

Annnonce de thèse

Monitoring de l'érosion de cavitation : prévision d'endommagement à partir de mesure à ultrasons et jumeau numérique

Contexte

La cavitation survient dans un écoulement initialement liquide lorsque la pression statique atteint la pression de vapeur du liquide, en raison d'une dépressurisation ou d'une élévation locale de la vitesse d'écoulement. Ce phénomène provoque alors un changement de phase : une partie de l'eau liquide se transforme en vapeur. Les structures de vapeur ainsi formées sont entraînées par l'écoulement vers des zones de pression plus élevée où elles implosent violemment. Ces implosions génèrent des fluctuations de pression, du bruit, ainsi que des vibrations. Lorsqu'elles se produisent à proximité des parois et avec une intensité suffisante, elles peuvent endommager les matériaux, entraînant une perte de matière progressive appelée **érosion de cavitation**.

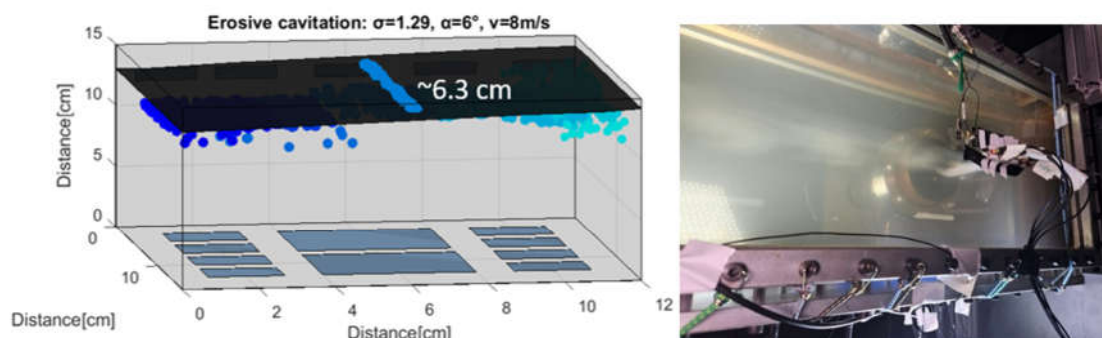
À ce jour, aucune méthode complètement validée ne permet de prédire ce phénomène ou de mesurer, avec précision, la vitesse d'usure induite par la cavitation. Les verrous scientifiques à lever sont encore nombreux pour bien comprendre et caractériser les mécanismes physiques associés en vue de garantir une maîtrise durable des outils de production.

Le groupe EDF, de par son parc important de composants hydrauliques (pompes, turbines hydrauliques, vannes, diaphragmes) reste donc fortement concerné par ce mécanisme d'usure, à la fois pour le domaine de la conception et pour le domaine de l'exploitation et de la maintenance.

L'objectif industriel est de développer une technique de surveillance à base de mesures *in-situ* et Jumeaux Numériques, permettant :

- d'identifier la présence d'écoulements cavitants,
- d'estimer l'agressivité de l'écoulement et l'usure de la machine,
- de définir une stratégie de fonctionnement adaptée,
- de simuler des scénarii d'endommagement par cavitation (en contexte de production hydroélectrique notamment).

La méthodologie s'appuiera sur une **méthode ultrasonore non intrusive** pour la détection de la cavitation basée sur le traitement du signal acoustique (Figure 1) [1-3]. Les résultats expérimentaux obtenus seront couplés à un **modèle théorique permettant la prévision d'endommagement et de durée de vie des équipements** (sous forme de **Jumeau Numérique**), en vue d'optimiser leur exploitation et leur maintenance [4-5].



Résultats d'imagerie ultrasonore (à gauche) indiquant la géométrie et la dynamique du nuage de cavitation ainsi que son impact (effet érosif) sur un hydrofoile cavitant (à droite)
Figure 1 : Illustration du principe de l'imagerie ultrasonore pour la caractérisation des phénomènes de cavitation. Résultats obtenus dans le cadre d'une collaboration LEGI-EDF-GIPSA-lab. [1]

Objectif et résultats attendus

Le premier objectif de la thèse est de proposer une méthode pour détecter la présence de la cavitation et donner une grandeur caractéristique de l'« intensité de cavitation » (i.e., de l'agressivité) de l'écoulement cavitant à partir des signaux mesurés par ultrasons.

