



**HAL**  
open science

# Écoulements, transferts de masse et de chaleur

Pierre Ruyer

► **To cite this version:**

Pierre Ruyer. Écoulements, transferts de masse et de chaleur : Travaux de recherche motivés par l'étude de la sûreté nucléaire. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Aix-Marseille Université (AMU), 2022. tel-03671797

**HAL Id: tel-03671797**

**<https://irsn.hal.science/tel-03671797>**

Submitted on 18 May 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ÉCOULEMENTS, TRANSFERTS DE MASSE ET DE CHALEUR

TRAVAUX DE RECHERCHE MOTIVÉS PAR L'ÉTUDE DE LA  
SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**Pierre RUYER - IRSN**

Mémoire présenté pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches de  
l'Université d'Aix-Marseille, France.

Soutenue publiquement le 6 avril 2022 au château de Cadarache, St-Paul-Lez-Durance, France, le jury  
étant composé de :

Christophe JOSSERAND, DR CNRS, Prof. à l'École Polytechnique	Rapporteur
Nicolas RIMBERT, Prof., ENSEM, Université de Lorraine	Rapporteur
Véronique ROIG, Prof. INPT/ENSEEIH	Rapportrice
Pascale AUSSILLOUS, Prof. à Aix-Marseille Université, IUSTI	Tutrice
Marie-Christine DULUC, Maître de Conférences au CNAM	Examinatrice
Philippe LAFON, Ingénieur Chercheur Senior HDR, EDF R&D, IMSIA	Examinateur
Olivier MARCHAND, Resp. programmes scientifiques, IRSN	Examinateur
Lounès TADRIST, Prof. à Aix-Marseille Université, IUSTI	Président du jury



## Résumé :

Les écoulements et les transferts de masse et de chaleur en leur sein sont des sujets d'intérêt pour de nombreuses situations accidentelles des études de sûreté des réacteurs nucléaires de puissance à eau légère. Que le scénario considère une perte de l'efficacité du système de refroidissement ou un excès de puissance, il est nécessaire d'estimer le risque d'endommagement du combustible nucléaire par un échauffement excessif. Ceci repose souvent sur une évaluation de l'efficacité thermique des processus d'ébullition convective. Les spécificités de ces scénarios impliquent des configurations variées et des conditions souvent éloignées de situations usuelles. Les années de recherche consacrées à ces phénomènes m'ont amené à aborder différentes facettes de leur phénoménologie : dynamique des particules, physique des interfaces, nucléation, caléfaction, vaporisation rapide. Ces travaux couvrent à la fois des contributions à l'élaboration et à la validation de modélisations au sein d'outils de calcul scientifique et des études expérimentales visant à simuler et caractériser les configurations d'intérêt. Ils ont été réalisés en collaboration avec de nombreux collègues de différentes institutions (PROMES, IMFT, LEMTA, CETHIL, UCL, IUSTI, d'Alembert, HZDR, OCDE-AEN, EDF, CEA). L'acquisition de ces connaissances permet tout autant l'interprétation de programmes de recherche menés par l'IRSN, l'amélioration des outils d'évaluation des situations accidentelles développés à l'IRSN, que la contribution à l'analyse de la pertinence des démonstrations de sûreté. Le mémoire et la soutenance de cette HDR synthétisent les démarches et résultats obtenus dans ces domaines tout en proposant des perspectives pour de futurs travaux.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Le contexte de la recherche en sûreté nucléaire</b>	<b>3</b>
1.1	L'évaluation du risque dans le domaine de la sûreté nucléaire	3
1.2	Faire de la recherche au sein de l'IRSN	4
<b>2</b>	<b>Présentation synthétique des activités scientifiques</b>	<b>7</b>
2.1	Thématiques et méthodes de recherche	7
2.2	D'un scénario accidentel l'autre	8
<b>3</b>	<b>Dynamique des écoulements particuliers</b>	<b>14</b>
3.1	Moyenne d'ensemble et bilan de quantité de mouvement d'une population	14
3.1.1	Contexte de ces travaux	14
3.1.2	Développement d'une approche prenant en compte une dispersion en taille	14
3.2	Une fermeture particulière pour les écoulements à bulles	15
3.3	Dispersion latérale de gouttes dans un écoulement cisailé	18
3.4	Écoulement granulaire de type vidange assistée par un écoulement gazeux	22
3.4.1	Problématique générale et structuration des activités de recherche	22
3.4.2	Débit de vidange gravitaire	24
3.4.3	Force motrice associée à un écoulement gazeux	28
3.4.4	Jet en sortie du réservoir	32
3.4.5	Modélisation continue	33
3.4.6	Conclusion - perspectives	37
<b>4</b>	<b>Transferts de masse et de chaleur</b>	<b>38</b>
4.1	Description interfaciale	38
4.1.1	Relations de saut	38
4.1.2	Description des propriétés thermodynamiques des phases	39
4.1.3	Résolution numérique des écoulements avec interface	41
4.1.4	Présence d'incondensables	45
4.2	Déclenchement de l'ébullition	48
4.2.1	Évaporation <i>vs</i> ébullition	49
4.2.2	Déclenchement de l'ébullition sur une paroi s'échauffant	50
4.2.3	Synthèse	57
4.3	Ébullition nucléée convective	57
4.4	Transition vers l'ébullition en film par caléfaction	58
4.5	Ébullition en film annulaire inversé	60
4.6	Transferts de chaleur entre un écoulement à gouttes et une paroi	62
4.7	Vaporisation rapide	66
<b>5</b>	<b>Synthèse et perspectives des travaux de recherche</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>Liste des activités et publications</b>	<b>73</b>
6.1	Identité	73
6.2	Formation	73
6.3	Expérience professionnelle	73
6.4	Montage et tutorat de thèses	73
6.5	Participation au suivi ou à des jurys de thèse	74
6.6	Encadrement de post-doctorants	74
6.7	Stages	74
6.8	Activités d'évaluation, comité de lecture	75
6.9	Représentation	75
6.10	Publications - communications	76

