

Etude d'une pompe airlift : Modélisation CFD et validation sur un banc d'essai sous conditions atmosphériques.

Ing. M. HENNICO
Ir V. KELNER
GRAMME – Liège

Dr G. CALLIAUW
DESMET BALLESTRA – Zaventem

Cette thèse a pour but de créer, en utilisant le logiciel de CFD Fluent, un modèle numérique qui pourra être utilisé afin de lancer une étude sur les pompes airlift impliquées dans le processus de désodorisation des huiles. Ce travail consiste en la réalisation du modèle numérique de l'extérieur de la pompe et sa validation via un pilote d'essais sous conditions atmosphériques.

Mots-clefs : CFD, airlift, pompe mammoth, Fluent, désodorisation, simulation numérique, huile, validation.

This thesis is aimed to create, using CFD software Fluent, a numerical model that could be used to start a study about the gas lift pump involved in the oil deodorizing process. This work consists in the creation of the CFD model for the outer-pump and the validation through a validation pilot under atmospheric pressure.

Keywords : CFD, airlift, gas lift pump, Fluent, deodorizing, numerical simulation, oil, validation.

1. Introduction

La désodorisation des huiles est une étape clé de l'exploitation des huiles à l'échelle industrielle. C'est durant cette étape à l'intérieur du désodoriseur que les concentrations en composants non désirés sont réduites, que ce soit pour satisfaire une norme, un critère de goût, etc.

Cette étape s'effectue sous vide et nécessite l'emploi de pompe dites airlift afin d'agiter l'huile à l'intérieur du désodoriseur. Bien que ce procédé soit exploité depuis des décennies, il n'est pas encore parfaitement optimisé. Une étude approfondie sur ces pompes peut améliorer les performances du désodoriseur et ainsi réduire ses coûts de fabrication et d'utilisation.

Pour réaliser cette étude, la mécanique des fluides numérique (ou CFD) représente un outil intéressant pour tester rapidement toute une gamme de nouveaux prototypes.

Réalisée sur base d'un partenariat entre la société Desmet Ballestra, l'Institut Gramme et avec l'aide du CRIG, cette étude a pour objectif de créer et de valider expérimentalement un modèle numérique fiable pouvant servir de base à l'étude de futurs nouveaux prototypes.

2. La pompe air-lift

2.1 La désodorisation

Comme cité précédemment, les pompes airlift dont il est question dans cette étude interviennent dans le processus de désodorisation des huiles industrielles.

En effet, après l'extraction des huiles, il faut réduire la concentration d'un certain nombre de composants nuisibles avant de pouvoir les utiliser. C'est le cas notamment des 3-MCPD¹ qui présenteraient des caractéristiques cancérigènes et dont la législation Européenne impose une concentration limite dans les huiles alimentaires [4].

L'extraction des composants nuisibles se fait principalement durant la désodorisation où l'huile est amenée sous vide à des températures élevées et mise en contact avec un agent extractif gazeux (en général de la vapeur d'eau). Le gaz est ensuite aspiré avec les composants qu'il contient.

Ce principe repose principalement sur une réaction physico-chimique, elle-même basée sur les lois de Raoult, d'Henry et de Dalton, dont l'expression est donnée par [3,6] :

$$S = \frac{\Delta N_{X,steam}}{N_{X,oil}} = \frac{P}{E P_{vapor X}} \ln \frac{N_{X,oil start}}{N_{X,oil end}} + \left(\frac{P}{E P_{vapor X}} - 1 \right) (-\Delta N_{X,oil})$$

Où S représente la quantité de vapeur nécessaire par mole d'huile pour retirer une certaine quantité d'un composant nuisible X, P étant la pression totale, $P_{vapor X}$ la pression de vapeur du composant X. E est le coefficient de vaporisation, il représente l'efficacité du désodoriseur (il dépend donc de son design). Enfin $N_{X,phase}$ représente le nombre de moles de X dans la phase.

Le plus important à retenir de cette formule est que d'une part, plus la pression est basse, moins il faut de vapeur pour retirer la même quantité de X, ce qui explique pourquoi cette réaction a lieu sous vide. D'autre part, le terme logarithmique implique que diviser la concentration par 2 consomme plus ou moins la même quantité de vapeur, quelle que soit la concentration

¹ 3-monochloropropane-1,2-diol

de X (le terme de droite étant généralement négligeable par rapport au terme logarithmique).

