

Trajectoire de bulles

Les figures 90, 91 et 92 ci-dessous représentent toujours pour le débit Q1 et pour un GVF=10%, la trajectoire d'une bulle de gaz partant d'un point pris au milieu de la section d'entrée du domaine (ligne en rouge) et la ligne de courant d'une particule liquide partant du même point (ligne en noir). Les figures donnent également les positions successives de la bulle et de la particule liquide relevées pour un même écart temporel. On voit sur ces figures de façon qualitative qu'à l'intérieur de la grille d'aubes, la bulle de gaz se déplace légèrement plus vite que la particule fluide pour un diamètre de $200\mu\text{m}$. De par la force de traînée, elle se retrouve plus proche de la face en dépression et rencontre donc une vitesse moyenne locale plus forte puisque plus proche de l'extrados. Ce n'est pas le cas des grosses bulles (figure 92). Cependant, cet effet local disparaît dès la sortie de la grille pour des bulles de plus grosses dimensions ; les bulles reprennent une position relative identique à la phase liquide, si bien que globalement tout se passe comme si on était en phase homogène. Sur la figure 90 pour laquelle le diamètre de la bulle est $d_{bulle} = 100\mu\text{m}$, on voit que la trajectoire de la bulle suit quasiment la ligne de courant de la phase continue. En revanche, sur la figure 91, et ce pour un diamètre de bulles $d_{bulle} = 200\mu\text{m}$, on observe une accélération et une déviation de la trajectoire de celle-ci plus nette par rapport à celle de la phase continue. Pour un diamètre de la bulle plus important $d_{bulle} = 500\mu\text{m}$ sur la figure 92, la déviation est encore plus marquée.

La déviation se fait vers le côté en dépression des aubages où on observe une accumulation des bulles de gaz.

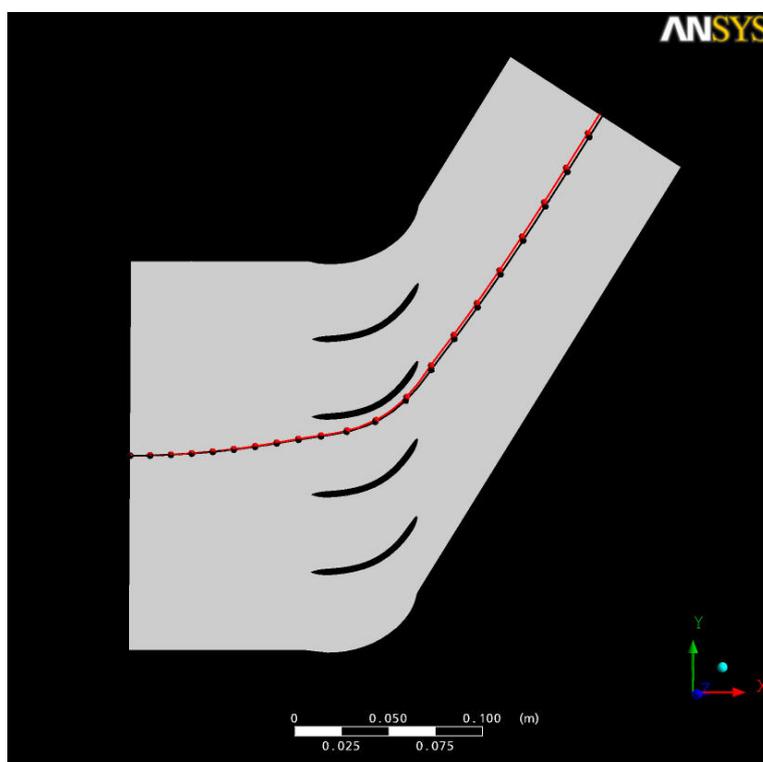


Figure 90: Trajectoire d'une bulle de diamètre $d_{bulle} = 100\mu\text{m}$

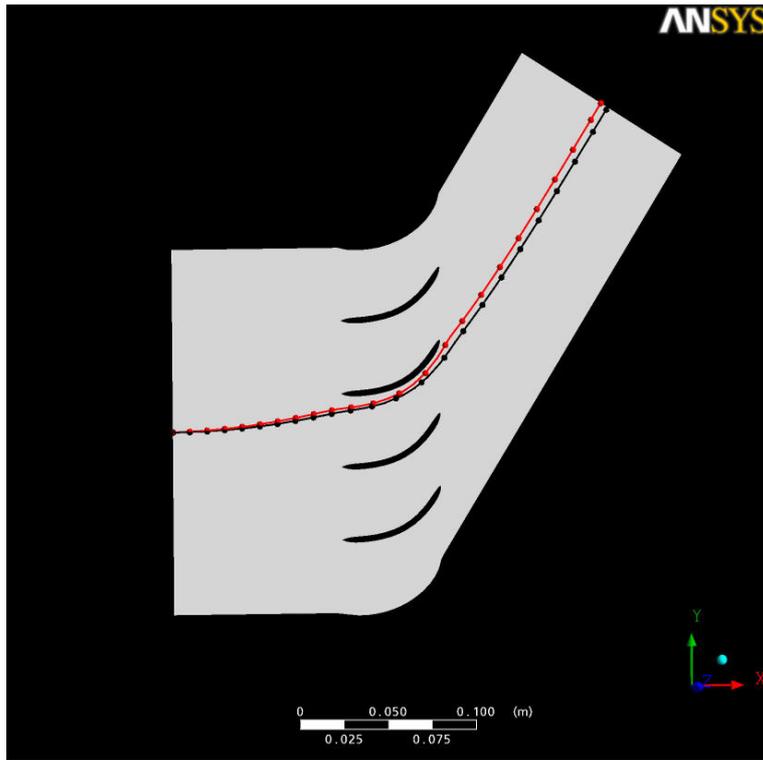


Figure 91: Trajectoire d'une bulle de diamètre $d_{bulle} = 200 \mu m$

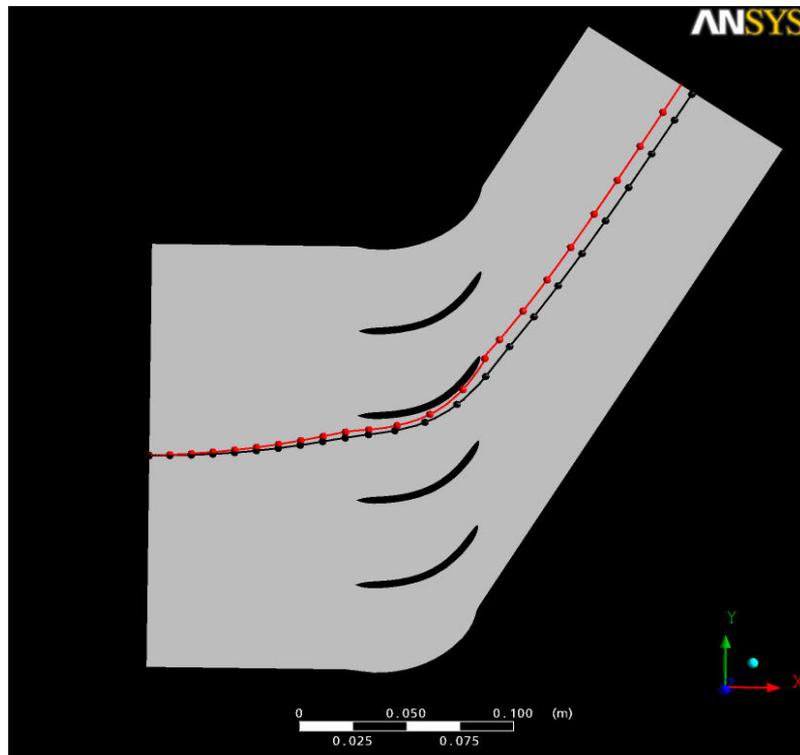


Figure 92: Trajectoire d'une bulle de diamètre $d_{bulle} = 500 \mu m$

Comme expliqué dans le chapitre 2, l'accumulation des bulles sur le côté en dépression des aubages peut s'expliquer au moyen des forces agissant sur une bulle de gaz isolée comme illustré sur la figure 93. En effet, on rappelle que la déviation des bulles est liée à l'action de la force de traînée F_d due à la vitesse de glissement entre les deux phases et la force due au gradient de pression F_p . Ainsi la résultante F_R de ces deux forces tend à diriger les bulles vers le côté en dépression des aubages où elles vont s'accumuler.

