Modélisation de jets diphasiques de gaz liquéfiés sous pression

Cédric Francis LEMOFACK GONANG– lemofacc@coria.fr

Directeur de thèse : François-Xavier DEMOULIN – Université de Rouen – CORIA – Rouen – demoulin@coria.fr

Thèse suivie à l'INERIS par Jean-Marc LACOME – DRA / PHDS / EDIS

Contexte

L'INERIS mène des études approfondies sur les conséquences importantes que peuvent avoir des ruptures de stockage ou des canalisations sur les sites industriels et leur environnement proche. Pour cela, l'INERIS s'est d'abord inscrit dans une démarche d'études expérimentales de ces risques. Il s'agit ici de mesurer les principales grandeurs physiques sur le jet diphasique qui surgit après une fuite de gaz liquéfié ; maintenu sous pression dans un réservoir. Il est désormais nécessaire, d'après les résultats fournis par des campagnes expérimentales, de développer des modèles numériques pour la prédiction des phénomènes physiques liés à ces risques et aussi pour dimensionner les dispositifs de prévention et de protection, tels les confinements, utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs. C'est dans cette optique de développement de modèles numériques que l'INERIS s'est associé avec le CORIA, un laboratoire de recherche dont l'un des objectifs est l'étude et la réalisation de modèles numériques pour la description des jets diphasiques. C'est ainsi que notre thèse intitulée "Modélisation des jets diphasiques de gaz liquéfiés sous pression" a été initiée entre les deux instituts pour coupler les compétences expérimentales d'une part et de modélisation numérique d'autre part.

L'objectif de cette thèse est donc de développer un modèle numérique afin de simuler le comportement de l'écoulement après la phase d'expansion du rejet diphasique. Pour cela, nous devons :

- Comprendre les phénomènes d'évaporation et d'ébullition qui se produisent lors de rejets diphasiques ;
- Recueillir et/ou adapter dans la bibliographie les différentes techniques de modélisation des rejets accidentels de gaz liquéfiés sous pression ;
- Analyser les résultats du modèle conçu pour une comparaison avec les données expérimentales et les données des cas tests de simulation dans la littérature.

Outils de travail

Afin de mener à bien notre travail, nous avons à notre disposition plusieurs outils numériques de modélisation, chacun étant spécifique à un type d'étude donné. Dans un premier temps, L'INERIS a procédé à quelques simulations avec le logiciel PHOENICS qui est un code de CFD. Le modèle d'écoulement diphasique Euler-Euler est celui qui est utilisé dans ce logiciel par son module IPSA (Inter-Phase Slip Algorithm). Un certain nombre de modifications ont été apportées pour adapter IPSA à cette étude. Ces Travaux ont constitué un certains acquis qui ont permis de démarrer notre thèse au CORIA avec un autre outil de modélisation CFD utilisé dans ce laboratoire : FIRE. Ce dernier est principalement un logiciel consacré au domaine de l'industrie automobile. Il possède un module implémenté pour traiter de l'injection du carburant dans un milieu. Comme dans les moteurs, le gaz liquéfié (carburant) est rejeté (injecté) sous forme de spray dans l'atmosphère (chambre de combustion du moteur). FIRE permet aussi l'emploi de modèles propres à l'utilisateur par l'intermédiaire de sous-routines écrites en langage Fortran. Contrairement au modèle diphasique IPSA de PHOENICS nous utilisons ici le modèle Euler-Lagrange. Ceci permettra d'estimer au final quel modèle est le mieux adapté pour cette étude.

Avancement des travaux

La première étape de notre thèse à été de comprendre tout ce qui a été fait jusque là pour étudier la physique du problème, notamment les travaux avec PHOENICS et avec FIRE. Nous avons approfondi l'étude en nous appuyant sur ce dernier logiciel, en simulant des cas de rejet diphasique de butane à la température d'ébullition dans une atmosphère de 1bar en pression et de 27°C en température. C'est le modèle HEM (Homogeneous Equilibrium Model) [1] qui nous permet de déterminer ces conditions de rejet.

