

# Simulation des Instabilités hydrodynamiques et Modélisation Avancée en Régime Cavitant (SIMARC)

## 1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Ce projet concerne l'étude théorique et numérique des instabilités hydrodynamiques des poches de cavitation qui se développent le long de parois solides. La cavitation de type poche est fréquemment observée sur des surfaces portantes comme les hydrofoils ou les aubes de turbomachines. Ce type d'écoulement est fortement instationnaire en fermeture de poche, et, en fonction des paramètres de l'écoulement (incidence, nombre de cavitation), plusieurs types de poche ont été observées (poche stable, poche pulsante...). Ces instabilités de cavitation ont été mis en évidence expérimentalement avec des bifurcations assez nettes entre les régimes. Les mécanismes sous-jacents notamment l'interaction entre la couche limite et la zone de mélange diphasique, l'interaction avec la turbulence, la propagation d'onde de chocs, les effets de compressibilité sont encore mal connus.

**Un premier volet** concerne l'étude d'instabilité théorique et numérique d'une poche de cavitation en régime turbulent. On cherchera une modélisation satisfaisante des instabilités en régime linéaire, c'est-à-dire au voisinage des seuils d'apparition de ces instabilités. Ces analyses de stabilité seront menées autour d'un champ porteur qui sera ici un champ turbulent solution des équations du mouvement turbulent moyen (RANS). Dans un premier temps le code CFD cavitant d'un des partenaires [1-2] sera linéarisé autour de cette solution stationnaire au préalable calculée. L'analyse de stabilité sera effectuée par une méthode de cliché où le produit matrice-vecteur de la jacobienne sera approximée par une méthode de différentiation et le problème aux valeurs propres par une méthode Krylov-Shur.

D'autre part, des simulations numériques turbulentes avec les deux codes partenaires seront effectuées pour retrouver les différents régimes de cavitation. L'architecture numérique des codes est similaire (codes compressibles 1-fluide), mais les modèles de turbulence et de cavitation sont différents permettant de faire de multiples comparaisons. L'influence des différents modèles (turbulence et cavitation) est forte et a un impact critique sur les résultats. Les simulations seront effectuées de concert entre les partenaires avec échanges réguliers. Le croisement des simulations et l'aspect coopératif est primordial.

La validation sera effectuée à partir de données expérimentales existantes sur l'un des partenaires. On dispose de deux géométries de Venturi avec des régimes de poche différents et d'une géométrie d'hydrofoil en incidence pour laquelle une cartographie des régimes a été mise en place en utilisant des méthodes de décomposition orthogonale en mode propres. Ces méthodes ayant été couplées à des méthodes de décomposition en mode dynamique (à partir d'un champ d'écoulement basé sur l'analyse de Koopman d'un système dynamique) il est possible de décrire les mécanismes physiques sous-jacents des instabilités de poche. Les modes extraits de ce type de technique peuvent être interprétés comme une généralisation des modes de stabilité globale et on obtient ainsi la contribution spatio-temporelle des structures de vapeur mettant en évidence une dynamique non-linéaire entre échelles.

**Un deuxième volet** concerne la mise en place de simulations avancées des grandes échelles (LES) en régime turbulent cavitant. On cherchera à formaliser les équations de Navier-Stokes 1-fluide filtrées en présence d'un changement de phase. Plusieurs stratégies de fermeture des termes sous-maille (méthodes de gradient, modèles dynamiques) et de méthodes numériques seront abordées. Ces simulations avancées permettront d'étudier et analyser les interactions turbulence-cavitation. Pour la