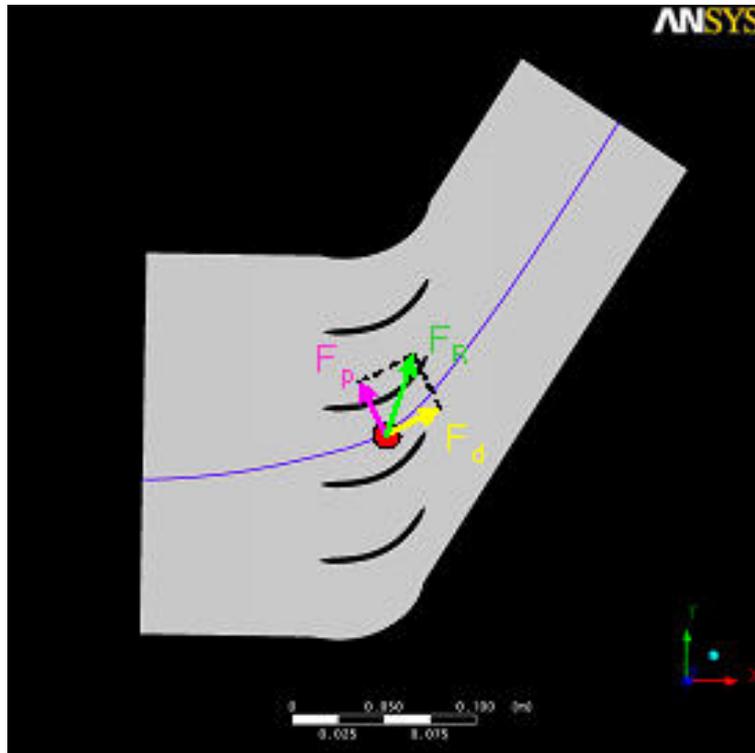


Figure 93: Forces agissant sur une bulle isolée

Ainsi notre étude démontre que l'accumulation des bulles de gaz sur le côté en dépression des aubages peut provoquer une modification de l'angle de l'écoulement β_2 en sortie. Compte tenu de l'effet de l'angle β_2 sur le gain de pression dans une pompe, nous allons tenter dans le chapitre 6 de développer une corrélation permettant de prévoir la dégradation des performances en écoulement diphasique. On voit déjà que cet angle sera fonction du GVF et du diamètre des bulles de gaz.

Influence des paramètres

Effet du GVF

Dans un premier temps, nous avons voulu voir comment la fraction volumique de gaz influait sur l'angle de l'écoulement de la phase liquide β_{2liq} en sortie en comparaison avec l'angle d'écoulement de sortie β_2 relevé pour le cas monophasique liquide.

On rappelle que le débit de la phase continue a peu d'impact sur l'angle de l'écoulement en monophasique.

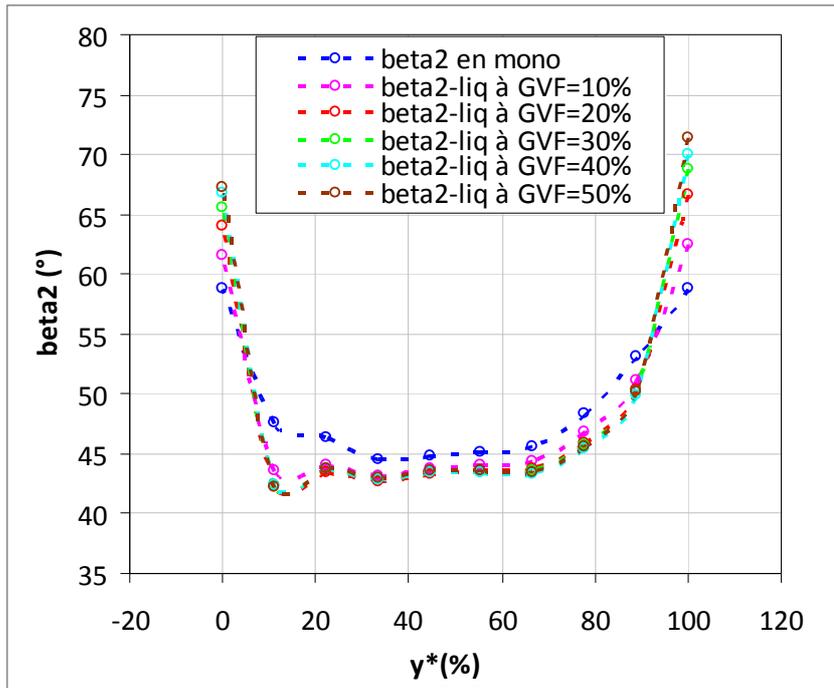


Figure 94: Angle β_{2liq} en fonction du GVF pour le débit Q1

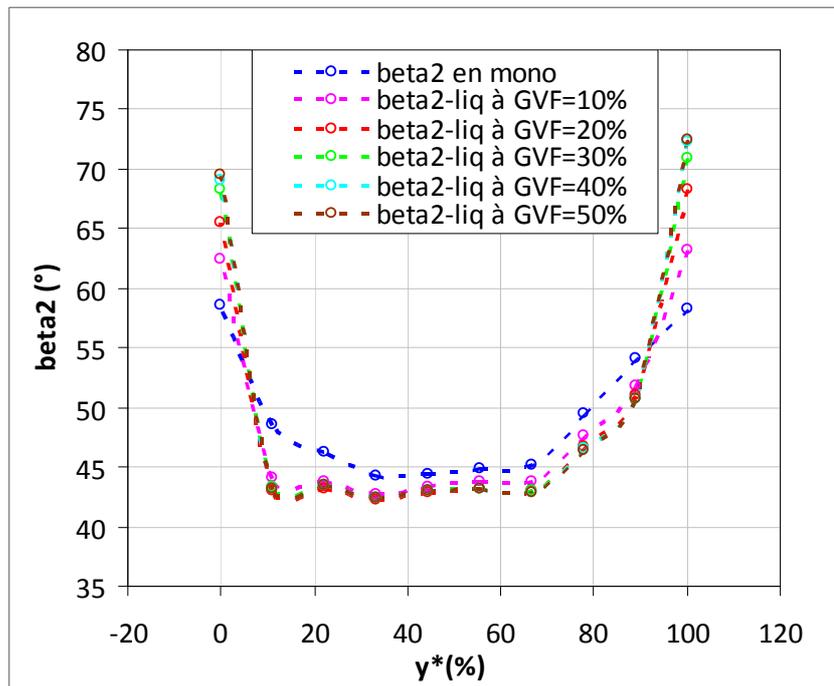


Figure 95: Angle β_{2liq} en fonction du GVF pour le débit Q2

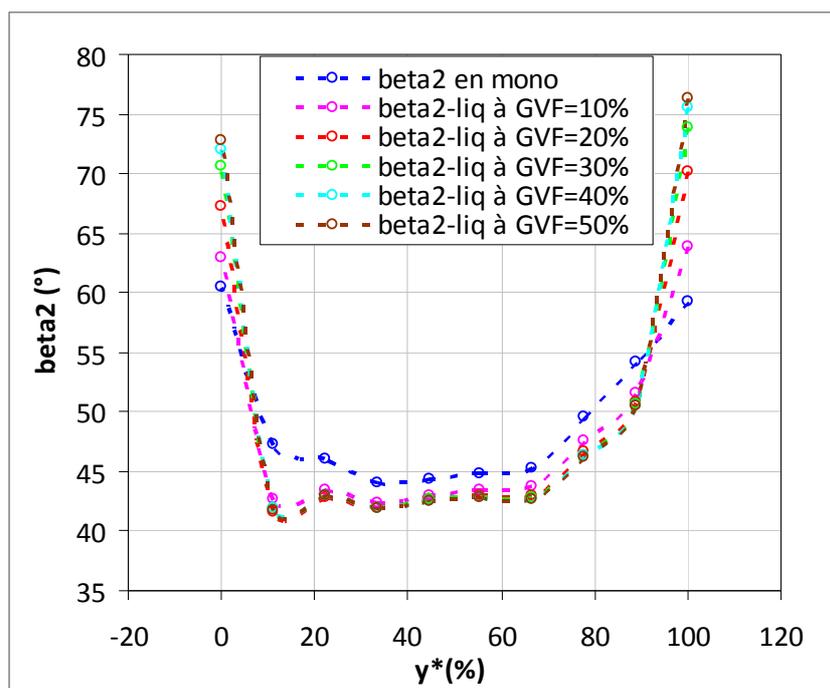


Figure 96: Angle β_{2liq} en fonction du GVF pour le débit Q3

Les figures 94, 95 et 96 ci-dessus présentent l'évolution de l'angle β_{2liq} en fonction du GVF, le diamètre des bulles étant fixé à $d_{bulle} = 200 \mu m$ pour les trois débits étudiés. Sur les figures on peut distinguer deux zones :

- Une première zone est constituée par le sillage des aubages (rappelons que les résultats présentés concernent une ligne d'exploration située à 3 mm en aval des aubages).