2.2 Le désodoriseur et la pompe

Le désodoriseur se présente comme une tour dont les étages de désodorisation sont constitués de bassins, transpercés par une colonne d'aspiration et contenant des pompes afin d'assurer le mélange du fluide.

Ces pompes utilisées dans le désodoriseur étudié sont des pompes airlift, aussi appelées « pompes mammoth ». Il s'agit tout simplement d'une pompe où le gaz est l'élément moteur (voir fig. 1)

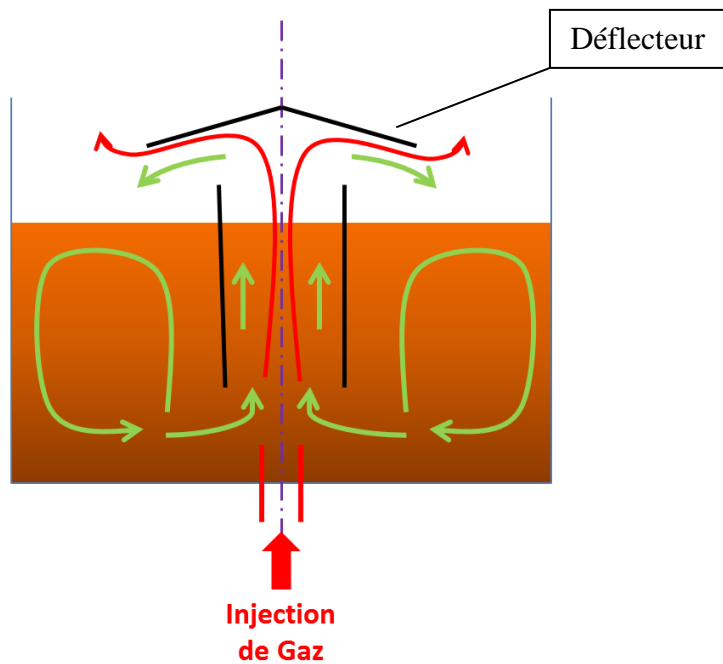


Figure 1 - Schéma de la pompe airlift

Le principe le suivant, un gaz est injecté au fond d'un bassin, l'ascension naturelle du gaz entraîne avec lui la phase liquide dans un tube, ensuite le gaz est évacué tandis que l'huile est redirigée vers le bassin à l'aide du déflecteur.

La désodorisation a lieu au contact avec le gaz, durant l'ascension et au niveau de la surface du bassin.

Dans les conditions de vide et de température du désodoriseur, il est difficile d'y insérer des pièces mécaniques, c'est pourquoi cette pompe possède un avantage majeur, de par son absence de composants mécaniques et par l'emploi de la vapeur d'eau comme gaz moteur, permettant ainsi d'amorcer la réaction physico-chimique dans la pompe elle-même par la même occasion.

En revanche, les conditions extrêmes rendent difficiles les mesures de données en cours de fonctionnement c'est pourquoi cette technologie n'est pas encore parfaitement optimisée et ce malgré le fait qu'elle est utilisée depuis presque un siècle [3].

On peut donc distinguer deux grands enjeux dans l'étude de ces pompes ; d'une part, l'interaction interne entre le gaz et le liquide au sein de la pompe et d'autre part, la répartition des écoulements dans le bassin autour de la pompe. En effet comme il a été vu précédemment, une même quantité de vapeur réduit la concentration en composants nuisible par un même facteur. Dès lors, la présence de « zones mortes » ou de zones à plus faible recirculation dans le bassin fait baisser l'efficacité du processus en réduisant continuellement la concentration dans les mêmes zones. On peut illustrer ce phénomène par l'exemple de la fig.2 où le cas A, dont l'écoulement est plus homogène, aura une meilleure efficacité que le cas B où l'huile stagne dans une partie du bassin (en foncé sur le dessin).