## Propos liminaires

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches retrace les travaux scientifiques correspondants à des activités de recherche que j'ai pu menés. Mon parcours professionnel est synthétisé dans le curriculum vitae présenté en section 6. Le métier que j'exerce depuis une quinzaine d'années au sein de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, l'IRSN, correspond à un poste d'ingénieur-chercheur qui associe des analyses de situations relatives à la sûreté nucléaire<sup>1</sup> à de l'acquisition de connaissances sur ces mêmes thématiques, c.-à-d. les travaux de recherche décrits dans ce mémoire.

Si ces thématiques structurent et déterminent les travaux entrepris, j'ai souhaité présenter mes travaux de recherche en les regroupant par rapport à des problématiques d'ordre scientifique. Ceci définit le plan du document comme tel :

- la section 2 relativement synthétique présente l'éventail des phénomènes auxquels je me suis intéressé et les relie aux différentes situations accidentelles correspondantes,
- la section 3 sur la dynamique des particules regroupe les travaux entrepris sur les écoulements diphasiques dans diverses configurations en se limitant aux aspects purement mécaniques que ce soit pour des écoulements à bulles, à gouttes ou granulaires denses,
- la section 4 sur les transferts de masse et de chaleur rassemble les travaux autour du changement de phase liquide-vapeur en abordant la modélisation thermodynamique des transferts interfaciaux, l'étude de différents régimes d'ébullition et les spécificités phénoménologiques associés à des variations rapides de puissance.

Néanmoins, il m'a paru nécessaire de décrire le contexte particulier de la recherche dans le domaine de la sûreté nucléaire afin de présenter le cadre au sein duquel j'oriente mes questionnement et travaux, c'est l'objet de la section 1. Ceci vient en quelque sorte mettre en perspective la démarche de recherche suivie, tant du point de vue de la nature des sujets abordés que des collaborations dans le cadre desquelles ils ont pu être traités.

## 1 Le contexte de la recherche en sûreté nucléaire

### 1.1 L'évaluation du risque dans le domaine de la sûreté nucléaire

L'évaluation du risque d'une installation nucléaire revient à considérer l'étude de scénarios de situations accidentelles initiés par une erreur, une défaillance ou un événement extrême (voire une combinaison d'initiateurs) afin de s'assurer que les systèmes et/ou le pilotage de l'installation permettent de maîtriser les conséquences de ces événements. Ces conséquences ne doivent pas aller à l'encontre de certains principes de sûreté. On définit ainsi des bornes à ne pas dépasser dans l'évolution de la situation : les critères. L'exploitant d'une installation nucléaire doit ainsi démontrer que l'évolution de la situation respecte ces critères. La plupart du temps, on ne peut pas baser cette évaluation sur une reproduction fidèle de ces scénarios accidentels : les états des installations sont potentiellement dangereux par nature et la réalisation de telles expériences coûteuse. Le scénario est ainsi modélisé par des simulations de différentes natures (ou des combinaisons de ces simulations) :

- reproduction de la situation accidentelle sur des maquettes intégrant l'ensemble des phénomènes, le plus souvent sur des installations avec des échelles (notamment spatiales) réduites (de manière à pouvoir minimiser risques et coûts associés),
- études de chacun des phénomènes associés à la situation à l'aide de simulations expérimentales, dites à effet séparé, qui permettent d'évaluer "morceau par morceau" la situation.