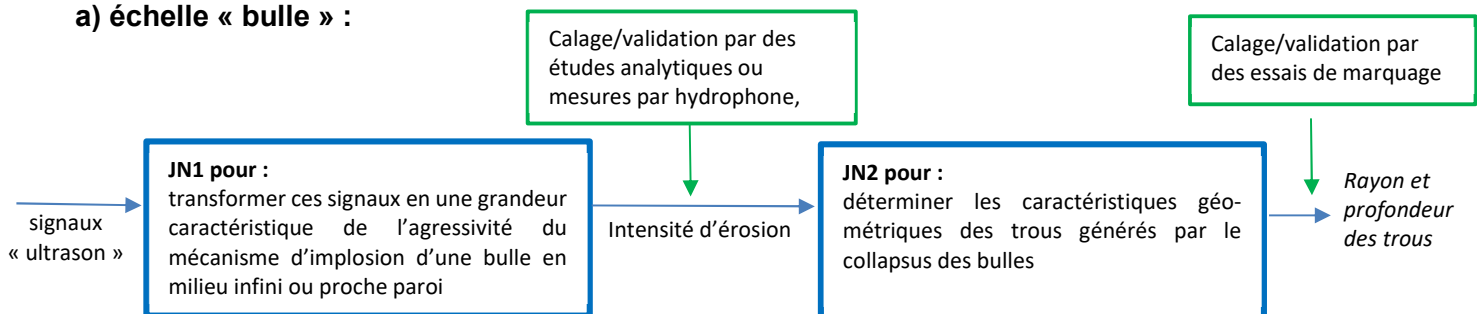
L'étude expérimentale se fera en deux étapes :

- Dans un premier temps, on s'intéressera à l'**échelle d'une bulle de vapeur** implosant à proximité d'une paroi solide. Des campagnes d'essais pour analyser l'implosion d'une bulle générée par laser dans une cuve pressurisable seront menés en collaboration avec différents partenaires. On pourra ainsi associer aux mesures par ultrasons, des analyses de marquage sur des échantillons de différents matériaux, des mesures par hydrophone, par capteur de pression et/ou des visualisations.
- On appliquera la méthode également pour caractériser **des écoulements cavitants** au sein de différentes boucles d'essais (en géométrie fixe et en machines tournantes) et lors d'essais in-situ.

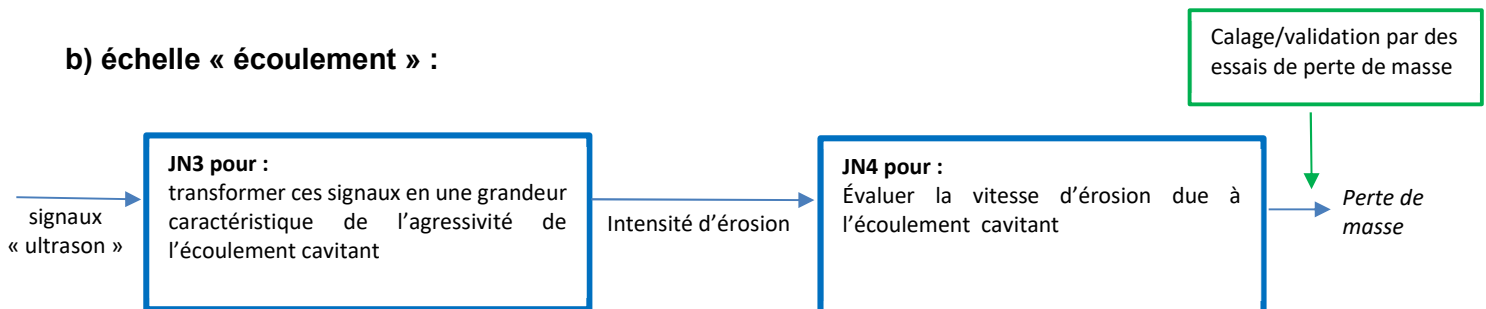
La méthodologie d'essais, de post-traitement et de modélisation mise en place pendant la thèse sera associée au développement et à l'exploitation d'un Jumeau Numérique. Ce type d'approche permet de simuler une réplique virtuelle d'un comportement donné [6].

Le schéma ci-dessous illustre la démarche scientifique visée, à base de combinaison de Jumeaux Numériques (JN) :

a) échelle « bulle » :



b) échelle « écoulement » :



Partenaires académiques, organisation et moyens

La thèse s'inscrit dans le cadre de la **Chaire d'excellence TwinHy** (sur les Jumeaux Numériques en production hydroélectrique) avec la Fondation Grenoble INP et EDF, portée par le Prof. Gildas BESANÇON du laboratoire GIPSA Lab (Grenoble Images Parole Signal Automatique).

