Modélisation d'écoulements d'hydrogène liquide en condition cryogénique pour l'aviation décarbonée

Contexte:
Cette étude s'insère dans le contexte de la décarbonation de l'aviation notamment avec le déploiement de l'hydrogène comme carburant. On peut citer par exemple le projet Airbus ZEROe avec des aéronefs pouvant entrer en service d'ici 2035 [1].
Cependant, l'hydrogène présente un certain nombre d'inconvénients, dont sa très faible densité énergétique volumique, qui implique une utilisation sous forme liquide en conditions cryogéniques (LH_2 autour de 20 K). Cela nécessite de revoir et adapter les systèmes de stockage et d'alimentation dont le circuit carburant qui amène l'hydrogène des réservoirs jusqu'au moteur.
L'alimentation en carburant des turboréacteurs s'effectue grâce à l'utilisation d'une pompe compacte fonctionnant à haute vitesse (voir Figure 1.).

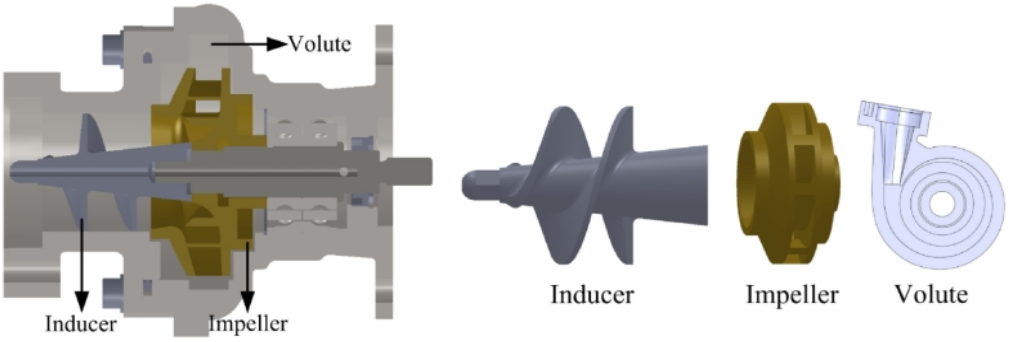

Figure 1: Schéma de principe d'une pompe à carburant composée d'un inducteur, d'un rouet centrifuge et d'une volute.

Dans certains cas, un phénomène de vaporisation peut se développer au sein de la pompe axiale (inducteur), c'est-à-dire que le liquide se vaporise sous l'effet d'une diminution locale de la pression formant des poches de gaz attachées aux aubages de la machine (voir Figure 2), ce qui conduit à une dégradation des performances de pompage et de fortes vibrations parasites. La conception de ces systèmes doit donc être capable de contrôler les instabilités diphasiques pouvant se développer (générant des fluctuations de pression de fortes amplitudes, des vibrations et des charges radiales sur les paliers de la pompe).

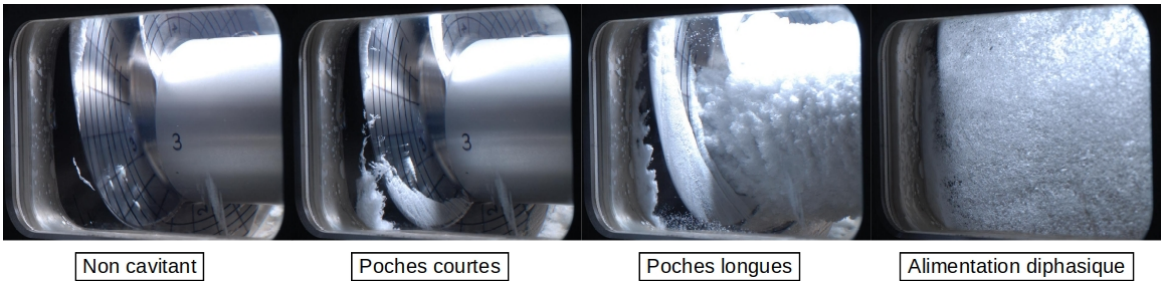

Figure 2: Visualisation expérimentale de poches de vapeur se développant dans une pompe de moteur de fusée pour différents points de fonctionnement.