Dans cette zone, l'angle β_{2liq} augmente avec le GVF. Cela peut s'expliquer par l'accumulation des bulles en provenance du côté en dépression de l'aubage, couplée à une faible valeur du module de la vitesse.

- La seconde zone comprend l'écoulement principal non affecté par les sillages des aubages. Par abus de langage, nous dénommons cette zone : écoulement sain. On assiste à une légère diminution de l'angle de l'écoulement de la phase continue. L'angle diminue de 45° à $GVF = 0\%$ à des valeurs de l'ordre de 43° pour un GVF de 50 %. L'impact du GVF sur l'angle de l'écoulement de la phase continue semble être sensiblement dépendant du débit.

Ce constat est vérifié sur la figure 97, lorsque l'on représente l'évolution de l'angle moyen d'écoulement de sortie du liquide $\overline{\beta_{2liq}}$ en fonction du GVF pour chacun des débits étudiés. Rappelons que la moyenne utilisée ici est la moyenne arithmétique pondérée par la vitesse axiale en sortie pour les raisons que nous avons évoquées dans le chapitre 3 (présence du sillage).

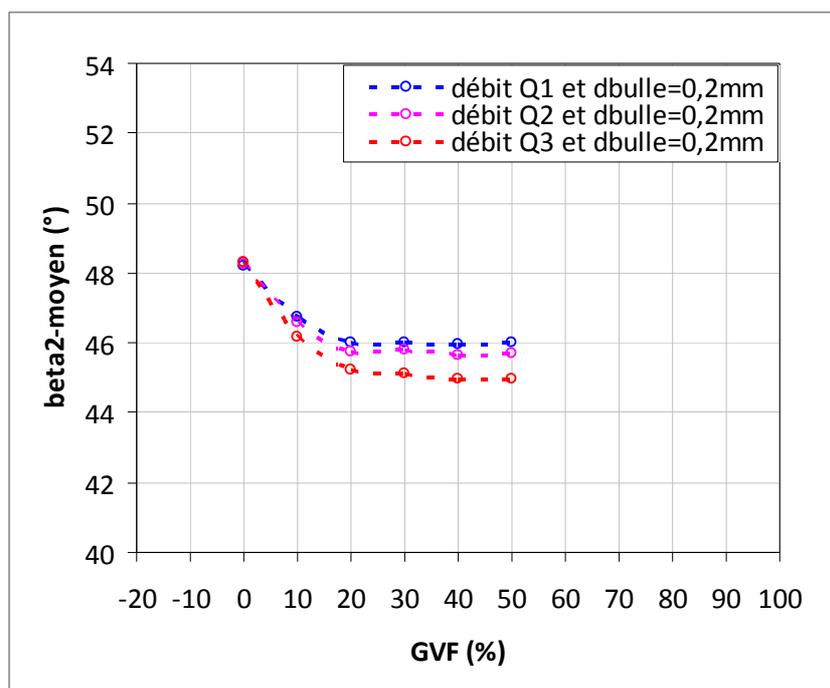


Figure 97: β_2 - moyen en fonction du GVF

On voit bien sur la figure 97 que l'angle β_2 -moyen décroît jusqu'à $GVF=20\%$. A partir de $GVF=20\%$, l'angle devient constant à une valeur qui dépend du débit. Ainsi donc pour le cas où le débit est Q3, l'angle β_{2liq} diminue de 48° à 45° lorsque le GVF varie de 0 à 20%. Puis l'angle ne varie presque plus au-delà du $GVF=20\%$.

On peut donc conclure que les performances de la grille d'aubes dépendent du GVF quand celui-ci varie de 0 à 20%. Au-delà de 20% l'influence du GVF est très faible. Nous ne savons pas à ce stade de notre étude, si l'asymptote en GVF est inhérente au modèle à deux fluides que nous avons choisi pour les simulations numériques. Remarquons aussi que dans la littérature, la plupart des études sur les écoulements polyphasiques dans des turbomachines se limitent à un GVF de 30%. Barrios et al (2009) ont démontré que pour une pompe centrifuge en écoulement diphasique liquide/gaz, le gain de pression pouvait devenir négatif à partir d'un $GVF=15\%$. En définitif, on peut dire que les performances de la grille d'aubes diminuent lorsque le GVF varie de 0% à 20%.

Effet de la granulométrie

Dans le but de quantifier l'effet du diamètre des bulles sur l'angle que l'écoulement de la phase liquide β_{2liq} , nous avons fixé le débit à Q1 et avons représenté l'évolution de cet angle en fonction du GVF pour trois diamètres de bulles différents à savoir $100\ \mu m$, $200\ \mu m$ et $500\ \mu m$ respectivement sur les figures 98, 99 et 100. On voit que l'écart entre l'angle β_2 relevé pour le cas monophasique liquide et l'angle β_{2liq} relevé pour les cas polyphasiques, est faible quand le diamètre des bulles est $100\ \mu m$ (figure 98). Cet écart augmente avec le diamètre des bulles ($200\ \mu m$ - figure 99) et ($500\ \mu m$ - figure 100).