La démonstration de sûreté repose en grande partie sur les connaissances acquises à l'aide de ces simulations. Il est très souvent nécessaire de transposer les résultats acquis sur ces simulations aux situations accidentelles. Cette transposition se caractérise par la nécessité :

- d'extrapoler certains comportements à des situations non explorées expérimentalement,
- mais également de combler des lacunes de connaissances, tous les phénomènes ne pouvant être reproduits ou caractérisés lors de ces expériences.

L'évaluation d'une situation accidentelle, soit la démonstration dite de sûreté, est réalisée à l'aide d'outils de calcul scientifique. Dans cette évaluation, le respect du critère est la donnée cible. Les outils de calcul scientifique, plus ou moins élaborés, doivent par ailleurs être suffisamment fiables et la validation de cette fiabilité repose, en partie, sur leur capacité à reproduire fidèlement les résultats des essais simulant les situations. Les lacunes de connaissances, ainsi que certains biais potentiels associés à la

1. que ce soit pour monter, suivre, interpréter des programmes de recherche, mener des études, ou donner un avis d'expert technique sur des démonstrations de sûreté.



simulation numérique des phénomènes, impliquent une incertitude du résultat fourni par l'outil de calcul par rapport à la situation à évaluer. Plusieurs méthodes de compensation ou de prise en compte de cette incertitude sont mises en œuvre pour assurer que l'estimation finale majore le risque de ne pas respecter le critère. Parmi ces dernières, certaines hypothèses du scénario ou de la modélisation peuvent volontairement s'écarter d'une idéalisation réaliste de la situation examinée. En France, une formalisation de la méthodologie de maîtrise de la qualité des évaluations de sûreté basées sur des outils de calcul scientifique a été récemment publiée, [ASN-IRSN \(2017\)](#).

Les méthodologies d'évaluation ainsi que les critères évoluent avec les nouvelles connaissances acquises ou les améliorations des capacités prédictives des outils de calcul scientifique. L'évaluation du risque, même concernant des installations en service, est ainsi continûment examinée (notamment via l'obligation de revoir périodiquement les démonstrations de sûreté en appliquant les règles du moment : les visites décennales). Une tendance générale dans les méthodologies d'évaluation, du fait principalement des exploitants, est de recourir à des modélisations de plus en plus détaillées des phénomènes avec la visée d'avoir des estimations plus réalistes des situations accidentelles. Dans le domaine des écoulements, on note ainsi l'apparition de calculs basés sur des méthodes de CFD pour remplacer des évaluations plus approximatives. Cela peut, a priori, permettre d'assouplir certaines contraintes de fonctionnement des installations, tout en assurant une fiabilité équivalente. Ceci revient à réduire les marges qui existent nécessairement entre la situation réaliste et son idéalisation dans la démonstration de sûreté. Pour l'IRSN, qui fait l'expertise technique des évaluations pour le compte de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), il est ainsi nécessaire d'être au fait des capacités tout comme des limitations de ces nouveaux outils.

## 1.2 Faire de la recherche au sein de l'IRSN

Les missions de l'IRSN s'inscrivent dans ce contexte d'étude de la sûreté avec deux principales activités :

- l'examen technique des questions de sûreté appliquées aux installations nucléaires, que ce soit pour la définition des critères ou pour l'analyse critique des démonstrations apportées par l'exploitant responsable de la sûreté de l'installation,
- l'acquisition de connaissances par des activités de recherche dans des domaines de sa compétence.

La coordination entre les questions soulevées par l'examen des situations et les activités de recherche est pour l'Institut un atout et une spécificité par rapport à nombre de ses homologues à l'international. La tâche n'est pour autant pas triviale, les contraintes notamment du calendrier de l'expertise des dossiers techniques et de celui du montage et du suivi d'activités de recherche n'étant pas toujours facilement conciliables. J'ai néanmoins eu l'occasion, heureuse, d'être associé à l'évaluation techniques de plusieurs situations accidentelles. Cette activité représente une part relativement importante de mon temps de travail.

