autres paramètres. D’ailleurs, vous pourriez par exemple calculer les  $Bo$  et  $Mo$  pour les bulles de la Ref. [2] ?

Une fois les calculs finis :

1. Observer les formes de bulles, se comparer à la Fig. 3.
2. Etudier l’évolution temporelle de la vitesse de la bulle. Essayer de retrouver les formes des courbes en Fig. 4.
3. Pensez à regarder d’autres choses, explorez les possibilités de post-traitement.

$Bo = 1$	$Bo = 10$	$Bo = 10^2$	$Bo = 10^3$
	(b) 5	(c) $5 \times 10^3$	(d) $5 \times 10^6$
	(f) $10^{-2}$	(g) 10	(h) $10^4$
(i) $5 \times 10^{-8}$	(j) $5 \times 10^{-6}$		

TABLE 2 – Valeurs du nombre de Morton correspondant à chaque cas. Exemple : le cas (b) correspond à  $Bo = 10$  et  $Mo = 5$ .

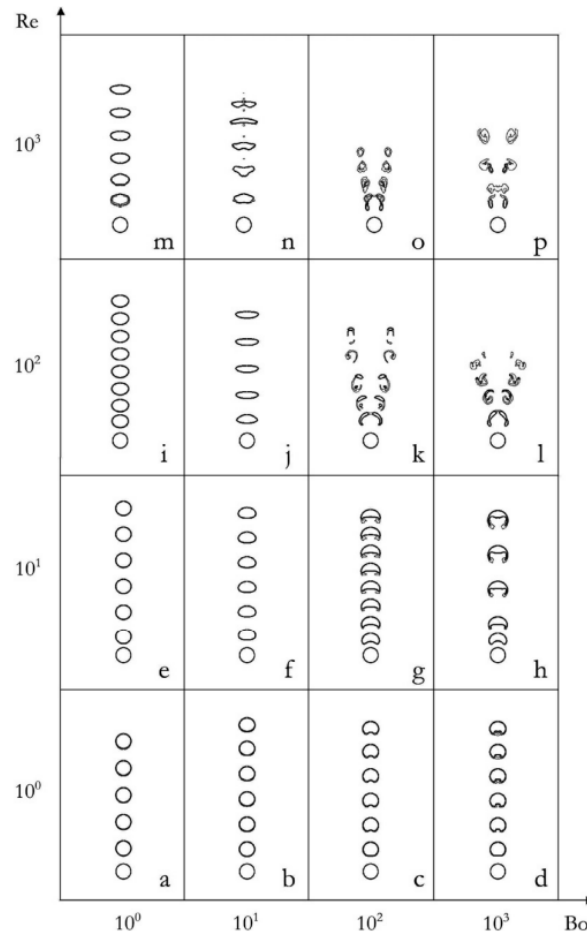


FIGURE 3 – Fig. 15 de la Référence [1]. Formes de bulles en fonction des nombres de Bond et de Reynolds.