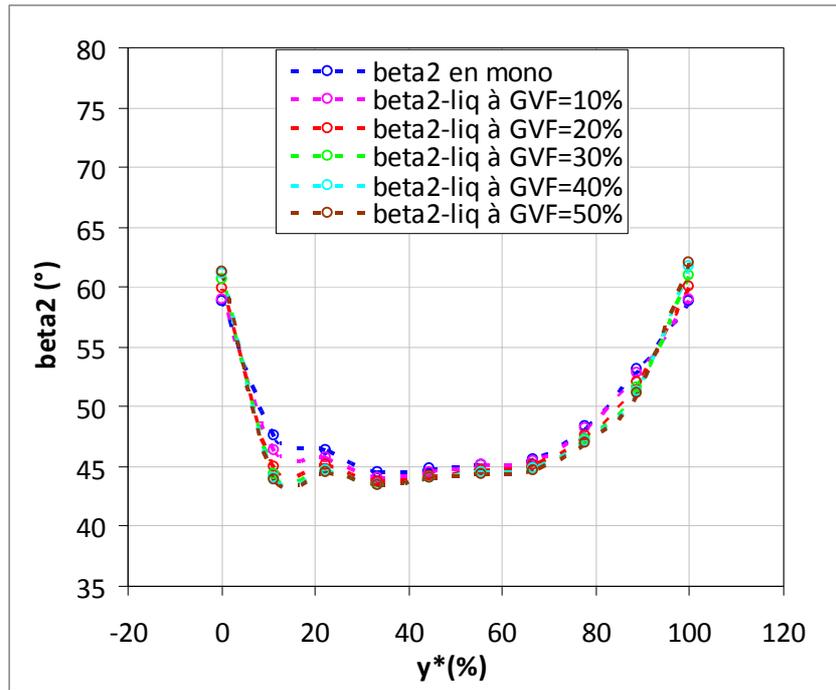


Figure 98: Angle β_{2liq} en fonction du GVF pour $d_{bulle} = 100 \mu m$

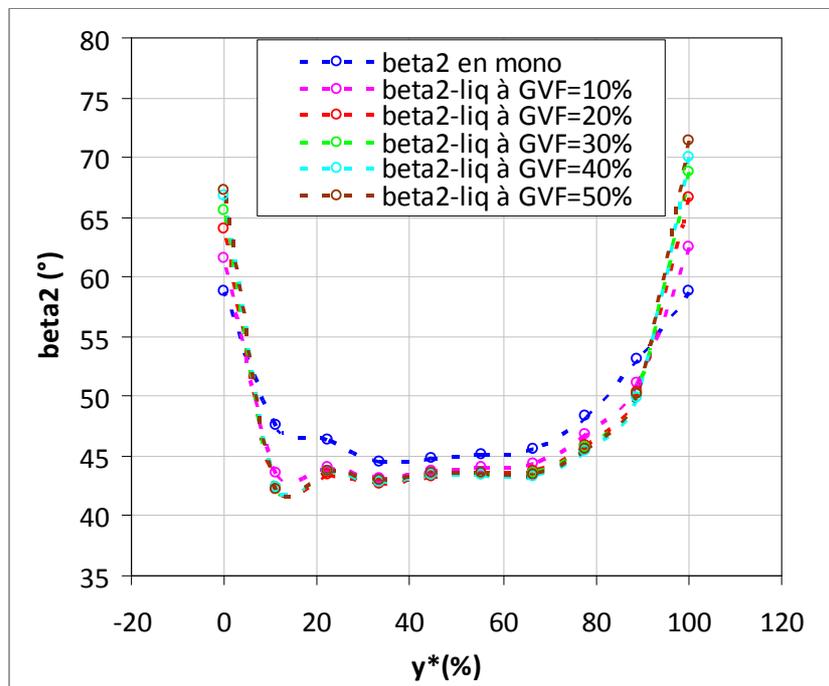


Figure 99: Angle β_{2liq} en fonction du GVF pour $d_{bulle} = 200 \mu m$

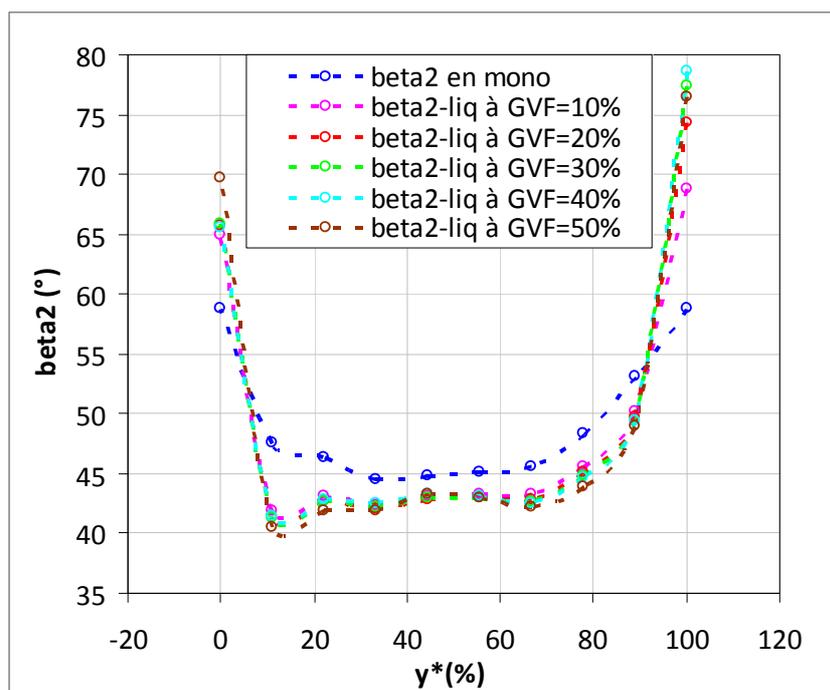


Figure 100: Angle β_{2liq} en fonction du GVF pour $d_{bulle} = 500 \mu m$

Sur les figures 98 à 100, nous notons encore l'impact du sillage sur l'effet de la granulométrie des bulles. Dans l'écoulement sain, une augmentation du diamètre des bulles génère une diminution de l'angle de l'écoulement de la phase continue, et inversement dans la zone des sillages.

Dans l'écoulement sain, la présence des bulles produit une diminution de la masse volumique du mélange générant une diminution du gradient de pression transversal.

On note aussi sur les figures ci-dessus que l'angle β_{2liq} varie avec le GVF quand celui-ci est compris entre 0 et 20%, mais en revanche cet angle est davantage sensible au diamètre des bulles. Pour bien s'en apercevoir, nous avons représenté figure 101, l'angle $\overline{\beta_{2liq}}$ en fonction du GVF pour chacun des diamètres de bulles étudiés au débit Q1.

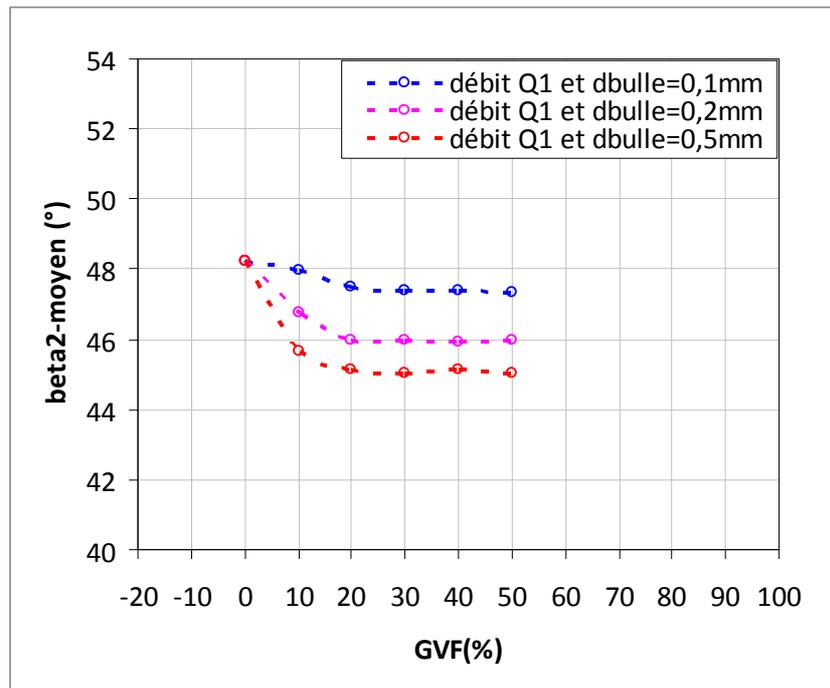


Figure 101: Angle $\overline{\beta_{2liq}}$ en fonction du diamètre

Sur la figure 101, l'angle $\overline{\beta_{2liq}}$ de $48,2^\circ$ associé au $GVF=0\%$ correspond à l'angle β_2 pour le cas monophasique au débit Q1. On voit sur cette figure que pour un GVF fixé, l'angle $\overline{\beta_{2liq}}$ décroît si le diamètre de la bulle augmente.

En définitive, cette étude paramétrique démontre que la chute de pression à la traversée de la grille d'aubes est fortement corrélée à la pression, via la granulométrie des bulles, au GVF, et dans une moindre mesure, au débit de la phase continue.

4.6.5 Écarts des angles entre phase

L'hétérogénéité de l'écoulement (ou écart des angles entre la phase liquide et la phase gazeuse) vient du fait qu'à la sortie de grille, nous relevons un angle β_{2liq} de la phase liquide différent de celui de la phase dispersée β_{2gaz} .

Pour mettre en évidence cette hétérogénéité qui selon la littérature est à l'origine des pertes hydrauliques de la grille d'aubes, nous avons représenté l'évolution de ces angles en fonction des paramètres que sont le diamètre des bulles et le GVF. L'objectif étant de voir comment évolue l'écart entre ces deux angles en fonction de ces deux paramètres, sur une ligne située légèrement en aval des bords de fuite.

Effet de la granulométrie

Pour voir l'effet du diamètre des bulles sur l'écart entre les angles β_{2gaz} et β_{2liq} , nous avons présenté sur les figures 102 à 103, l'évolution des deux angles pour le débit Q1 et pour un GVF=10% en fonction du diamètre. Sur la figure 102, on observe que pour $d_{bulle} = 100 \mu m$, l'écart entre β_{2gaz} et β_{2liq} est quasiment nul. Il n'existe pas de glissement entre phase sur les angles. Sur les figures 103 et 104, on note que quand le diamètre des bulles augmente, l'écart entre ces deux angles augmente également. Ce comportement est la conséquence de la déviation de la trajectoire des bulles de gaz par rapport aux lignes de courant de la phase liquide.