Les partenaires universitaires sont le LEGI (Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels de Grenoble INP, équipe Énergétique), avec la Prof. Regiane FORTES-PATELLA, et le GIPSA Lab, avec le Dr. Cornel IOANA (HDR) et le Prof. Gildas BESANÇON. Ces laboratoires travaillent de longue date sur la cavitation, l'érosion de cavitation et les machines hydrauliques (LEGI) et ont une grande maîtrise sur les méthodes des mesures à ultrasons et sur le couplage données/modèles (GIPSA Lab). Les encadrants industriels côté EDF sont Carmen BADINA et Antoine ARCHER.

Les études seront menées en partenariat avec Vattenfall et HydroQuebec, via une thèse au Canada.

Le doctorant sera embauché sur contrat pour une durée de 3 ans.

Le lieu de travail du doctorant sera au GIPSA et au LEGI, avec missions à EDF DTG et R&D Chatou.

Profil du candidat et compétences souhaitées

Le-la candidat-e doctorant-e sera étudiant-e de Grande école ou Master2, spécialité Traitement du Signal, Automatique ou Mécanique des Fluides.

Les compétences techniques souhaitées sont de solides bases en modélisation physique, traitement des données, systèmes, acoustique...

De bonnes aptitudes à la communication et la rédaction sont aussi attendues.

Pour plus d'information :

cornel.ioana@grenoble-inp.fr

regiane.fortes@grenoble-inp.fr

gildas.besancon@grenoble-inp.fr

Références

[1] Nati M., Digulescu A., Ioana C., Badina C., Fortes Patella R., Maruzwski P., 2025, Ultrasonic detection of erosive cavitation in hydraulic turbines, *Proc. IAHR WG 2025 conference*, Brno, October 1-3, 2025

[2] Badina C., Ernst O., Maruzewski P., Ioana C., Fortes-Patella R., 2024, Non-intrusive monitoring of erosive cavitation, *Proc. Conference Hydro 2024*, 8-20 November 2024 Messe Congress Graz (MCG), Austria

[3] Digulescu A., Ioana C., Serbanescu A. 2019, Phase diagram-based sensing with adaptive waveform design and recurrent states quantification for the instantaneous frequency law tracking. *Sensors* (Basel). 2019 May 28;19(11):2434. doi: 10.3390/s19112434. PMID: 31141950; PMCID: PMC6603687

[4] Fortes Patella R., Challier G., Reboud J.L., Archer A., 2013, Energy balance in cavitation erosion: from bubble collapse to indentation of material surface, *Journal of Fluids Engineering - Transactions of ASME*, Vol. 135 / 011303-1 to 11

[5] Fortes Patella R., Choffat T., Reboud J.L., Archer A., 2013, Mass loss simulation in cavitation erosion: fatigue criterion approach, *Wear*, Reference: WEA100623, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.118>.

[6] A. Alonso, G. Robert et G. Besançon, A physics-based multi-regime approach for estimation of head losses in operating hydropower plants, *Journal of Process Control*, August 2025

PhD position

Monitoring cavitation erosion: damage prediction based on ultrasonic measurements and digital twins

Context

Cavitation occurs in a flow that is initially liquid when the static pressure reaches the vapour pressure of the liquid, due to a drop in pressure or a local increase in flow velocity. This phenomenon then causes a phase change: part of the liquid water turns into vapour. The vapour structures thus formed are carried by the flow towards areas of higher pressure where they implode violently. These implosions generate pressure fluctuations, noise and vibrations. When they occur near surfaces and with sufficient intensity, they can damage materials, leading to a gradual loss of material, known as **cavitation erosion**.

To date, there is no fully validated method for predicting this phenomenon or for accurately measuring the rate of wear caused by cavitation. There are still many scientific challenges in fully understanding and characterising the associated physical mechanisms, with the purpose of ensuring long-term reliability of production tools.

Given its extensive fleet of hydraulic components (pumps, hydraulic turbines, valves, diaphragms), EDF Group remains heavily affected by this wear mechanism, both in terms of design and in terms of operation and maintenance.

The **industrial objective** is to develop a monitoring technique based on in-situ measurements and digital twins, enabling:

- to identify the presence of cavitating flow,
- to estimate the aggressiveness of the flow and machine wear,
- to define an appropriate operating strategy,
- to simulate cavitation damage scenarios (particularly in the context of hydroelectric power generation).

