

Simulation des grandes échelles d'écoulements compressibles multiphasiques : application à l'aviation décarbonée

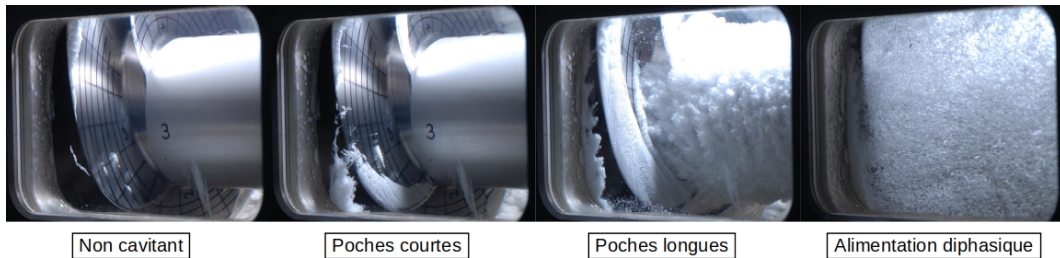
E. Goncalves Da Silva et P. Parnaudeau

1 Contexte et objectifs de l'étude

Avec une réduction de 75 à 90% des émissions des gaz à effets de serre par rapport à un carburant conventionnel, l'hydrogène, dont sa combustion ne génère que de l'eau, se présente comme le carburant de l'avenir pour l'aviation. Dans ce contexte, de nombreux projets émergent, émanant de différents consortiums et avionneurs, basés sur des architectures moteurs fonctionnant à l'hydrogène. On peut citer par exemple les projets AWATAR, CICA V de l'Onera, X-66 de la Nasa, ZEROe d'Airbus, etc [1,2].

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. Dans certains cas, un phénomène de vaporisation peut se développer au sein de la pompe, 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 1), 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 de cavitation pouvant se développer (générant des fluctuations de pression de fortes amplitudes, des vibrations et des charges radiales sur les paliers de la pompe).



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 cavitants en LH_2 présente encore des challenges scientifiques importants :

- En terme de modélisation du changement de phase couplé avec le transfert thermique. A ce jour, il existe de nombreux modèles développés pour prendre en compte la cavitation avec effets thermiques (la référence [4] recense les principales formulations). La grande majorité des modèles repose sur une équation de transport de la fraction volumique de vapeur incluant un terme source de production et de destruction de vapeur (piloté par des paramètres empiriques et ajustables) permettant de reproduire les phénomènes de vaporisation et de condensation. Hélas, la dépendance à ces deux paramètres empiriques est énorme et leurs valeurs sont a priori inconnues pour une application donnée. D'autres approches plus rigoureuses sont ainsi à développer.
- En terme de complexité des écoulements turbulents à grands nombres de Reynolds (10^5 et plus) avec la présence de décollements et de recirculations tridimensionnels, des effets de compressibilité avec présence d'ondes de pression de forte amplitude, des effets visqueux générant des échauffements pariétaux, des instabilités hydrodynamiques tels que des couplages inter-canaux, etc..

Dans ce contexte, la thèse vise à contribuer à la modélisation de problèmes multiphasiques compressibles liés au développement de technologies fonctionnant à l'hydrogène pour l'aviation décarbonée. On cherchera en particulier à développer une approche numérique capable de prendre en compte les effets des petites échelles en interaction avec les structures multiphasiques pour investiguer numériquement des configurations réalistes. Nous proposons de relever conjointement les défis suivants :

- Construire une approche numérique aux grandes échelles afin d'étudier l'interaction complexe entre la turbulence et les structures multiphasiques;
- Développer des modèles multiphasiques bien posés pour l'hydrogène liquide au regard des lois thermodynamiques et des échanges interfaciaux complexes;
- Effectuer des simulations de haute fidélité de configurations d'intérêt pour l'analyse et la meilleure compréhension des phénomènes physiques et des mécanismes d'instabilité, permettant d'améliorer la conception des pompes cryogéniques.

2 Programme

La thèse est centrée sur le code compressible aux interfaces diffuses SCB, qui contient une hiérarchie de modèles multiphasiques : modèles à 4-équations, à 5-équations et multicomposants, intégrés dans un environnement entièrement parallèle capable d’exploiter efficacement diverses architectures (CPU et GPU) [5,6].

En raison des nombres de Reynolds élevés observés dans les applications industrielles, l’approche commune pour la modélisation de ces écoulements est basée sur un opérateur de moyenne (RANS). Cependant, les modèles de turbulence standard ne parviennent pas à prédire correctement la dynamique de l’écoulement, en particulier en régime diphasique. Pour résoudre ce problème, nous prévoyons de développer un formalisme aux grandes échelles en présence d’une transition de phase en utilisant une approche sous-maille implicite. 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 [7] aux écoulements compressibles et diphasiques. Un schéma centré du quatrième ordre sera utilisé en combinaison avec une technique de régularisation pour modéliser l’effet des échelles non résolues. Des comparaisons seront effectuées avec une autre approche basée sur des méthodes de raidissement de l’interface (telles que la méthode THINC) combinée à une reconstruction locale d’ordre élevé (de type WENO ou méthode robuste de préservation de la monotonie). D’autre part, différents modèles diphasiques seront testés (modèle à relaxation HRM, tables thermodynamiques, modélisation du flux de chaleur) et implémentés dans SCB.

Une première validation sera effectuée sur des configurations canoniques à faible nombre de Reynolds pour lesquelles des données sont disponibles dans la littérature. Dans un deuxième temps, la simulation 2D puis 3D d’un écoulement d’hydrogène liquide autour d’un hydrofoil (cas test de Hord [8]) permettra de tester la modélisation diphasique et de mieux comprendre les mécanismes physiques et la dynamique complexe auto-entretenu. Des comparaisons pourront être effectuées avec le code Star-CCM+.

Références

- [1] Yusaf et al. "Sustainable hydrogen energy in aviation - A narrative review", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol.52, 1026-1045, 2024.
- [2] <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>
- [3] G. Boitel, "Effet thermodynamique dans un inducteur cavitant : mesures embarquées de température", thèse de l’INP Grenoble, 2007.
- [4] A. Wei, L. Yu , L. Qiu, X. Zhang, "Cavitation in cryogenic fluids: A critical research review ", Physics of Fluids, Vol.34, 101303, 2022.
- [5] Goncalves & Parnaudeau, "Comparison of multiphase models for computing shock-induced bubble collapse", Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow, Vol.22, 2020.
- [6] Dubois, Goncalves & Parnaudeau, "High performance computing of stiff bubble collapse on cpu-gpu heterogeneous platform", Comput. & Mathematics Appl., Vol.99, 2021.
- [7] Vincente Cruz & Lamballais, "Physical/numerical duality of explicit/implicit subgrid-scale modelling", Journal of Turbulence, Vol.24(9), 2023.
- [8] J. Hord, "Cavitation in liquid cryogen," NASA report CR-2156, 1973.