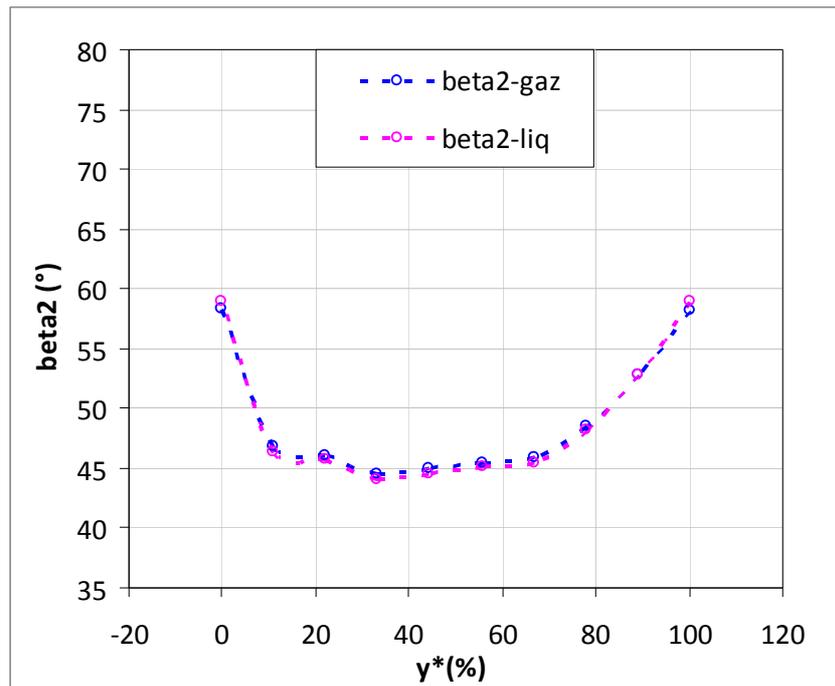


Figure 102: Angles β_{2gaz} et β_{2liq} pour $d_{bulle} = 100 \mu m$

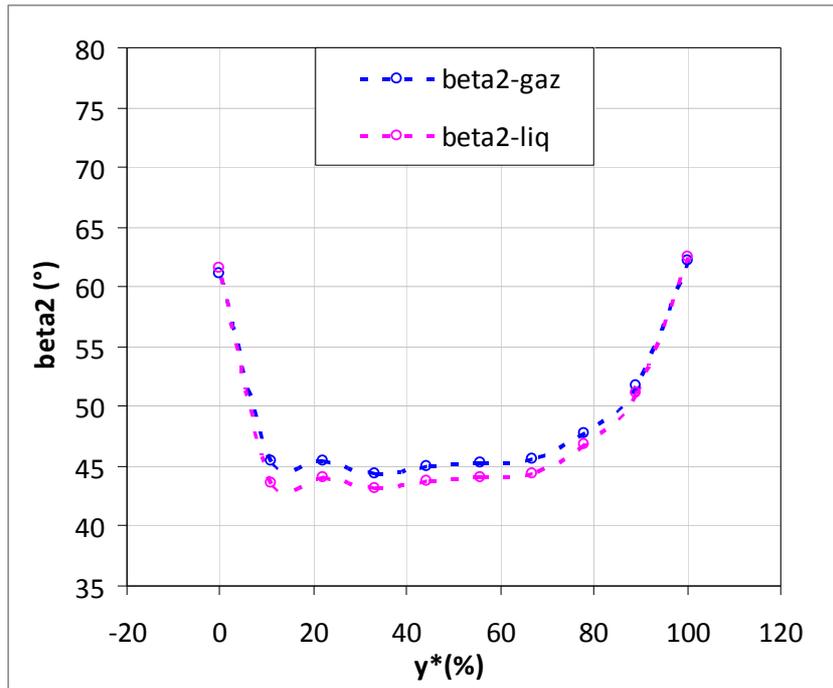


Figure 103: Angles $\beta_{2\text{gaz}}$ et $\beta_{2\text{liq}}$ pour $d_{\text{bulle}} = 200 \mu\text{m}$

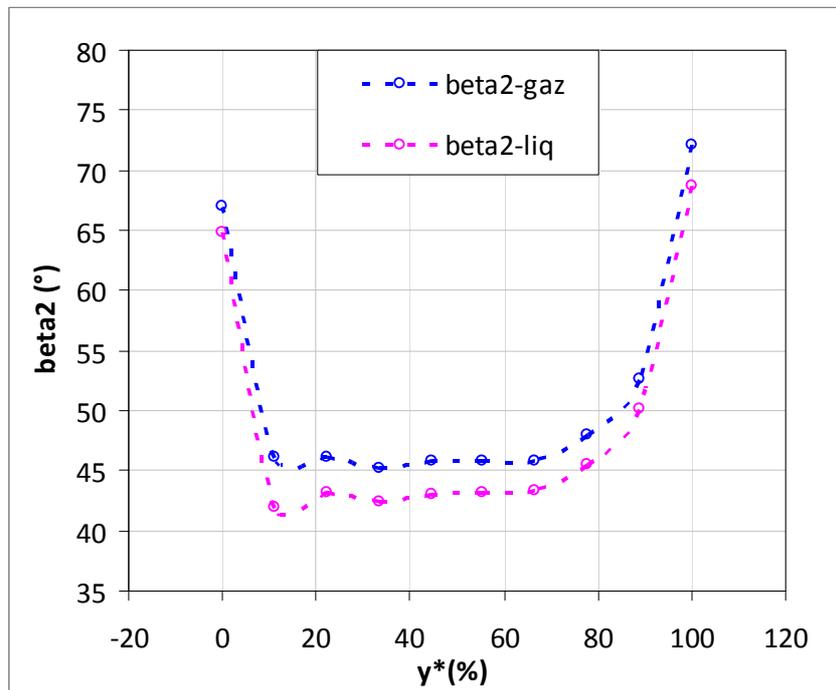


Figure 104: Angles $\beta_{2\text{gaz}}$ et $\beta_{2\text{liq}}$ pour $d_{\text{bulle}} = 500 \mu\text{m}$

D'un point de vue phénoménologique, ce comportement observé pour lequel pour un GVF donné, l'écart entre β_{2gaz} et β_{2liq} augmente avec le diamètre des bulles, est à relier à l'évolution de l'efficacité diphasique d'une pompe avec la pression d'aspiration. En effet, on a vu que l'efficacité diphasique pour un GLR donné diminue avec la pression. Or la pression d'aspiration joue sur la granulométrie des bulles de gaz dans un écoulement dispersé. En effet dans un écoulement diphasique à bulles dispersées, plus la pression d'aspiration est forte et plus les bulles auront de petits diamètres. Par conséquent meilleure sera l'efficacité diphasique. Ainsi donc un écart important entre β_{2gaz} et β_{2liq} du à un diamètre élevé des bulles de gaz se traduit par une dégradation des performances de la grille tout comme l'efficacité diphasique diminue quand la pression d'aspiration diminue.

Effet du GVF

Sachant que le débit est un paramètre de second ordre dans la modification de l'angle d'écoulement en sortie comme nous l'avons montré précédemment, nous avons fait le choix ici de fixer le débit à Q2 et le diamètre des bulles à $d_{bulle} = 200 \mu m$, puis avons représenté β_{2gaz} et β_{2liq} en fonction du GVF.