The methodology will be based on a **non-intrusive ultrasonic method** for detecting cavitation, using acoustic signal processing (Figure 1) [1–3]. The experimental results obtained will be combined with a **theoretical model enabling the prediction of equipment damage and service life** (in the form of a **Digital Twin**), with the goal of optimising their operation and maintenance [4-5].

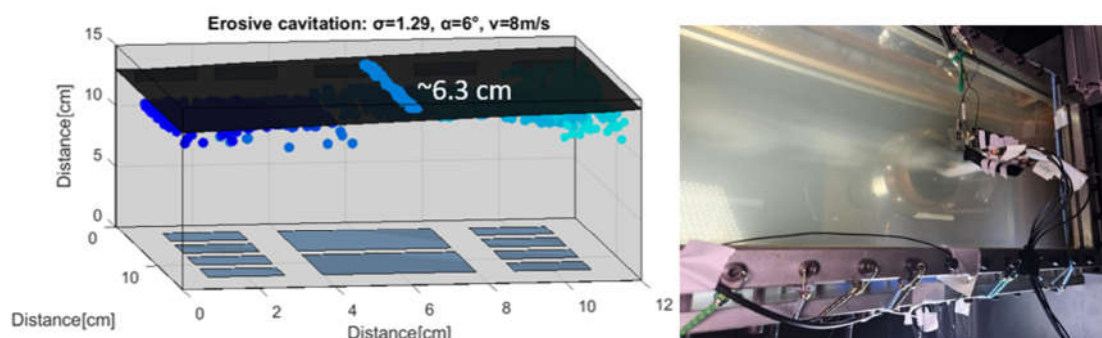


Figure 1 : Illustration of ultrasonic imaging for cavitation characterisation (coll. LEGI-EDF-GIPSA la [1]): ultrasonic imaging results (left) and impact effect on a cavitating hydrofoil (right).

Objective and expected results

The primary objective of this thesis is to propose a method for detecting the presence of cavitation and to provide a characteristic measure of the ‘cavitation intensity’ (i.e., the aggressiveness) of the cavitating flow based on signals measured by ultrasound.

The experimental study will be conducted in two stages:

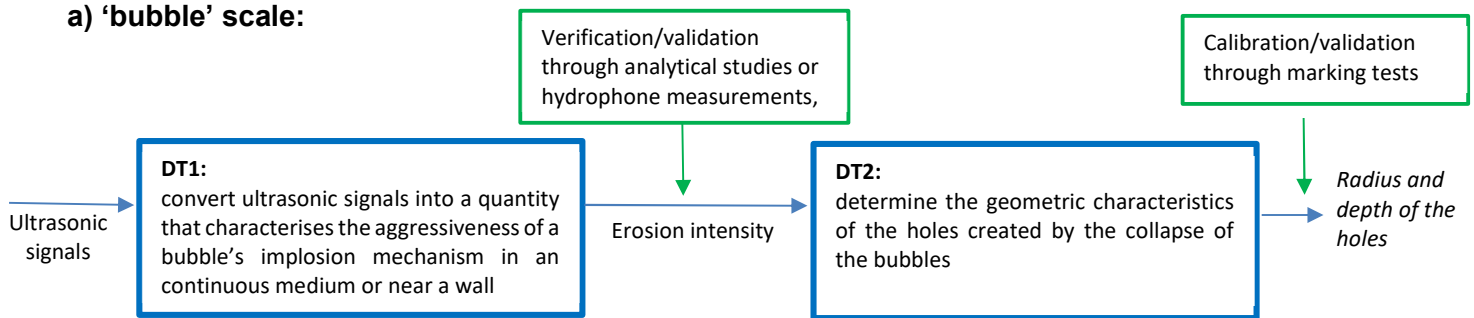
a) Initially, the focus will be on the **scale of a vapour bubble** imploding near a solid wall. Test campaigns to analyse the implosion of a laser-generated bubble in a pressurisable tank will be carried out in collaboration with various partners. This will enable to combine ultrasonic measurements with tracer analyses on samples of different materials, hydrophone measurements, pressure sensor readings and/or visualisations.

b) The method will also be applied to characterise **cavitating flows** within various test loops (in fixed geometry and rotating machinery) and during in-situ tests.