validation, deux expériences récentes à haute résolution spatio-temporelle avec des données sur la turbulence en régime cavitant (ce qui est extrêmement rare, cet aspect constituant un point fort du projet) sont mises à disposition [3]. Il s'agit d'une couche de mélange et d'une configuration de marche descendante. Des mesures de taux de vide (structures de vapeur) par absorption de rayons X, de champ de vitesse liquide par vélocimétrie par images de particules (PIV) et de pression pariétale fluctuante ont permis de mettre en évidence les interactions entre le changement de phase et la turbulence de l'écoulement. Ce résultat est primordial car il semble que la cavitation se manifeste par une augmentation de l'énergie cinétique turbulente décorrélée du cisaillement moyen provenant du terme de pression-dilatation et qui n'est pas prise en compte par les modèles de turbulence classique. Etant donné qu'il est difficile de quantifier ce terme correctement, il semble évident de repousser les hypothèses de modélisation aux échelles dissipatives en développant un formalisme de simulation aux grandes échelles adapté aux écoulements cavitants. D'autre part, la modélisation diphasique pourra être confrontée aux résultats expérimentaux qui grâce aux mesures spatio-temporelles des termes croisés densité-vitesse permettra de valider les modèles de transfert de masse.

### 1.1. VERROUS SCIENTIFIQUES

Le caractère diphasique, turbulent, compressible, instationnaire des écoulements cavitants, rend difficile les études expérimentales et numériques de la cavitation. La modélisation de phénomènes physiques mis en jeu comme le chemin thermodynamique et l'interaction avec la turbulence n'est pas pleinement établie. Des questions propres aux techniques numériques dans ce type d'écoulement persistent également. Il n'existe à ce jour **aucun** code prédictif et fiable capable de simuler les situations de cavitation que l'on rencontre dans l'industrie.

La modélisation des phénomènes physiques mis en jeu comme le chemin thermodynamique lors du changement de phase et l'interaction avec la turbulence n'est pas pleinement établie. L'interaction turbulence-cavitation est un phénomène très mal connu et fort peu documenté (dû, en particulier, à la difficulté d'effectuer des mesures dans les écoulements cavitants). Les effets de compressibilité ainsi que les effets de la phase dispersée sont méconnus. Les codes de calculs usuels sont formulés dans un cadre moyenné (RANS) avec hypothèse de Boussinesq pour les modèles de turbulence. Plusieurs études ont montrés que ces modèles sont inadaptés à prédire de façon correcte la dynamique des poches de cavitation notamment aux petites échelles.

Nous proposons d'utiliser dans un premier temps des méthodes hybrides URANS-LES (PANS, SAS, DES, ILES, ...) pour une meilleure prise en compte de la dynamique de l'écoulement. Dans un deuxième temps, une approche de type simulation de grandes échelles, dans laquelle les phénomènes instationnaires sont naturellement pris en compte et le niveau de détails de la turbulence que l'on simule directement peut être choisi, sera développée et permettrait une avancée majeure dans la simulation de ces écoulements complexes diphasiques.

Plusieurs points durs sont à lever pour que la simulation des grandes échelles devienne un outil fiable et d'utilisation massive pour la cavitation:

- modèles de fermeture et leur interface avec la modélisation diphasique;
- traitement des parois solides ;
- précision, robustesse et efficacité des méthodes numériques.

Ce projet se propose d'aborder tous ces volets de modélisation et de donner des contributions originales.

La partie la plus innovante du projet concerne l'étude de stabilité en régime cavitant. Ce travail est totalement original et n'a jamais été abordé encore en cavitation. L'un des partenaires dispose d'une expérience reconnue en stabilité pour les écoulements aérodynamiques [4] et transfère ses compétences vers l'hydrodynamique avec cavitation. Les méthodes de calcul des instabilités ont profondément évolué depuis une décennie permettant d'aborder des écoulements de plus en plus complexe géométriquement et physiquement. En effet, il est actuellement possible d'intégrer une méthode de calcul de valeurs propres au sein d'un code de simulation numérique généraliste résolvant les équations RANS et possédant des modèles multi-physiques diverses (multi-phasique, réactif, ...). L'objectif de ce projet est de comprendre l'évolution de la dynamique d'un écoulement au sein d'une géométrie qui est le siège de bifurcation entre un écoulement statistiquement stationnaire et un écoulement instationnaire auto-entretenu. Ce changement de régime est directement lié à l'apparition conjoint d'un décollement massif et d'un régime cavitant. Une analyse de stabilité autour d'un état de base peut permettre de mieux comprendre des mécanismes physiques sous-jacents et d'avoir un outil prédictif d'apparition des instationnarités.