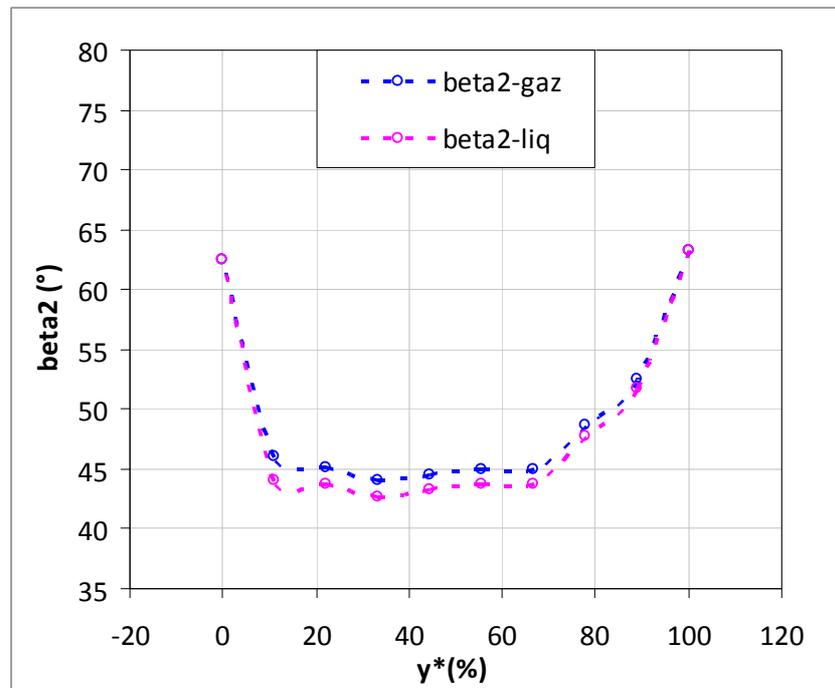


Figure 105: Angles β_{2gaz} et β_{2liq} à GVF=10%

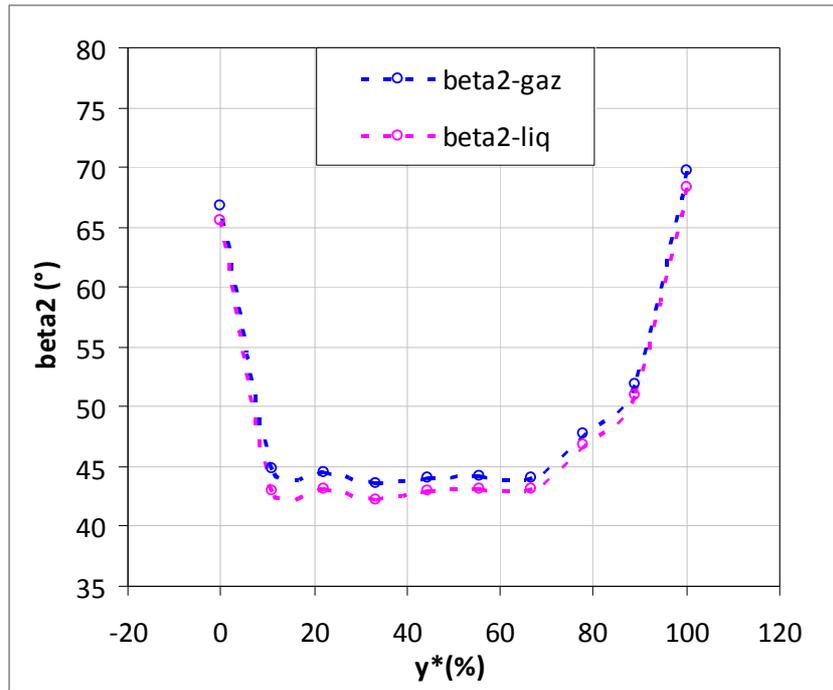


Figure 106: Angles $\beta_{2\text{gaz}}$ et $\beta_{2\text{liq}}$ à GVF=20%

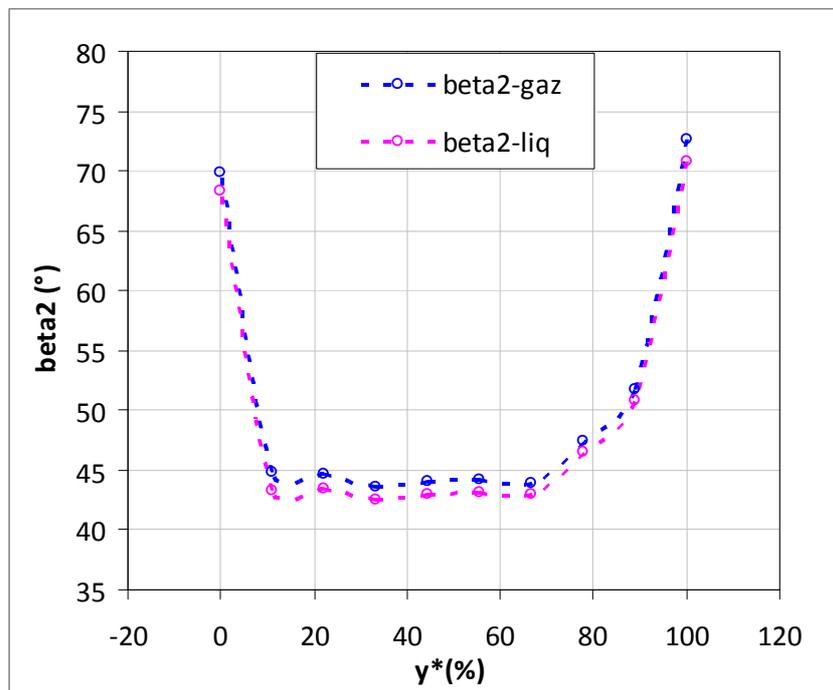


Figure 107: Angles $\beta_{2\text{gaz}}$ et $\beta_{2\text{liq}}$ à GVF=30%

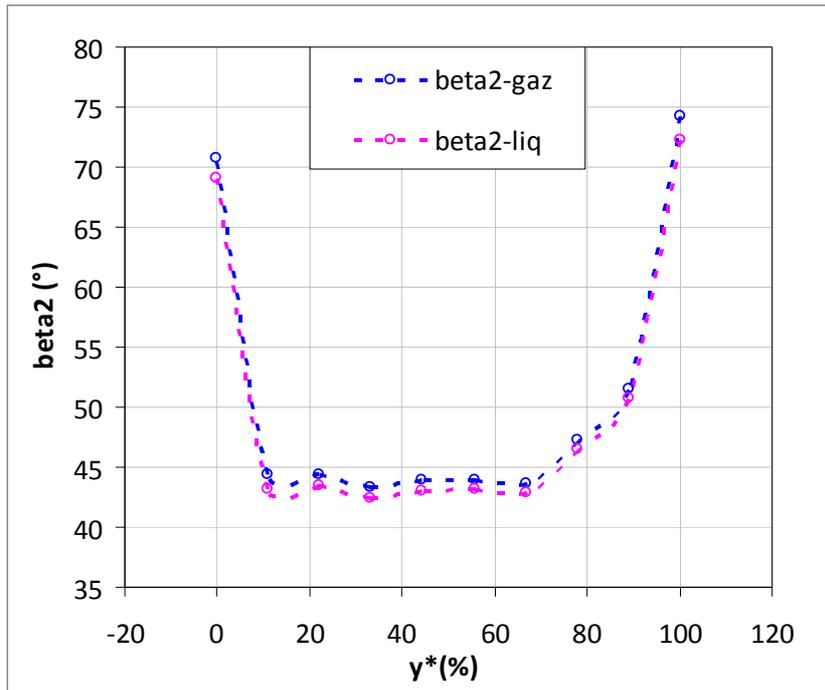


Figure 108: Angles $\beta_{2\text{gaz}}$ et $\beta_{2\text{liq}}$ à GVF=40%

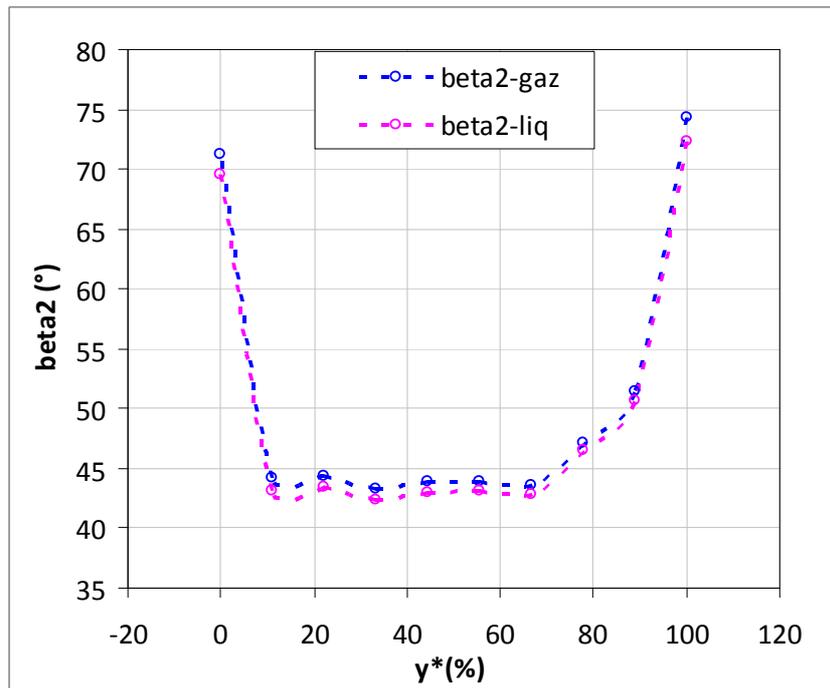


Figure 109: Angles $\beta_{2\text{gaz}}$ et $\beta_{2\text{liq}}$ à GVF=50%

On voit sur les figures ci-dessus que l'angle d'écoulement en sortie du gaz est toujours supérieur à celui du liquide. Cette différence provient de la déviation de la trajectoire des bulles de gaz par rapport aux lignes de courant de la phase liquide mise en évidence dans le paragraphe 3.3. Les bulles sont transportées vers le côté en dépression des aubages.

L'influence du GVF sur l'écart entre β_{2gaz} et β_{2liq} sur ces graphes n'est pas très nettement visible. Aussi, pour mettre très clairement en évidence l'effet du GVF sur cet écart, nous avons décidé de représenter la moyenne de ces angles et d'établir ainsi un lien entre β_{2gaz} et β_{2liq}

Conclusion intermédiaire

Nous venons de mettre en évidence que dans un écoulement diphasique gaz \ liquide dans la grille d'aubes, une accumulation de gaz s'opère sur le côté en dépression des aubages. Cette accumulation provient du fait qu'il y a une déviation de la trajectoire des bulles de gaz par rapport aux lignes de courant de la phase liquide. Il se produit donc un écart entre l'angle d'écoulement en sortie du gaz β_{2gaz} et l'angle d'écoulement en sortie du liquide β_{2liq} . Physiquement, cet écart entre β_{2gaz} et β_{2liq} engendre une séparation de phase qui produirait des pertes hydrauliques dont la dégradation de performance de la grille d'aubes serait la conséquence.

Par ailleurs cette analyse permet de montrer que la présence de gaz modifie également les lignes de courant de la phase continue.

En définitif, l'angle d'écoulement en sortie de grille (lequel permet la prédiction des performances de la grille) dépend fortement du GVF et du diamètre des bulles. Le débit quant à lui n'intervient qu'en deuxième niveau.