Les activités de recherche dans le domaine de la sûreté nucléaire couvrent un très large spectre de champs thématiques et demandent souvent des moyens financiers considérables. Mon activité se concentre sur la thématique de la thermohydraulique et plus principalement sur le circuit primaire des installations nucléaires. Je suis néanmoins en forte interaction avec la thématique de la thermomécanique des éléments combustibles dont la thermohydraulique détermine bien souvent les conditions aux limites : la première barrière de confinement de la matière fissile est la gaine entourant le combustible qui est en contact avec le réfrigérant du circuit primaire. Mes activités de recherche se sont déroulées dans des services spécialisés dans l'étude des scénarios accidentels dits de dimensionnement pour lesquels sont exclus des phénomènes tels que la fusion du cœur qui sont le domaine des accidents graves<sup>2</sup>. La présentation des scénarios accidentels pour lesquels j'ai eu à étudier des problématiques de thermohydraulique est proposée en section 2.

Il existe un découpage (porté principalement par des effets d'histoire) de spécialisation dans la recherche sur chacun des domaines entre les différents acteurs principaux du secteur nucléaire civil français (EDF, CEA, Framatome et IRSN). Certains domaines sont étudiés par plusieurs entités et il existe plusieurs cadres de collaboration entre les institutions. Ainsi, EDF, CEA et Framatome conjuguent certains efforts au sein de l'institut tripartite I3P. En ce qui concerne la R&D sur la thermohydraulique, et depuis plusieurs décennies, le projet quadripartite Neptune, [Guelfi et coll. \(2005, 2007\)](#), couvrant des programmes expérimentaux (historiquement principalement sur les sites de Saclay et de Grenoble du CEA avant le démantèlement des activités thermohydrauliques de ce dernier), du développement

2. à l'exception de mon sujet de DEA.

d'instrumentation, de la R&D en méthodes numériques, de la R&D en modélisation physique, du développement de logiciels (Cathare, [Bestion \(1990\)](#)), porté principalement par le CEA et Neptune\_CFD, [Mimouni et coll. \(2017a\)](#) porté principalement par EDF mais également des travaux sur la simulation numérique directe en diphasique, p. ex. [du Cluzeau et coll. \(2020\)](#)). Des comités adhoc gouvernent le pilotage de l'ensemble des actions quadripartites, regroupant pour chaque institution les représentants hiérarchiques à différents niveaux. Pour le compte de l'IRSN, je contribue directement au développement de modélisation physique principalement pour le logiciel Neptune\_CFD et je suis co-représentant IRSN du suivi du développement de ce logiciel ainsi que de l'ensemble des activités du projet Neptune. Certaines de mes activités sont donc financées par ce projet (à la hauteur maximale de 0,25 h.an).

Comme évoqué ci-dessus, la thermohydraulique au sein du cœur du réacteur est intimement liée à des problématiques de tenue du combustible à des sollicitations accidentelles. Ainsi, une part de mes activités est suivie et déterminée par l'entité quadripartite (historiquement tripartite) « Groupe de Gestion de Projet Comportement Combustible » du Comité de Programme de Sécurité des Installations Nucléaires. Mes activités de R&D relatives aux accidents d'APRP et de RIA sont ainsi suivies dans ce cadre et font l'objet d'un co-financement IRSN-EDF.

Une autre source de financement de mes activités est le cadre de projets internationaux, et notamment les projets NURISP et NURESIM européens retenus dans le cadre du septième programme cadre, volet EURATOM (2007-2012) et le CABRI International Program (en cours) porté par l'IRSN sous l'égide du Comité pour la Sécurité des Installations Nucléaires de l'Agence pour l'Énergie Nucléaire de l'Organisation pour la Coopération et le Développement Économique (OECD/NEA/CSNI).

Les thèses que j'ai co-encadrées ont été dans la totalité des thèses pour lesquelles les doctorants sont salariés par l'IRSN qui finance une centaine de doctorants et organise des campagnes d'évaluation des propositions de sujets et des candidats ainsi que le suivi et la formation des doctorants. Pour chacune des ces thèses, j'ai élaboré les sujets et construit des collaborations avec des partenaires académiques (PROMES, IMFT, LEMTA, CETHIL, UCL, IUSTI). Ces collaborations ont plusieurs fois été reconduites sur plusieurs thèses successives afin d'approfondir l'étude. J'ai remarqué à plusieurs occasions que les problématiques scientifiques relativement exotiques que génèrent l'étude des scénarios accidentels suscitent un intérêt particulier pour le monde académique.