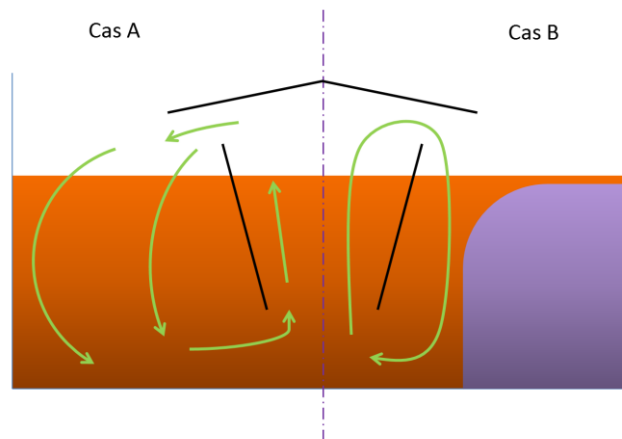


Figure 2 – Exemple d'écoulements extérieurs autour de la pompe

Il est donc important d'étudier de façon plus approfondie ce processus afin de permettre de réaliser des économies de production mais également des économies d'utilisation. En effet, bien que la vapeur d'eau soit assez peu coûteuse à produire dans le milieu industriel par rapport à d'autres composés, elle n'en reste pas moins un coût d'utilisation qui peut s'avérer lourd avec la durée de vie totale de l'installation.

Afin d'étudier ce phénomène, différents choix se présentent. Dans un premier temps, il a été décidé d'étudier les écoulements extérieurs. En effet, bien que les parties interne et externe soient toutes les deux des problèmes d'écoulement multi-phases, l'échange d'énergie à l'intérieur de la pompe fait intervenir de nombreux phénomènes physiques (force de Laplace, frottement entre particules fluide-gaz, grande dépression gazeuse etc.). Ces phénomènes présentent un certain challenge en termes d'approche théorique et de simulation numérique. D'un autre côté, l'étude d'écoulement autour de la pompe peut se réduire à un problème sous pression atmosphérique à débit fixé. De fait, la pression a une influence significative sur la détente du gaz dans la pompe et donc sur son débit ; cependant, une fois celui-ci déterminé, l'influence de la pression sur l'écoulement dans le bassin est tout à fait négligeable.

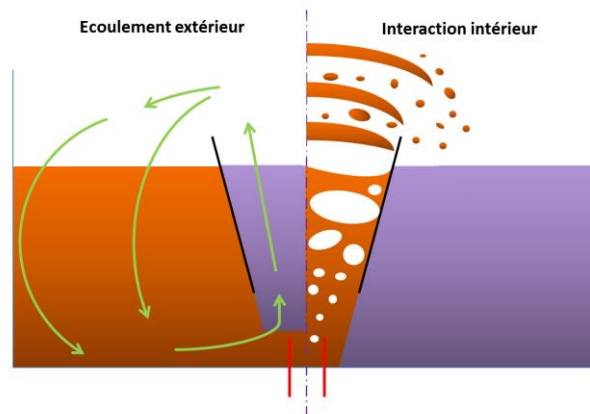


Figure 3 - Aspects intérieur et extérieur de la pompe

Dès lors, plusieurs alternatives sont envisageables. D'un côté, l'étude théorique offre un faible coût mais peu de modularité et de précision. De l'autre, l'étude empirique sur base de prototypes offre une très bonne fiabilité mais devient vite coûteuse. Enfin, la mécanique des fluides numérique (aussi appelée CFD) repose sur des bases théoriques assez fiables, avec une excellente modularité et un coût encore acceptable.

Il semble donc évident de s'orienter vers cette dernière, même si la CFD seule n'est pas parfaite. En effet, la modélisation numérique offre une grande variabilité tant dans ses géométries, maillages que dans ses hypothèses de départ (phénomènes pris en compte etc.). Bien que certains paramètres comme la tension superficielle, sont assez simples à anticiper, d'autres sont plus complexes à déterminer. C'est pourquoi, afin de fiabiliser cette étude, il est important de valider le modèle via un pilote expérimental. Ainsi, ce pilote permet en quelque sorte de « calibrer » et d'affiner le modèle numérique.

2.3 La CFD

« La mécanique des fluides numérique (MFN), plus souvent désignée par le terme anglais computational fluid dynamics (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes, etc. » [7]

Pour y parvenir, le logiciel² part d'une géométrie donnée pour ensuite la découper en un nombre fini d'éléments, également appelé maillage. Le maillage se présente donc comme l'ensemble des points de calcul ; plus il est dense, plus il offre des résultats précis au détriment d'un temps de calcul plus long.