Dans le cas d'une pompe en écoulement diphasique, la dégradation de la pompe est donc liée à cette accumulation des bulles de gaz dans une région bien précise des canaux de la roue de la pompe. Comme il est annoncé dans la littérature, on a bien montré que le GVF et le diamètre des bulles de gaz influencent beaucoup les performances d'une turbomachine en écoulement diphasique.

5 Corrélations

A cette étape de l'étude, il est opportun de rappeler les objectifs de nos travaux :

La relation d'Euler permet d'exprimer le travail théorique récupéré par le fluide à la traversée de la roue mobile d'une pompe, en fonction des conditions d'écoulement monophasique à l'entrée et à la sortie. De nombreux auteurs ont fourni dans le cas d'un écoulement monophasique des lois empiriques permettant de déterminer l'angle que fait l'écoulement à la sortie de la roue, en fonction des paramètres géométriques.

Nous pouvons citer par exemple :

- Howell et Carter, Naca, ... pour les grilles compresseur (c'est-à-dire des grilles dont les canaux forment des divergents).
- Ainley-Mathieson, Graig-Cox, ... pour les grilles turbines (c'est-à-dire des grilles dont les canaux forment des convergents).

Pour le cas d'écoulement diphasique liquide / gaz, très peu d'auteurs proposent des corrélations ou des lois empiriques permettant d'exprimer l'angle de la phase dispersée en fonction de la phase continue, ou encore des corrélations qui permettent de prédire la modification de l'angle de l'écoulement de la phase continue en présence de gaz.

L'objectif des nos travaux est de définir l'impact des conditions d'entrée sur l'évolution de ces deux angles. Ainsi, une loi empirique pourrait être proposée, à partir des résultats de la simulation numérique. Finalement cette loi peut être injectée dans un facteur de correction définie par IFPEN pour le cas de ses pompes polyphasiques axiales, appelée Efficacité diphasique et noté E_c .

Afin d'établir un lien entre les angles β_{2gaz} et β_{2liq} à la sortie de la grille d'aubes, nous représentons sur les figures 110 et 111, $\overline{\beta_{2gaz}}$ et $\overline{\beta_{2liq}}$ en fonction du GVF pour les cas où le diamètre des bulles est fixé à $d_{bulle} = 200 \mu m$ et pour les débits Q1 et Q2 défini au paragraphe précédent. Les valeurs moyennes des angles beta ont été pondérées avec la vitesse débitante de l'écoulement.

Sur ces figures, on peut constater quel que soit le débit, que $\overline{\beta_{2gaz}}$ ne varie presque pas avec le GVF. On peut donc le considérer comme indépendant du GVF. Tandis que $\overline{\beta_{2liq}}$ diminue avec le GVF jusqu'à 20% et au delà, $\overline{\beta_{2liq}}$ devient indépendant du GVF comme nous l'avons déjà souligné plus haut.

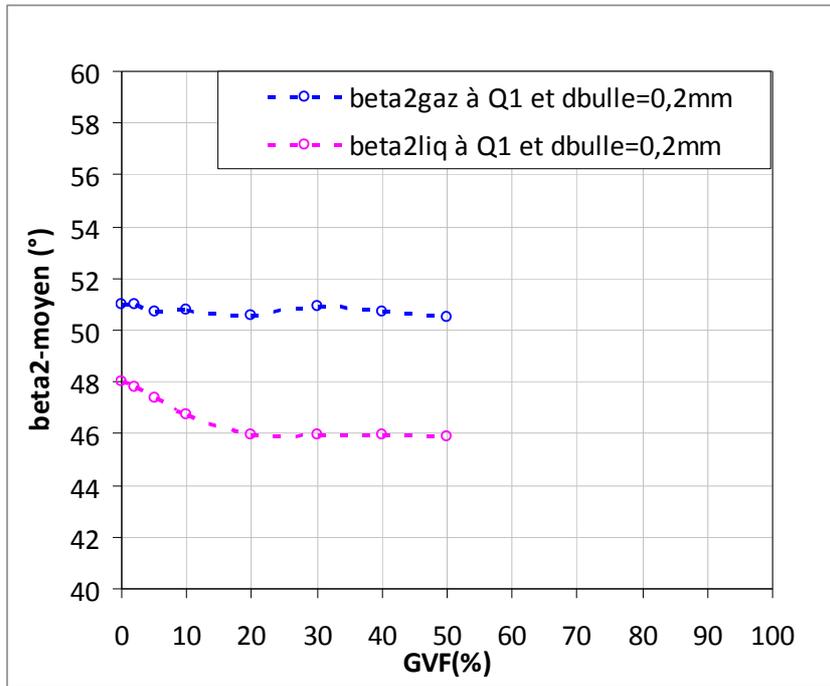


Figure 110: Angles $\overline{\beta}_{2\text{gaz}}$ et $\overline{\beta}_{2\text{liq}}$ en fonction du GVF au débit Q1

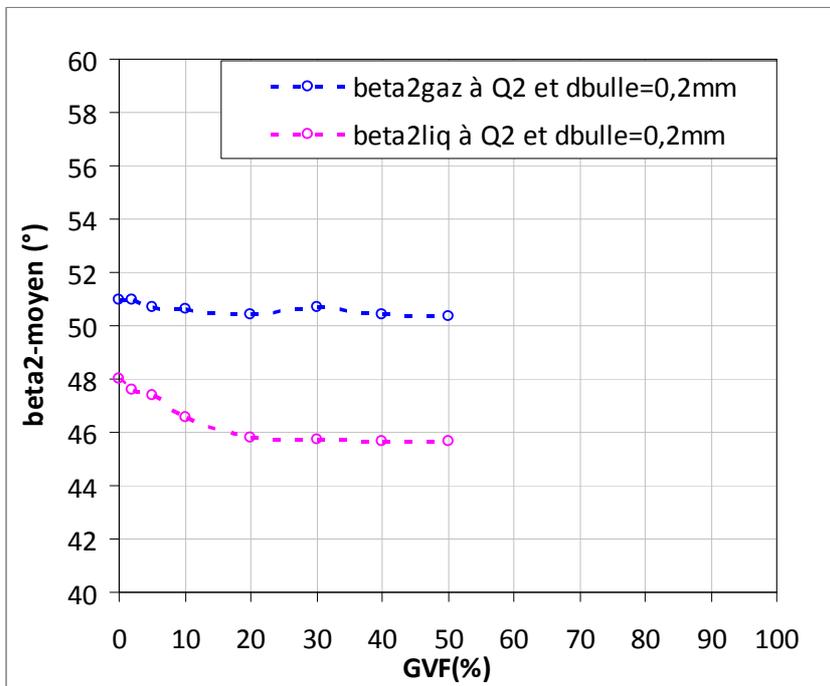


Figure 111: Angles $\overline{\beta}_{2\text{gaz}}$ et $\overline{\beta}_{2\text{liq}}$ en fonction du GVF au débit Q2

Ainsi la démarche que nous avons suivie pour relier β_{2gaz} et β_{2liq} est donc la suivante :

- nous avons considéré un angle β_{2gaz} de 51° qui est sa valeur en sortie de la grille d'aubes quel que soit le GVF.
- on définit alors un angle de déviation par $\delta = \overline{\beta_{2gaz}} - \overline{\beta_{2liq}}$ qui représente la déviation de la phase dispersée par rapport à la phase continue.

On obtient ainsi les courbes de la figure 112 ci-dessous.

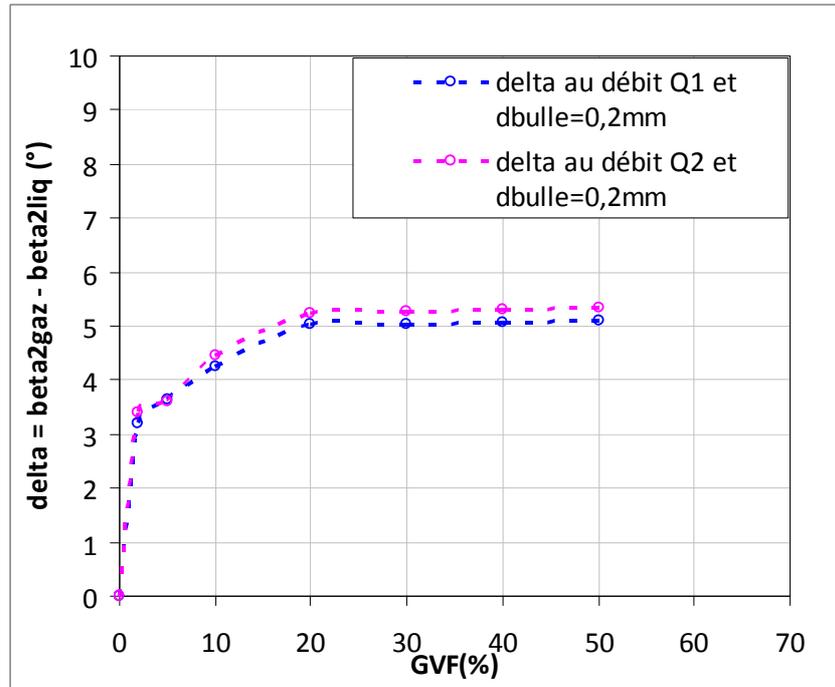


Figure 112: Évolution de delta en fonction du GVF

On voit bien sur la figure 112, l'effet du GVF sur l'angle de déviation δ . On observe dans un premier temps une évolution quasi linéaire de δ avec le GVF, puis à partir d'un GVF caractéristique (ici 20 %), l'angle de déviation δ atteint un palier et devient constant. De plus, on peut considérer en première approximation que δ est quasiment indépendant du débit. Nous avons démontré précédemment que l'influence du débit est du second ordre.

