

Compressible multi-phase fast transients modeling with fluid-structure interaction

*Modélisation des transitoires multi-phasiques
avec interaction fluide-structure*

Habilitation à diriger des recherches de l'Université Paris-Saclay

École doctorale n° 579, sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences
(SMEMaG)

Spécialité de doctorat: Mécanique des fluides

Unité de recherche: IMSIA

Référent: Benoît FIORINA

Thèse présentée et soutenue à EDF Lab Paris-Saclay,
le 9 Juillet 2025, par

Frédéric DAUDE

Defense committee

Eleuterio F. TORO

Emeritus Professor, University of Trento, Italy

Rémi ABGRALL

Professor, University of Zurich, Switzerland

Fabien PETITPAS

Associate Professor, Aix-Marseille University, France

Iztok TISELJ

Professor, Jožef Stefan Institute, Slovenia

Christian TENAUD

Director of Research, CNRS, Paris-Saclay University, France

Maria Giovanna RODIO

Head of Laboratory, CEA Saclay, France

Raphaël LOUBÈRE

Director of Research, CNRS, Bordeaux University, France

Reviewer

Reviewer

Reviewer

Examiner

Examiner

Examiner

Examiner

Titre: Modélisation des transitoires multi-phasiques avec interaction fluide-structure

Mots clés: Écoulements compressibles multi-phasiques, Ondes de pression, Interaction fluide-structure, Écoulements bas-Mach, Schémas de Godunov approchés, Tuyauteries

Résumé: Dans certaines conditions de fonctionnement ou accidentelles, des transitoires multi-phasiques rapides et indésirables peuvent apparaître dans les circuits des centrales nucléaires de type Réacteur à Eau Pressurisée (REP). Ces phénomènes sont caractérisés par de fortes variations de pression. Les ondes de pression ainsi générées se propagent et induisent des chargements mécaniques sur des composants pouvant ainsi altérer le fonctionnement et la sûreté des installations. D'autre part, les variations de pression sont telles que la pression peut, au cours du transitoire, atteindre la pression de saturation faisant ainsi apparaître de la vapeur. La propagation des ondes de pression en est fortement modifiée. De façon à obtenir des simulations réalistes et représentatives, il est indispensable de considérer des modélisations d'écoulements

diphasiques compressibles. Le couplage entre le fluide et les structures déformables est également nécessaire pour représenter correctement la réponse mécanique des composants. Par ailleurs, la vitesse du son au sein d'un écoulement diphasique compressible subit de fortes variations, tout comme le nombre de Mach, en fonction du taux de présence de vapeur. Des méthodes numériques capables de traiter les différents régimes d'écoulement (incompressible et compressible) sont donc nécessaires. D'autre part, beaucoup de ces transitoires multi-phasiques rapides se produisent dans des circuits de tuyauterie. Des méthodologies numériques adaptées doivent donc être développées pour la réalisation d'études industrielles. Les travaux de recherche exposés ici traitent des thématiques mentionnées précédemment.

Title: Compressible multi-phase fast transients modeling with fluid-structure interaction

Keywords: Compressible multi-phase flows, Pressure waves, Fluid-structure interaction, Low-Mach flows, Approximate Godunov schemes, Piping systems

Abstract: In certain operating or accidental situations, some undesirable multi-phase fast-transient events can occur in the piping systems of nuclear power plants such as Pressurized Water Reactor (PWR). These phenomena are characterized by high pressure variations. The generated pressure waves propagate and induce significant mechanical loads on some components which could impact the operation and the safety of industrial installations. In addition, due to the high pressure variation, the pressure amplitude can fall to its saturation value leading to the generation of vapor. This has a significant influence on the pressure waves propagation. In order to obtain realistic and representative computations, it is necessary to consider compressible two-phase flow modeling. The coupling be-

tween the fluid and the deformable structures has also to be taken into account in order to satisfactorily represent the mechanical consequences on some sensitive components. Moreover, the speed of sound within a compressible two-phase flow is known to undergo high variations as well as the Mach number as a function of the vapor volume fraction. Numerical methods able to capture the different flow regimes (incompressible and compressible) are thus required. Furthermore, most of the mentioned multi-phase fast-transient events occur in piping systems. As a consequence, dedicated mathematical models and numerical methods have to be developed for the achievement of industrial studies. The research summarized in the present document deals with the different topics, mentioned previously.