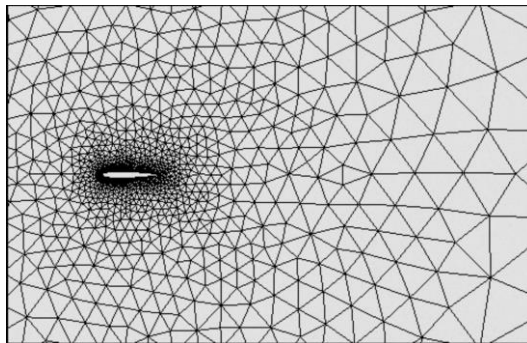


Figure 4 - Maillage de l'air autour d'un profil NACA

On a donc tout intérêt à optimiser le maillage en augmentant sa densité dans les zones d'intérêt ou à gradients élevés de façon à avoir une solution précise avec un nombre minimal de points de calcul (cf. fig. 4). [1,5]

² Cette étude utilise le logiciel ANSYS Fluent.

3. Pilote d'essai pour validation

3.1 Principe

Le principe de l'expérimentation (voir figures 5 et 6) est d'envoyer de l'eau maintenue à une température élevée et constante dans un réservoir vers le pilote d'essai à température ambiante. Ce pilote est en réalité un « secteur » de la pompe et de son environnement balayant un angle de 30 degrés³. Les entrées/sorties sont situées à l'intérieur de la portion de pompe airlift et sont agencées de façon à reproduire la circulation réelle du fluide. Le débit d'eau est assuré par une pompe avec variateur de fréquence tandis que l'accélération due à la détente du gaz (et la réduction de section d'écoulement qui en découle) est ici reproduite à l'aide d'une grille percée fixée au sommet du tube de la pompe airlift. Huit sondes de température placées le long d'une des parois latérales permettent alors de mesurer l'évolution des températures dans le bassin lorsque l'eau chaude est injectée. L'évolution des températures mesurées nous donne alors une indication quant à la répartition des flux autour de la pompe.

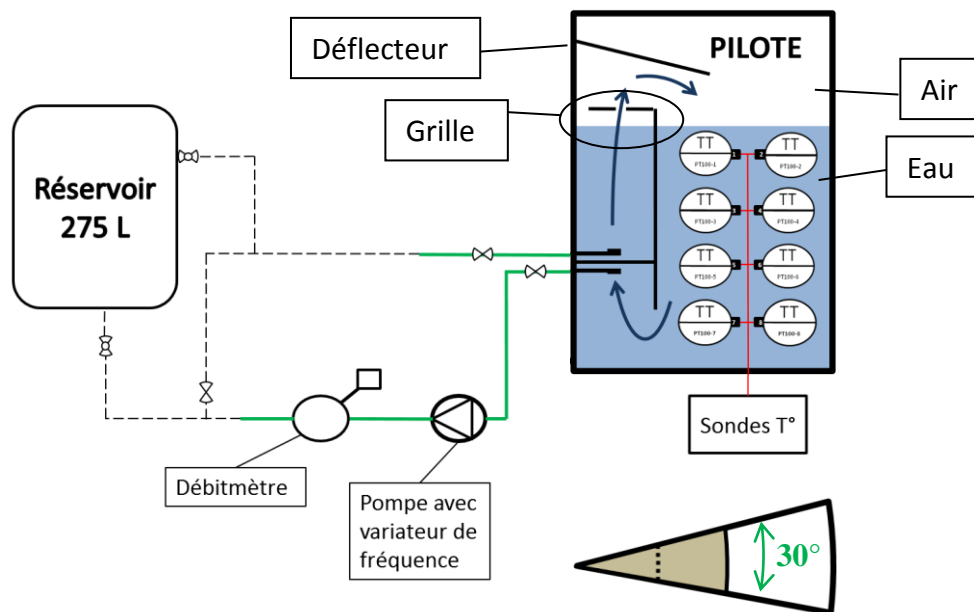


Figure 5 - Schéma de principe de l'essai expérimental

³ Ce choix de 30° est un compromis entre l'accessibilité du pilote et la capacité du réservoir pour permettre des essais d'une certaine durée.

Ce pilote fonctionne à l'eau et non à l'huile étant donné que l'eau est beaucoup plus pratique pour les tests (accès, nettoyage, etc.). A haute température, l'huile a un comportement dynamique proche de l'eau et ces pompes fonctionnent pour différentes gammes d'huiles. Dès lors, il aurait été superflu de la valider pour un type d'huile bien particulier. L'objectif principal étant d'établir une bonne correspondance entre la simulation numérique et les tests expérimentaux, l'eau fait parfaitement l'affaire pour servir à calibrer le modèle avec le pilote.