Dans un premier temps, Ces simulations nous ont permis de relever l'inaptitude du modèle utilisé dans FIRE pour traiter l'évaporation d'un spray dont les particules sont proches des conditions extrêmes comme l'ébullition, et l'explosion de vapeur. En fait, deux phénomènes sont ici en compétition : le transfert de chaleur qui se traduit par l'échauffement des particules liquides et le transfert de masse par évaporation qui est une transformation endothermique. Dans les modèles les plus utilisés [2], comme pour les chambre de combustion des moteurs, le milieu porteur (atmosphère dans notre cas) est très chaud comparé au milieu dispersé (jet) qui lui est bien en dessous de la température d'ébullition du liquide le constituant. Ainsi, le milieu porteur est moins sujet à l'effet de la diminution de température due à l'évaporation. En plus, le milieu porteur possède une certaine quantité de vapeur du corps constituant le liquide, contrairement au cas de notre étude où l'atmosphère est exempte de cette vapeur. Il est donc nécessaire de prendre en compte le phénomène de flash boiling ou explosion de vapeur.

Nous avons entrepris de développer un nouveau modèle (TEM : Thermodynamic Equilibrium Model) pour essayer de prendre en compte tous ces nouveaux phénomènes. Pour cela, nous avons utilisé les équations de la thermodynamique pour implémenter un modèle de recherche de l'état d'équilibre thermodynamique d'un système constitué d'une masse donnée de liquide en présence de sa propre vapeur et d'autres gaz (air). Le modèle à d'abord été testé avec l'eau et ensuite avec le butane. Les résultats satisfaisants donnés les tests ont permis de faire une implémentation du TEM dans FIRE. En remplacement du modèle classique d'évaporation de FIRE, le TEM est appliqué dans un film de liquide et de gaz autour de chaque goutte dans une cellule de calcul. L'épaisseur du film est déterminé par deux paramètres Bêta_l et Bêta_g désignant respectivement le ratio de la masse de liquide dans le film sur celle de la goutte ; et le ratio de la masse de gaz dans le film sur celle du gaz dans la cellule de calcul. Les résultats du TEM sont assez encourageant car ceux-ci présentent les évolutions en température sont assez proches des mesures de température faites dans les campagnes expérimentales. Toutefois, un problème se pose à ce niveau, puisqu'il n'y a pas la notion de temps d'évaporation/condensation dans le TEM. Pour cela, la taille de l'épaisseur devra être déterminée par un modèle physique qui sera fonction du pas de temps de calcul et de la turbulence dans l'écoulement.

Conclusion

Cette première partie de notre travail nous a permis dans un premier temps de comprendre le problème physique posé par le sujet et de nous familiariser avec la modélisation et la simulation des jets diphasiques. Dans un deuxième temps, nous avons pu déceler les limites des modèles actuels destinés à simuler les jets diphasiques. Les jets diphasiques flashant comportent un certain nombre de phénomènes non pris en compte dans ces modèles. Nous avons donc élaboré des outils qui nous permettent d'être proche des résultats de tests expérimentaux menés à l'INERIS. Comme perspectives à notre travail il faudra améliorer la détermination de Bêta_l et Bêta_g. Il faudrait aussi faire la modélisation CFD du jet de la zone interne du réservoir vers l'extérieur. Ce qui nous permettra de nous dispenser des modèles sur les conditions de fin de zone d'expansion et dont les hypothèses ne respectent pas toujours la physique de notre étude.

Références

[1] J. M. Lacome. Modélisations de type CFD de rejets diphasiques libres et impactants à grande échelle. Rapport d'Etudes INERIS, 2006

[2] W. A. Abramzon, B. & Sirignano. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. Int. J. Heat Mass Transfer, 1989