



Annonce de thèse CIFRE 2019-2022

Susceptibilité à l'érosion de cavitation des pompes rotodynamiques : approche par la simulation numérique bi-fluide des écoulements cavitants et comparaison entre eau et sodium

Contexte

Contexte industriel :

La cavitation apparaît dans un écoulement initialement en phase liquide lorsque la pression statique passe localement en dessous de la valeur de la tension de vapeur, du fait d'une dépressurisation ou d'une forte vitesse locale. Une partie de l'eau liquide change alors d'état et passe en phase vapeur. Les structures de vapeur ainsi créées sont convectées par l'écoulement jusqu'à des zones de plus forte pression (ou de vitesses locales moins élevées), où elles implosent alors violemment, générant des fluctuations de pression, du bruit et des vibrations. Si l'implosion est suffisamment forte et suffisamment proche d'une paroi, elle peut l'endommager, entraînant à terme son usure par enlèvement de matière (érosion de cavitation). Si la cavitation est encore plus développée, elle peut perturber notablement l'écoulement et entraîner une chute des performances du composant : perte de hauteur (pompe) ou de poussée (hélice), blocage de débit (vanne, diaphragme), chute du rendement (turbine).

L'érosion de cavitation est un phénomène dimensionnant pour la conception de toutes les machines et composants hydrauliques (pompes, turbines, vannes, diaphragmes...) et un mécanisme d'usure présent dans l'exploitation de ces matériels et générant des coûts de maintenance.

A ce jour, il n'existe pas de méthode d'estimation de la vitesse d'usure par érosion de cavitation sans faire un essai. Le mécanisme d'érosion de cavitation n'est encore que partiellement compris et constitue un verrou scientifique important à la maîtrise dans la durée de l'outil de production.

EDF, de par son parc important de composants hydrauliques (pompes, turbines hydrauliques, vannes, diaphragmes) reste donc fortement concernée par ce mécanisme d'usure, à la fois pour le domaine de la conception (pour les équipements futurs ou pour les remplacements de matériels) et pour le domaine de l'exploitation et de la maintenance (optimisation de l'exploitation pour réduire l'usure, prévision fine des périodicités d'inspection et de réparation).

L'objectif final est de définir un critère d'érosion local, prenant en compte la géométrie de l'organe hydraulique et son matériau, couplant la mécanique des fluides et la mécanique du solide.

Contexte scientifique :

L'étude de la partie « fluide » du phénomène s'impose comme prioritaire par rapport à l'étude de la partie matériau. En effet, outre le fait qu'elle constitue la première étape chronologique de ce mécanisme d'usure, elle semble a priori la plus complexe et surtout est dépendante des géométries très diverses des matériels hydrauliques et des conditions d'écoulement à prendre en compte. De plus, nous disposons déjà de modèles pour la partie « matériau », certes encore à améliorer, mais permettant déjà de simuler la déformation plastique due à une onde de surpression et de modèles permettant de passer de ces déformations plastiques à la perte de masse.

Les écoulements cavitants présentent une structure diphasique souvent très instable, avec des interfaces liquide-vapeur à travers lesquelles se produisent des transferts de masse, de quantité de mouvement et d'énergie, et qui connaissent donc de fortes variations des propriétés des phases (forts gradients de densité, forte compressibilité). De plus, le comportement turbulent du fluide est également modifié par la présence des zones de vapeur dans l'écoulement. La modélisation de tels écoulements présente donc des difficultés scientifiques importantes.

Une des conséquences néfastes de la cavitation est l'érosion des matériaux environnants. L'endommagement des parois solides est causé par des pics de pression très brefs (10 ns à 1 μ s), de haute amplitude (~1 GPa), attribués à l'impact d'ondes de surpression émises lors des implosions de structures de vapeur. L'érosion de

cavitation met ainsi en jeu de fortes interactions entre l'écoulement cavitant (caractérisé par la vitesse, les gradients de pression, l'échelle géométrique de l'écoulement et les caractéristiques du fluide) et les parois solides voisines, considérées comme immobiles.

La thèse de Christophe Leclercq intitulée « Simulation numérique du chargement mécanique en paroi généré par les écoulements cavitants, pour application à l'usure par cavitation des pompes centrifuges » [Leclercq, 2017] a proposé une grandeur « intensité de cavitation », dimensionnellement homogène à une puissance surfacique, déterminée à partir des champs de vitesse, de pression et de taux de vide d'un calcul de simulation numérique locale homogène et instationnaire des écoulements cavitants. Le calcul de cette grandeur a été appliqué sur un profil cavitant et sur les aubes d'une pompe et a permis d'obtenir un comportement jugé satisfaisant en comparaison avec les données expérimentales existantes (localisation de l'usure et comparaison relative entre différentes conditions d'écoulement). De plus, à l'échelle plus locale de la bulle en proche paroi, les aspects instationnaires et de propagation d'ondes dans le milieu diphasique compressible ont été explorés, car ils semblent essentiels pour pouvoir atteindre des amplitudes de chargement capables d'endommager plastiquement le matériau.

Objectif et résultats attendus

L'objectif de la thèse est de proposer une simulation validée de la cavitation au sein d'une pompe rotodynamique à l'aide d'une modélisation bi-fluide et d'en déduire un chargement mécanique afin de quantifier le risque d'usure par érosion de cavitation de ce matériel, pour ses différentes conditions d'exploitation.