## **1.2. LES RÉSULTATS ESCOMPTÉS**

Les résultats attendus de ce projet sont les suivants :

**1.** Mise en place d'un code de calculs d'instabilités en régime cavitant validé et meilleure compréhension des mécanismes d'instabilités de poche.

Cet outil permettra d'étudier d'autres configurations (notamment des configurations industrielles) et sera très utile pour déterminer les régimes d'instabilités de poche. Il permettra d'établir un critère utile aux turbiniéristes pour déterminer les sources de fluctuations générées par les poches.

De plus, on espère mieux comprendre les mécanismes qui pilotent la dynamique des poches de cavitation et les régimes associés.

**2.** Discrimination des modèles de cavitation et turbulence dans la capacité à restituer la dynamique de poches et les différents régimes observés.

On espère faire émerger un couple (modèle de cavitation, modèle de turbulence) qui permet de simuler de façon satisfaisante la dynamique d'une poche de cavitation.

**3.** Mise en place de simulation des grandes échelles en régime cavitant afin de mieux comprendre la dynamique des structures diphasiques aux petites échelles et l'interaction turbulence-cavitation.

Cet outil de calculs avancés permettra de mieux simuler les écoulements 3D instationnaires siège de phénomènes auto-entretenus basse fréquence et de comprendre les mécanismes physiques sous-jacents.

## **2. PERTINENCE DU PROJET - ENERGIE, PROPRE, SURE ET EFFICACE**

Ce projet s'inscrit dans le contexte général des énergies renouvelables et du développement durable et, plus particulièrement, de la production d'électricité par énergie hydraulique. La cavitation est un phénomène limitant en phase de conception des machines hydrauliques (pompes, turbines) et conduit à des pertes importantes de rendement des installations, à l'érosion des parois solides (limitant la durée de vie des composants) ainsi qu'à des problèmes d'instabilités de fonctionnement des machines pouvant aller jusqu'à des avaries mécaniques sur l'équipement. Malgré son importance, le phénomène de cavitation lui-même ainsi que ses principales conséquences sont encore loin d'être parfaitement compris et encore plus loin d'être maîtrisés.

La cavitation est un phénomène qui apparaît fréquemment dans les composants hydrauliques classiques tels que les pompes, vannes et turbines dès qu'un système doit convertir une énergie mécanique en énergie hydraulique. Des survitesses locales imposées par la géométrie, par des phénomènes de cisaillements, d'accélération ou de vibrations peuvent engendrer des baisses locales de pression dans le fluide. Lorsqu'en certains points de l'écoulement la pression est inférieure à la pression de vapeur du fluide, il se produit une vaporisation partielle et des structures de vapeur prennent naissance. Les structures ainsi formées sont entraînées par l'écoulement et lorsqu'elles atteignent une zone de pression plus élevée elles se condensent et implosent violemment. Le collapse des structures génère des pics de pression très brefs (10ns à 1 $\mu$ s), de très haute amplitude (supérieurs à 1000 bars), à l'origine de nuisances très importantes (érosion des parois, vibrations, bruit, pertes de rendement, réduction de la durée de vie des composants).

Selon le régime de poches qui apparaît localement au sein des aubes d'une machine, l'érosion et les vibrations engendrées sont plus ou moins destructives. Une connaissance des mécanismes régissant la fermeture de poche, de son caractère périodique ou non, de la dynamique aux petites échelles et du fractionnement en structures diphasiques plus petites est ainsi requise. L'étude des instabilités de l'écoulement dans la zone avale de la poche peut potentiellement conduire à un critère permettant la prévision des sources de fluctuations générées par les poches de cavitation en fonction des conditions d'écoulements.

### **3. PRÉSENTATION DU CONSORTIUM**

Le consortium réunit quatre laboratoires : LEGI, DYNFLUID, ICUBE, P'.