Dans l'optique de valider plusieurs géométries, ce pilote dispose d'une certaine modularité, notamment au niveau du déflecteur (qui peut être plat ou arrondi dans un premier temps). Ainsi, d'éventuels phénomènes de sensibilité du modèle en fonction de la géométrie peuvent être mis en évidence.

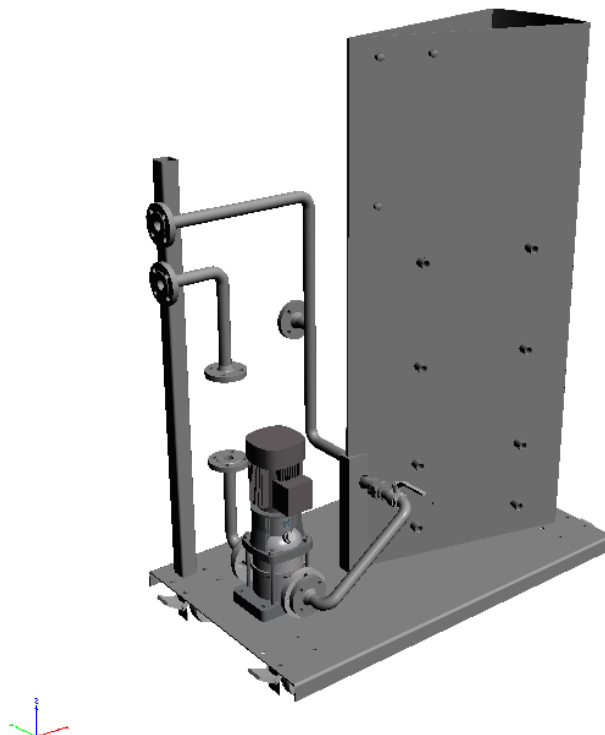


Figure 6 - Dessin 3D du pilote et de la pompe à débit

3.2 Résultats

Voici les résultats obtenus lors des tests pour la géométrie dont la coupe et l'agencement des sondes sont présentés ci-contre.

On a donc le déflecteur arrondi qui renvoie directement le débit éjecté par la pompe vers la sonde B1 du bassin.

Après une série de tests pour valider la répétabilité de l'expérience, les courbes sont lissées en prenant la moyenne de celles-ci. On obtient alors les résultats de la figure 6 pour une température ambiante de 297°K et une température de réservoir de 323°K. Le débit, quant à lui, est fixé à 3,2 m³/h.

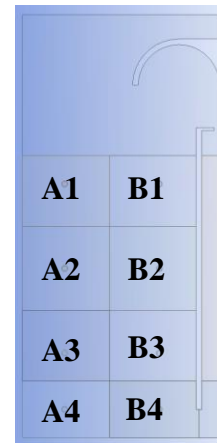


Figure 7 - Géométrie avec déflecteur courbé

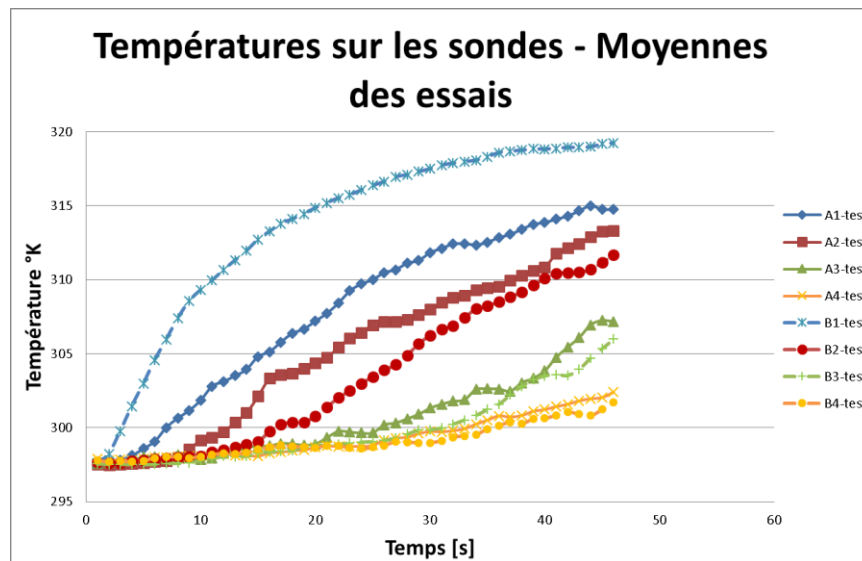


Figure 8 - Mesure des températures sur les sondes

On peut d'ores et déjà constater que la répartition des températures s'effectue bien de façon progressive suivant l'axe vertical avec en premier lieu, une augmentation de température dans la zone d'impacte du jet : B1.