Le phénomène de cavitation, bien connu dans l'eau, est un changement d'état liquide-vapeur se produisant à température quasi-constante. La transformation du liquide en vapeur consomme de l'énergie qui est prélevée principalement au liquide, créant un refroidissement local. Dans le cas de l'eau à 20°, ce refroidissement est très faible (0.1 K) et influence peu les grandeurs thermodynamiques du fluide. Par

contre, pour un fluide cryogénique, et en particulier pour l'hydrogène liquide, l'amplitude de ce refroidissement est beaucoup plus important (plusieurs Kelvin) et les propriétés thermodynamiques du fluide varient alors de manière significative suite aux variations locales de la température. Par exemple, la pression de vapeur du LH_2 varie d'un facteur trois entre 19 et 23 K. Les caractéristiques (fraction volumique de vapeur maximale, distribution en taille et forme des bulles) et globalement la topologie des poches de gaz sont modifiées par rapport à de l'eau.

Malgré les efforts réalisés dans ce domaine, la simulation numérique des écoulements turbulents diphasiques d'hydrogène en cryogénie présente encore des challenges scientifiques importants : modélisation du changement de phase couplé avec les transferts thermiques, représentation du comportement thermodynamique (loi d'état) et modélisation de la turbulence.

Objectifs

L'étude proposée est centrée sur le code de simulation numérique compressible diphasique SCB développé en interne [2,3]. Dans un premier temps, on s'intéressera à la comparaison de modèles diphasiques avec changement de phase non-isotherme pour le LH_2 en condition cryogénique. Le travail consistera à tester différentes fermetures (modèle à relaxation, modélisation des transferts thermiques, modèle empirique) ainsi que des tables thermodynamiques (librairie CoolProp [4]).
En raison des nombres de Reynolds élevés observés dans les applications, l'approche commune pour la modélisation de ces écoulements turbulents basée sur un opérateur de moyenne (RANS) ne parviennent pas à prédire correctement la dynamique de l'écoulement, en particulier en régime diphasique. Nous souhaitons développer un formalisme aux grandes échelles en utilisant une approche sous-maille implicite (ILES). Cette approche exploite l'erreur de troncature des schémas de discrétisation pour modéliser l'effet des échelles sous-maille sur les échelles résolues. Nous étendrons cette approche actuellement développée en monophasique [5] aux écoulements compressibles et diphasiques.
La validation sera effectuée dans un premier temps sur des cas académiques simples (cylindre cavitant) puis sur un hydrofoil 2D de la NASA pour lequel des données expérimentales sont disponibles [6].

Références

[1] https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe
[2] E. Goncalves, "Modeling for non isothermal cavitation using 4-equation models", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 76, 247-262, 2014.
[3] Goncalves & Parnaudeau, "Comparison of multiphase models for computing shock-induced bubble collapse", Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow, Vol.22, 2020.
[4] https://github.com/CoolProp/CoolProp
[5] Vincente Cruz & Lamballais, "Physical/numerical duality of explicit/implicit subgrid-scale modelling", Journal of Turbulence, Vol.24(9), 2023.
[6] J. Hord, "Cavitation in liquid cryogens," NASA report CR-2156, 1973.

Compétences: Mécanique des Fluides, Thermodynamique, Méthodes Numériques

Information pour la candidature :

Stage de 5 à 6 mois. Gratification 600 euros/mois. Lieu du stage: ISAE-ENSMA.
Il est nécessaire d'effectuer une demande sécurité-défense au préalable.

Contacts: Eric GONCALVES, Philippe PARNAUDEAU
Email : Eric.Goncalves@ensma.fr, Philippe.Parnaudeau@univ-poitiers.fr