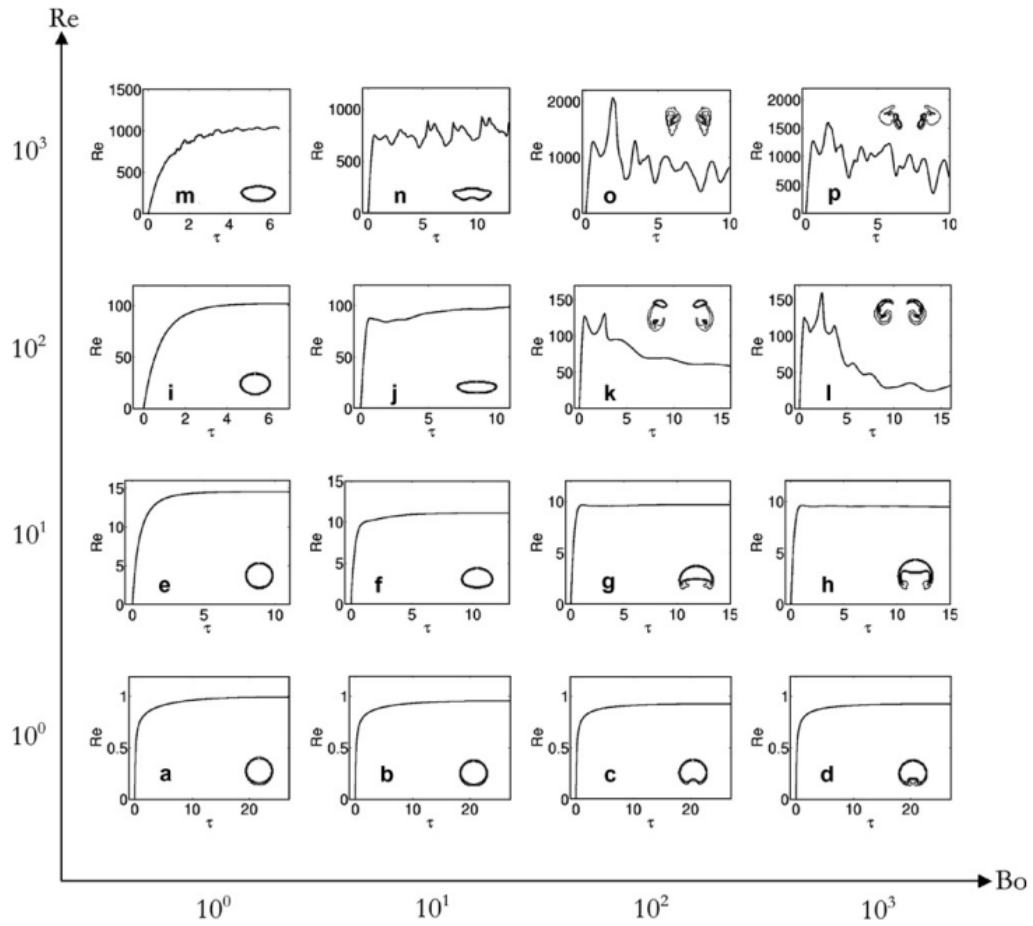


FIGURE 4 – Fig. 16 de la Référence [1]. Nombre de Reynolds instantané (*i.e.* vitesse verticale adimensionnée) pour les différents cas. Définition du nombre de Reynolds :  $Re = VD \times \rho_l / \mu_l$ .



## 9 Rédaction du rapport

Le rapport sera à transmettre au format pdf par mail à la fin de la deuxième séance. Il fera une dizaine de pages et comportera :

- Une introduction présentant le maillage, la simulation et les paramètres physiques de celle-ci.
- Une analyse des résultats de la simulation avec les comparaisons entre les vitesses limites et les coefficients de trainées simulées avec ceux fournis par Bonometti & Magnaudet [1] (Tableau 2 et Figures 4 et 5).
- Une conclusion dans laquelle sera discuté les résultats obtenus par la simulation (influence de la tension de surface et de la viscosité) ainsi que la validité des modèles utilisés (Cf Ellingsen & Risso [2] et Bonometti & Magnaudet [1]).

## Références

- [1] T. Bonometti, J. Magnaudet, An interface-capturing method for incompressible two-phase flows. Validation and application to bubble dynamics. International Journal of Multiphase Flow, **33**, pp.109-133, 2007.
- [2] K. Ellingsen, F. Risso, On the rise of an ellipsoidal bubble in water : oscillatory paths and liquid-induced velocity. Journal of FLuid Mechanics, **440**, pp.235-268, 2001.

## A Procédure pour l'initialisation

La bulle de gaz est introduite et placée dans le domaine, sur l'axe de symétrie en définissant tout d'abord une région circulaire de diamètre adéquat et située à l'endroit idoine. Pour ce faire, on va utiliser des "Field Functions", dans l'onglet "Tools".

→ Créer une fonction nommée *cercle*, dont le code est :

```
pow(pow($$Position[0]-0.01,2)+pow($$Position[1],2),0.5)
```

Cela correspond à :

$$cercle = \sqrt{(z - 0.01)^2 + r^2}$$

→ Créer une fonction nommée *Interieur*, dont le code est :

```
($cercle>0.005)?0:1
```

Cela correspond à un test qui dit « vrai » si :

$$cercle \leq 0.005$$

→ Créer une fonction nommée *Exterieur*, dont le code est :

```
1-$Interieur
```

Cela correspond à un test qui dit « vrai » si :

$$cercle > 0.005$$

- Dans “Continua” ⇒ “Physics 1 2D” ⇒ “Initial Conditions” ⇒ “Volume Fraction”, choisir la méthode “Composite”.
- Dans l’onglet “Composite”, choisir comme méthode “Field function” pour les deux phases, et y affecter les fonctions créées précédemment.

## B Procédure pour le calcul de la vitesse moyenne

On va calculer une moyenne pondérée par la fonction indicatrice de phase :

$$\langle v_x \rangle = \frac{\int_D \alpha v_x}{\int_D \alpha}$$

- Créer une fonction nommée  $\alpha V_x$ , dont le code est (avec XXX à remplacer par le nom que vous avez donné à votre phase gazeuse) :

`#{VolumeFractionXXX}*#{Velocity}[0]`

Cela correspond à :

$$\alpha V_x = \alpha V_{axiale}$$

- Créer dans “Reports” une intégrale volumique de la fonction créée  $\alpha V_x$ , la nommer par exemple *Numerateur*.
- Créer dans “Reports” une intégrale volumique de la fonction existante *VolumeFractionair*, la nommer par exemple *Denominateur*.
- Créer dans “Reports” une “expression”, que l’on nommera par exemple  $V_{moy}$  et dont le code est :

`#{NumerateurReport}/#{DenominateurReport}`

On a ainsi créé la quantité voulue. On peut alors faire un “monitor” et un “plot”, pour suivre l’évolution de la vitesse moyenne au cours des itérations.

## C Choix du pas de temps

Le nombre de Courant global doit idéalement être maintenu inférieur à 0.25. Ce nombre de Courant est grosso-modo le nombre de mailles que parcourt une information convectée à la vitesse de l’écoulement en un pas de temps :

$$CFL = \frac{V \Delta t}{\Delta x}$$

Ainsi, c’est à partir de la vitesse terminale relevée sur la figure 4 et afin d’assurer un  $CFL = 0.25$  que le pas de temps proposé dans le tableau 1 a été calculé.

On lancera dans un premier temps 1000 pas de temps, avec un maximum de 5 itérations par pas de temps. Il faudra peut-être en lancer plus, si le transitoire n’est pas achevé.