4. Etude CFD

4.1 Modèle

Pour une première approche du modèle, le choix d'un modèle 2D-axisymétrique est très intéressant puisque la géométrie de la pompe le permet. En effet, ce modèle permet de définir les géométries circulaires par leur section et leur axe de révolution, le logiciel adapte ensuite les équations pour fournir des résultats en 3D sur base d'un maillage 2D. On a donc un maillage 2D beaucoup plus léger qu'un maillage 3D et donc moins de points de calculs permettant ainsi de réduire le temps de simulation pour un résultat équivalent.

De plus, en optimisant la densité de points de calcul dans les zones d'intérêt (couches limites, déflecteur, etc.) et en évitant le « sur-maillage », on limite également le nombre d'éléments à calculer par le programme pour converger vers la solution, ce qui permet de réduire le temps de calcul tout en gardant une bonne précision du résultat.

4.2 Résultats

Dans sa gestion des problèmes multi-phases, le modèle numérique définit une phase principale (dans notre cas l'eau) et une phase secondaire (l'air ici). L'un des paramètres clef de la résolution de tels systèmes est la taille moyenne des bulles de la seconde phase dans la première, qui, dans le cas considéré, détermine indirectement la taille des gouttes d'eau éjectées par le déflecteur de la pompe.

Bien entendu, la taille réelle des gouttes est loin d'être constante et suit une répartition assez complexe (voir ci-dessous) qui présente toujours un certain challenge à l'heure actuelle pour le représenter dans une simulation.

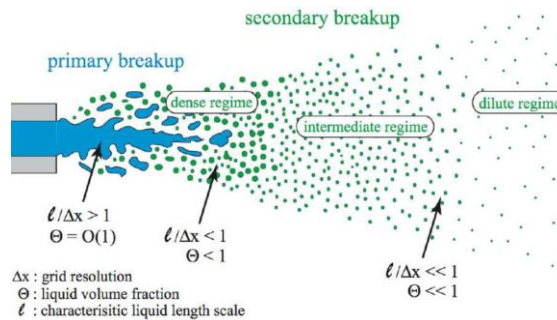


Figure 9 - Répartition de gouttes d'eau

La difficulté ici est de trouver une taille moyenne des bulles qui apportera les résultats les plus fidèles par rapport à la réalité. Dans un premier temps, ce paramètre est fixé de façon à reproduire plus ou moins l'aspect « rideau » du fluide en sortie de déflecteur.

Au niveau des autres hypothèses de départ, le modèle est relativement simple : fluides incompressibles, pression atmosphérique et sans tenir compte des effets de tension superficielle. Dès lors, les premiers résultats obtenus sur les « sondes virtuelles » nous donnent une allure comme celle-ci.