Pour cela, différentes étapes seront progressivement parcourues :

- Améliorer la prévision hydrodynamique de la cavitation en utilisant le code bifluide NEPTUNE_CFD (co-développement EDF-CEA-Framatome-IRSN, dont l'équipe de développement principale est située à Chatou), en proposant et validant les modèles adaptés à la physique de ce type d'écoulement (termes de transfert de masse, quantité de mouvement et énergie adaptés à la cavitation).
- Améliorer le modèle de prévision d'usure, si besoin en menant des simulations à l'échelle « bulle » à l'aide du code compressible « rapide », développé également au sein de MFEE, et en développant des scénarios pouvant faire intervenir une amplification par des ondes de pression ou une interaction constructive entre plusieurs ondes. L'exploitation des résultats expérimentaux sur les déformations plastiques de la paroi (appelées « marquage ») pourra contribuer à proposer des distributions réalistes dans le fluide des événements générateurs d'impacts.
- Utiliser le modèle d' « intensité de cavitation », proposée précédemment par C. Leclercq, et l'appliquer sur la géométrie d'une pompe, pour laquelle on dispose de données expérimentales (à la fois une épaisseur d'usure pour des fonctionnements hydrauliques variés mais dont on a la trace et des essais de marquage réalisés sur une pompe à échelle réduite en eau).
- Examiner l'influence de la nature du fluide sur ce chargement, en réalisant ces calculs en eau et en sodium. Une comparaison eau-sodium, à même débit et même niveau de pression équivalent (même marge par rapport à la pression de saturation) permettra d'examiner la transposition en fluide, qui fera l'objet d'une étude bibliographique préliminaire afin de rassembler l'état de l'art sur l'effet de la nature du fluide sur l'érosion de cavitation. L'un des résultats attendus sera donc l'établissement des lois de transposition de l'intensité de cavitation entre le sodium et l'eau.
- Simuler l'influence des gaz occlus (y compris leurs échanges avec les gaz dissous) à l'aide de la simulation CFD. L'utilisation d'un troisième champ pour représenter les gaz incondensables constituerait ainsi une avancée dans la prise en compte de la cavitation. Le comportement de l'eau et du sodium vis-à-vis de ce paramètre est également à examiner.

Partenaire académique, organisation et moyens

Le partenaire universitaire est le LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels de l'INP Grenoble, équipe Energétique), représenté par la Professeure Regiane FORTES-PATELLA. Ce laboratoire travaille de longue date sur la cavitation, à la fois pour EDF sur le thème de l'érosion mais aussi pour le domaine spatial sur la simulation numérique.

Le travail de thèse ne comprend pas d'études expérimentales, car de nombreux cas de validation existent déjà et notamment des essais de marquage réalisés à EDF R&D.

L'outil numérique est le code NEPTUNE_CFD co-développé par EDF R&D MFEE, ainsi que le code bi-fluide diphasique rapide pour les aspects ondes de choc, également développé par EDF R&D MFEE.

Le doctorant sera embauché sur contrat CDD-CIFRE par EDF pour une durée de 3 ans.

Le lieu de travail du doctorant sera essentiellement le site EDF R&D de Chatou.

Profil du candidat et compétences souhaitées

Le-la candidat-e doctorant-e sera étudiant-e de Grande école ou M2, spécialité mécanique des milieux continus ou mathématiques appliquées.

Les compétences souhaitées sont de solides bases en mécanique des fluides et mécanique des milieux continus, ainsi qu'en mathématiques appliquées (méthode des volumes finis notamment). Le travail exige un bon sens de la physique et implique des développements informatiques dans un code de mécanique des fluides CFD avec transfert de chaleur et de matière.

De plus, l'excellente maîtrise du français et l'aisance dans la communication orale et écrite sont requises, ainsi que de bonnes compétences en anglais pour tirer parti de l'importante bibliographie existante et permettre des publications de qualité.

Références

[Fortes-Patella, 1998] A new approach to evaluate the cavitation erosion power
R. FORTES-PATELLA, J.L. REBOUD
Journal of Fluid Engineering, vol.120, pp. 335-344, June 1998

[Fortes-Patella, 2000] Cavitation damage measurements by 3D laser profilometry
R. FORTES-PATELLA, J.L. REBOUD, A. ARCHER
WEAR, vol 246, pp. 59-67, November 2000

[Fortes-Patella, 2013a] Energy Balance in Cavitation Erosion: from Bubble Collapse to Indentation of Material Surface
R. FORTES PATELLA, G. CHALLIER, J.-L. REBOUD, A. ARCHER
Journal of Fluids Engineering.—Transactions of ASME, Vol. 135 / 011303-1 to 11, January 2013

[Fortes-Patella, 2013b] Mass loss simulation in cavitation erosion : fatigue criterion approach
R. FORTES-PATELLA, T. CHOFFAT, J.-L. REBOUD, A. ARCHER
Wear, Volume 300, Issues 1–2, Pages 205-215 (15 March 2013)

[Leclercq, 2017] Simulation numérique du chargement mécanique en paroi générée par les écoulements cavitants
C. LECLERCQ
Thèse Université Grenoble Alpes, soutenue le 13 décembre 2017