Ainsi, en considérant que l'angle de déviation δ ne dépend pas du débit, nous avons fixé le débit et avons représenté l'évolution de δ en fonction du GVF pour chacun des trois diamètres de bulles comme illustré sur la figure 113. On peut observer sur cette figure que le palier de l'angle δ est d'autant plus grand que le diamètre est élevé. Cela signifie que plus le diamètre de la bulle est important et plus l'écart entre β_{2gaz} et β_{2liq} l'est aussi comme nous l'avons déjà montré plus haut.

On peut ainsi déterminer un GVF caractéristique γ^* et une déviation maximale qui dépend du diamètre qui permet de rassembler ces courbes sous une courbe maîtresse comme sur la figure 114 dont l'équation est :

$$\frac{\delta}{\delta_{\max}} = \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\gamma^*}} \right) \quad (5.1)$$

Dans l'estimation de la loi (5.1), il est légitime de se poser la question de savoir sur quels arguments nous avons fait l'hypothèse $\lim_{\gamma \rightarrow 0} \delta = 0$ au vu des courbes 113 et 114. Il faut dire que $\gamma = 0$ signifie que nous sommes dans le cas d'un écoulement monophasique et dans ce cas l'angle de déviation δ est bien nul. Ainsi donc la fonction est bien définie en 0. En revanche au vu de la courbe 114, il semble en effet que la fonction ne soit pas continue dans l'intervalle]0,3[, c'est simplement que nous n'avons pas réalisé des calculs avec un γ compris dans cet intervalle. Mais il serait en effet intéressant de réaliser ces calculs et de vérifier ainsi l'existence et la continuité de δ dans cet intervalle. Cela peut constituer une perspective pour des travaux à venir.

Notons cependant que cette loi est valable pour des angles de sortie de l'ordre de 45° à 70°.

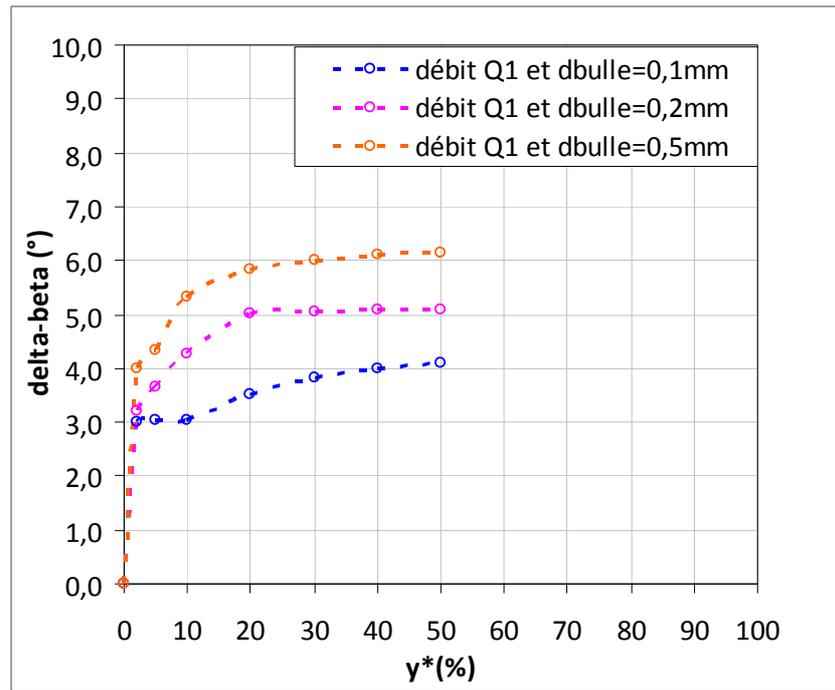


Figure 113: Évolution de l'angle δ en fonction du diamètre des bulles

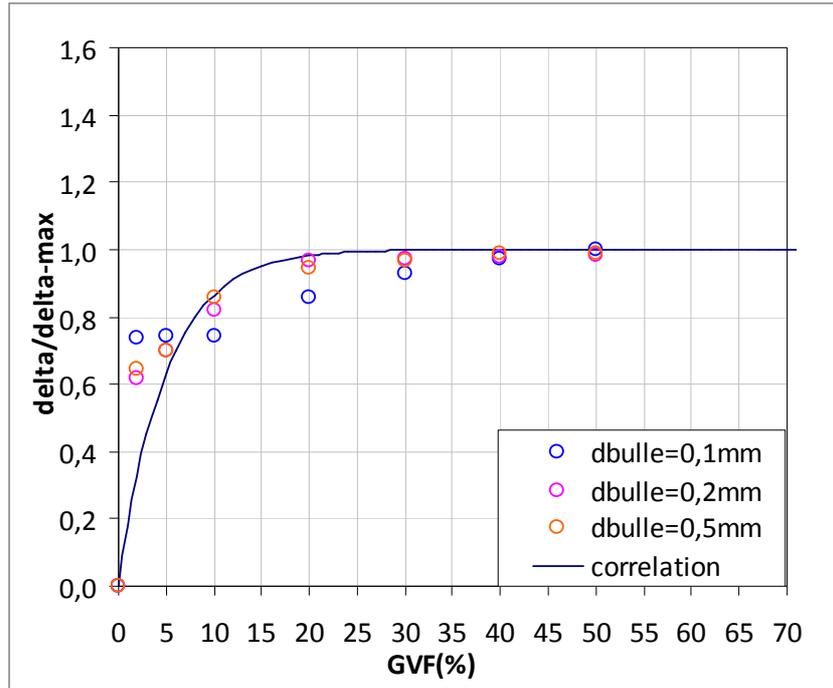


Figure 114: Courbe maîtresse de l'évolution de δ en fonction du GVF

5.1 Nouveau modèle

Les résultats des simulations diphasiques à la traversée de grille d'aubes, montrent que le glissement entre la phase dispersée et la phase continue est relativement faible et que son impact sur les performances est du second ordre. L'impact de l'homogénéité n'a pas été abordé dans un premier temps. On aborde donc ici principalement l'effet de la modification de l'angle de l'écoulement à la sortie de la grille d'aubes par la présence des bulles de gaz car nous avons en effet montré que la présence des bulles de gaz dans un écoulement modifiait l'angle d'écoulement de sortie de la phase liquide β_{2liq} .

Pour rappel, l'efficacité diphasique d'une pompe est le rapport entre le gain de pression réel de la machine et le gain de pression idéal.

$$E_c = \frac{\Delta P_{reel}}{\Delta P_{ideal}} \quad (5.2)$$

D'après l'équation d'Euler (voir annexe), nous pouvons réécrire l'expression (5.2) par :

$$E_c = \frac{\rho(U_2.V_{\theta 2} - U_1.V_{\theta 1})_{reel}}{\rho(U_2.V_{\theta 2} - U_1.V_{\theta 1})_{ideal}} = \frac{\Delta(UV_{\theta})_{reel}}{\Delta(UV_{\theta})_{ideal}} \quad (5.3)$$

En fait, le travail d'Euler permet de relier le travail théorique reçu par le fluide, à la composante, dans un repère absolu, de vitesse tangentielle V_{θ} . U est la vitesse d'entraînement de la roue. Ici $\Delta(UV_{\theta})_{reel}$ peut s'apparenter à avec la quantité d'énergie reçu par le fluide si l'on prend en compte un angle "apparent" du mélange diphasique. $\Delta(UV_{\theta})_{ideal}$ serait la quantité d'énergie par le fluide si celui était homogène, c'est à dire dans le cas idéal, où le gaz et le liquide possèdent la même vitesse et