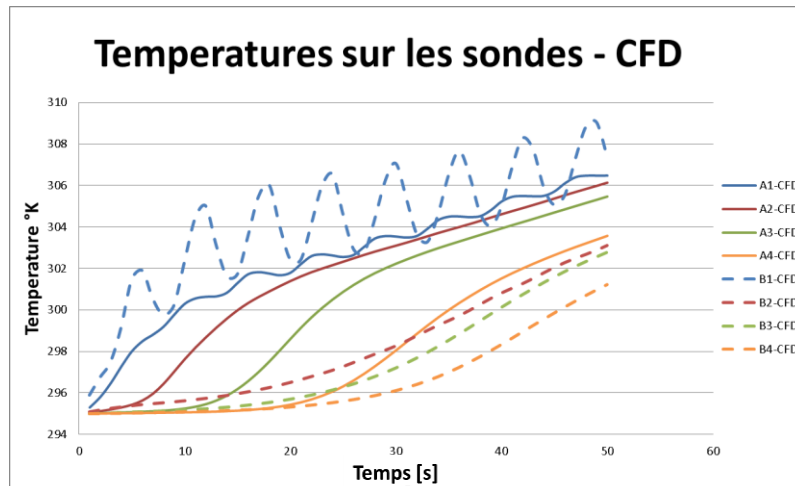


Figure 10 – Premiers résultats CFD : Températures sur les sondes

De là, au vu de la répartition des températures, on peut en conclure que le bassin est beaucoup plus mélangé dans la simulation pour un débit équivalent. En effet, les températures de la simulation convergent beaucoup plus vers une valeur commune que celle observées en réalité, ce qui traduit une agitation plus grande dans le bassin et donc un meilleur échange de chaleur au sein de la phase liquide.

Ceci peut s'expliquer, d'une part, par l'absence de prise en compte des phénomènes de convection naturelle. Ceux-ci tendent à séparer la répartition de température. D'autre part, la taille moyenne des gouttes est trop élevée et, bien que l'aspect visuel semble bon, l'absence de séparation des gouttes en gouttelettes leur donne une inertie trop élevée. Cela entraîne plus d'agitation dans le bassin ; or, le but final de cette étude est d'obtenir la répartition correcte des flux autour de la pompe.

La taille des gouttes est donc réduite pour correspondre au mieux à la répartition réelle des températures. Concernant la convection naturelle, elle est modélisée à l'aide de l'hypothèse de Boussinesq qui permet de garder un liquide à densité constante tout en lui ajoutant virtuellement l'accélération équivalente due à la poussée d'Archimède. Ce modèle est une simplification acceptable car la différence de masse volumique de l'eau entre 20°C et 50°C n'excède pas les 15 kg/m³. L'accélération qui en découle reste dans l'absolu plutôt faible, ce qui explique pourquoi l'influence de la convection naturelle n'est notable que pour les faibles débits de pompe.

Avec ce nouveau modèle corrigé, les résultats de la simulation numérique sont ceux de la figure 11.