#### **• le laboratoire LEGI**

Le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) est une Unité Mixte de Recherche (UMR 5519). Ce laboratoire développe des recherches fondamentales en mécanique des fluides et transferts, ouvertes sur des problématiques industrielles aussi bien que géophysiques. Les travaux actuellement menés au LEGI sur la thématique cavitation concernent la simulation d'écoulements par approches hybrides RANS-LES dans le cadre d'une thèse financée par la DGA, le développement de modèles en conditions cryogéniques pour le CNES et l'étude de l'interaction turbulence-cavitation sur la base de données expérimentales fines.

#### **• Le laboratoire DynFluid**

Le laboratoire DynFluid (EA 92) est composé de trois équipes : aérodynamique, turbomachine et cavitation et aéroacoustique et instabilité. Le laboratoire développe depuis plusieurs années des méthodes numériques pour le calcul des instabilités et travail en particulier sur la dynamique des écoulements décollés. Depuis trois ans, le laboratoire a développé des méthodes de stabilité innovantes pour les écoulements 3-D et ces méthodes ont été récemment étendues aux écoulements turbulents.

#### **• l'institut P'**

L'Institut P' est une unité propre du CNRS (UPR 3346). Ses activités de recherche couvrent un large spectre de thématiques dans les domaines des matériaux, de la mécanique des fluides et de l'énergétique. Il a pour vocation de permettre d'aborder des sujets amont en réponse aux problématiques rencontrées dans les domaines aéronautique et spatial, des transports terrestres, de l'énergie et de l'environnement.

Les travaux actuellement menés en cavitation sont liés au développement du code CaviFlow en partenariat avec le LEGI.

• Le laboratoire ICUBE

ICube (UMR 7357) rassemble depuis 1er janvier 2013 les forces de recherche du site universitaire de Strasbourg dans le domaine des sciences de l’information et des sciences de l’ingénieur. L’équipe MECAFLU est spécialisée dans la modélisation d’écoulements complexes turbulents et dispose d’un cluster d’environ 512 cœurs. Les travaux actuellement menés à ICUBE sur la cavitation concernent l’amélioration de la modélisation au sein du solveur NSMB dans le cadre d’une thèse financée par le gouvernement taiwanais et co-dirigée par P’.

Personnes impliquées dans le projet :

Laboratoire	Nom	Prénom	position	Contributions
LEGI	DJERIDI	Henda	Professeur	Responsable scientifique Expertise et data expérimentales. Interaction turbulence-cavitation.
LEGI	BARRE	Stéphan	CR CNRS	Expertise et data expérimentales. Interaction turbulence-cavitation.
LEGI	BONAMY	Cyrille	IR CNRS	Support aux calculs et parallélisation
DYNFLUID	ROBINET	Jean-Ch	Professeur	Modélisation des instabilités
DYNFLUID	ALIZARD	Frédéric	MCF	Modélisation des instabilités
DYNFLUID	GAUDIO	Anthony	Informaticien	Support aux calculs
ICUBE	HOARAU	Yannick	MCF	Modèles et simulation en cavitation
ICUBE	HUANG	Chao	Doctorant	Modèles et simulation en cavitation
ICUBE	DUSEK	Jan	Professeur	Modèles et simulation en cavitation
P’	GONCALVES	Eric	Professeur	Modèles et simulation en cavitation
P’			informaticien	Support aux calculs

Le montant de l’aide demandée est de 225 keuros (demande d’une bourse de thèse en co-direction P’ et DynFluid).

**4. SOUTIEN INDUSTRIEL**

Ce projet est soutenu par EDF R&D

**5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

[1] J. Decaix and E. Goncalves, 2013. *Investigation of three-dimensional effects on a cavitating Venturi flow*, Int. Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 44, pp.576-595.  
 [2] E. Goncalvès et B. Charrière, 2014. *Modelling for isothermal cavitation with a four-equation model*, Int. Journal of Multiphase Flow, Vol. 59, pp. 54-72.  
 [3] V. Aeschlimann, S. Bare, H. Djeridi, 2011, *Velocity field analysis in an experimental cavitating mixing layer*, Physics of Fluids, Vol. 23(5).  
 [4] F. Alizard, J.-C. Robinet, X. Gloerfelt, 2012, *A Domain Decomposition Matrix-Free Method for Global Linear Stability*, Computers and Fluids, Vol. 66, pp. 63-84.