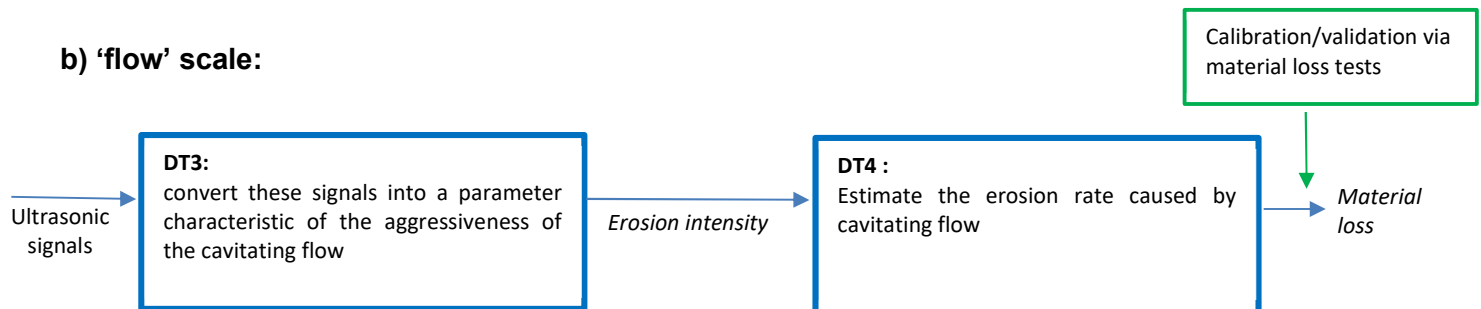
The methodology for testing, post-processing and modelling developed during the thesis will be combined with the development and use of a *Digital Twin*. This type of approach makes it possible to simulate a virtual replica of a given behaviour [6].

The diagram below illustrates the intended scientific approach, based on a combination of Digital Twins (DT):

a) ‘bubble’ scale:



b) ‘flow’ scale:



Academic partners, organisation and resources

The PhD is hosted by *TwinHy* Chair of Excellence (on Digital Twins for hydroelectric facilities) with Grenoble INP Foundation and EDF, led by Prof. Gildas BESANÇON of GIPSA Lab (Grenoble Images Parole Signal Automatique).

The academic partners are LEGI (Laboratory of Geophysical and Industrial Fluid Dynamics at Grenoble INP, Energy Team), led by Prof. Regiane FORTES-PATELLA, and GIPSA Lab, led by Dr Cornel IOANA (HDR) and Prof. Gildas BESANÇON. These laboratories have long been working on cavitation, cavitation erosion and hydraulic machinery (LEGI) and have extensive expertise in ultrasonic measurement methods and data-model coupling (GIPSA Lab).

The industrial supervisors on EDF side are Carmen BADINA and Antoine ARCHER.

The research will be conducted in partnership with Vattenfall and Hydro-Québec, via a PhD in Canada.

The PhD student will be employed on a three-year contract.

The PhD location will be at GIPSA and LEGI, with possible work trips to EDF DTG and R&D Chatou.

Candidate profile and required skills

The PhD candidate will have a Master Degree in Signal Processing, Control Engineering or Fluid Mechanics.

The required technical skills include a solid foundation in physical modelling, data processing, systems, acoustics...

Good writing and communication skills are also required.

For more information :

cornel.ioana@grenoble-inp.fr

regiane.fortes@grenoble-inp.fr

gildas.besancon@grenoble-inp.fr

References

[1] Nati M., Digulescu A., Ioana C., Badina C., Fortes Patella R., Maruzwski P., 2025, Ultrasonic detection of erosive cavitation in hydraulic turbines, *Proc. IAHR WG 2025 conference*, Brno, October 1-3, 2025

[2] Badina C., Ernst O., Maruzewski P., Ioana C., Fortes-Patella R., 2024, Non-intrusive monitoring of erosive cavitation, *Proc. Conference Hydro 2024*, 8-20 November 2024 Messe Congress Graz (MCG), Austria

[3] Digulescu A., Ioana C., Serbanescu A. 2019, Phase diagram-based sensing with adaptive waveform design and recurrent states quantification for the instantaneous frequency law tracking. *Sensors* (Basel). 2019 May 28;19(11):2434. doi: 10.3390/s19112434. PMID: 31141950; PMCID: PMC6603687

[4] Fortes Patella R., Challier G., Reboud J.L., Archer A., 2013, Energy balance in cavitation erosion: from bubble collapse to indentation of material surface, *Journal of Fluids Engineering - Transactions of ASME*, Vol. 135 / 011303-1 to 11

[5] Fortes Patella R., Choffat T., Reboud J.L., Archer A., 2013, Mass loss simulation in cavitation erosion: fatigue criterion approach, *Wear*, Reference: WEA100623, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.118>.

[6] A. Alonso, G. Robert et G. Besançon, A physics-based multi-regime approach for estimation of head losses in operating hydropower plants, *Journal of Process Control*, August 2025