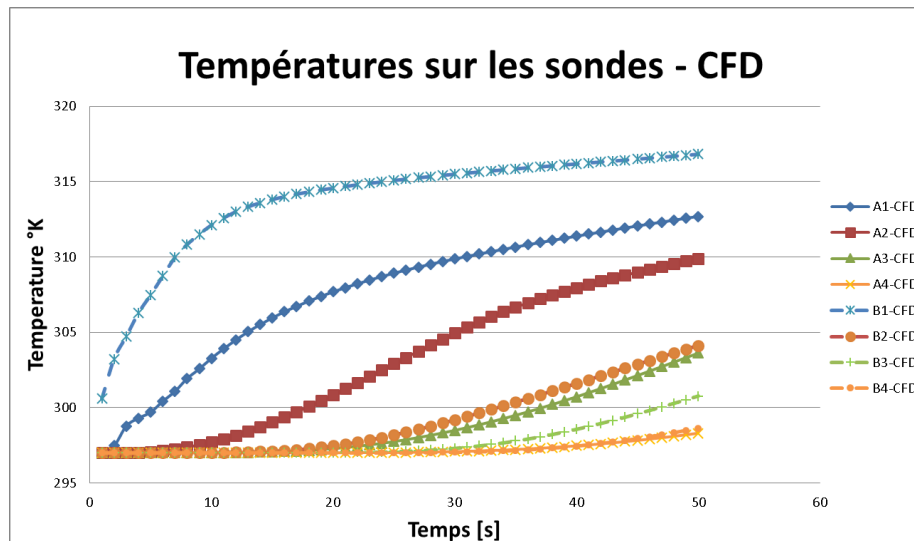


Figure 11 - Résultats CFD : Températures sur les sondes

5. Comparaison

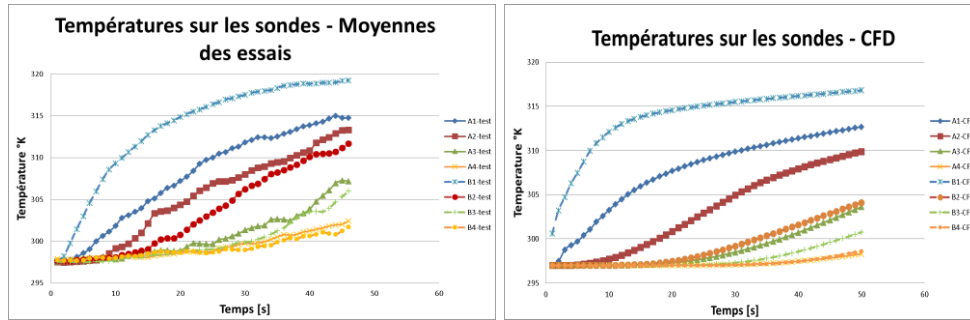


Figure 12 - Comparaison résultats CFD et expérimentaux

Mises côte à côte, on peut constater que les températures après 50 secondes sont assez proches des valeurs expérimentales. La sonde la plus éloignée (B2) étant située dans la zone d'écart-type maximal (voir fig. 12), on peut justifier une tolérance plus large pour celle-ci.

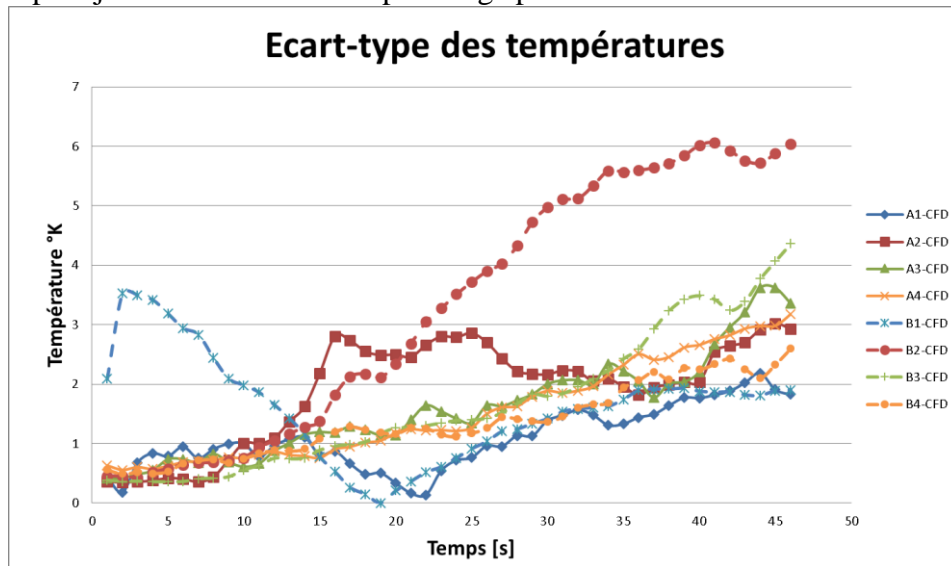


Figure 13 - Ecart-type des températures numériques

6. Conclusion

En conclusion, cette étude permet de modéliser la répartition de l'écoulement autour des pompes airlift donnant une bonne correspondance entre les résultats numériques et expérimentaux.

La suite de cette étude consiste donc en la conception de nouveaux designs suivie de la réalisation d'une étude comparative pour différents points de fonctionnement et ainsi partir vers un éventuel prototype plus performant. Bien qu'encore difficile à modéliser au niveau CFD à l'heure actuelle, l'étude de l'échange entre le gaz et le liquide dans la partie interne de la pompe reste un enjeu significatif pour l'étude globale de ces pompes.

7. Sources

[1] ANSYS, *Fluent User's Guide*, Release 14.0, November 2011.

[2] BARRUT, B., *Etude et optimisation du fonctionnement d'une colonne airlift à dépression - Application à l'aquaculture*, Master's Thesis, Université Montpellier 2, 2011.

[3] DE GREYT, W. in THE AOCS LIPID LIBRARY, *Edible Oil Processing Deodorization*, 2014.

Adresse URL :

<http://lipidlibrary.aocs.org/processing/deodorization/index.htm>

[4] EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY (EFSA), *Contaminants in food and feed*, 3-Monochloropropane-1,2-Diol Esters (3-MCPD).

Adresse URL :

<http://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/monochloropropane.htm>

[5] FLUENT, *The TGrid User's Guide*, 2006

[6] TIRTIAUX, A. & GIBON, V., *RAFFINAGE La désodorisation... à la carte*, 1997.

[7] WIKIPEDIA, *Mécanique des fluides numérique*, version du 26 septembre 2014. Numéro de version : 107751389.

Adresse URL :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Mécanique_des_fluides_numérique