Dans de nombreux cas, les travaux des doctorants ont été principalement portés par des études expérimentales nécessitant la conception et l'exploitation de dispositifs expérimentaux dédiés et le plus souvent d'un niveau de complexité élevé qui font de l'obtention de résultats d'essais avec une interprétation même préliminaire un résultat scientifique en soi. Les partenaires académiques collaborateurs ont toujours su proposer un environnement d'expertise et de services associés (ingénieurs instrumentation, atelier mécanique...) et il a été jusqu'à présent naturel d'héberger les dispositifs d'essais dans leurs locaux. Sur le site de Cadarache, l'IRSN développe, notamment depuis une dizaine d'années une plate-forme, nommée THEMA, dédiée à des activités expérimentales dans le domaine de la thermohydraulique, dont la première installation PEARL, [IRSN \(2015\)](#), a été dédiée aux accidents graves (menant à la fusion du cœur du réacteur). Depuis, des installations comprenant des boucles et des bassins se sont développées, notamment dans le cadre du projet ANR DENOPI, [Martin et coll. \(2017a\)](#). Aujourd'hui plusieurs projets de boucles thermohydrauliques sont à l'étude, parfois préliminaire, ou en cours de réalisation dans le domaine des accidents de dimensionnement pour les problématiques suivantes :

- étude des temps de chute des grappes de commandes d'un cœur de réacteur en fonctionnement normal et sous séisme ;
- étude des configurations d'écoulement diphasique au travers d'un faisceau de tubes et étude des vibrations des tubes induites (thématique de l'étude de la tenue mécanique des tubes du secondaire des générateurs de vapeur) ;
- étude du fonctionnement des systèmes passifs de refroidissement des cœurs de réacteur en situation accidentelle ;
- étude de la crise d'ébullition sur les crayons combustible en conditions de variation rapide de puissance.

Cette dynamique permet évidemment le développement d'un pôle de thermohydraulique au sein de l'IRSN à Cadarache relativement complet (de l'expérience à la simulation numérique), à l'instar, même si en échelle réduite, du pôle que j'ai pu connaître à Grenoble lors de ma thèse.

L'activité scientifique de recherche au sein de l'IRSN est nécessairement associée à une activité de communications en conférences et de publications dans des journaux à comité de lecture. Ces publications font l'objet d'un suivi par la hiérarchie via des objectifs chiffrés et sont par ailleurs accompagnées par une politique d'accessibilité au public, commune à de nombreuses institutions publiques françaises, via notamment la mise en ligne du contenu des articles sur la plate-forme HAL. La participation en

conférences est soumise à une approbation hiérarchique qui prend en compte l'équité entre les différents chercheurs ainsi que les contraintes budgétaires. Néanmoins, l'ensemble de la production scientifique ne fait pas l'objet de publications, et notamment celle réalisée dans le cadre de programmes de recherche internationaux co-financés par des partenaires, à l'instar du Cabri International Program pour lequel je suis en charge d'une partie de l'interprétation des essais. Une part de la production scientifique correspond à la production de rapports techniques destinés à la fois à une diffusion interne et externe (partenaires des collaborations). Une autre part correspond à l'analyse technique détaillée de démonstration de sûreté à laquelle je contribue soit en soutien à des collègues soit en tant que principal contributeur sur le sujet spécifique des conséquences d'un accident de type éjection de grappes en présence de crayons défectueux. Cette activité comprend, outre la production de rapports de synthèse, des échanges techniques (questionnaires, réunions d'instruction technique en présence de l'Autorité de Sûreté Nucléaire et de l'exploitant) et, le cas échéant, la présentation de recommandations portées par l'IRSN devant le Groupe Permanent pour les Réacteurs nucléaires ([lien vers la page de présentation sur le site de l'ASN](#)). Par ailleurs, je suis également responsable du logiciel CIGALON, une approche relativement simplifiée de la phénoménologie relative à l'interaction combustible-réfrigérant dans le contexte des accidents de type RIA, et à cet égard, j'assure le suivi de prestations de développement et de maintenance informatiques.

Mon activité de formation des futurs chercheurs correspond principalement à du tutorat de doctorants et de stagiaires de master et j'ai eu deux occasions d'accompagner des travaux de post-doctorants.

## 2 Présentation synthétique des activités scientifiques

Là où la chèvre est attachée, il faut qu'elle broute.

*Proverbe*

L'ensemble des travaux scientifiques auxquels j'ai contribué se rattache aux domaines de la mécanique des milieux continus et de l'énergétique. Une présentation très générale des différents aspects investigués est donnée dans la section 2.1. Ils ont été développés au sein du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) lors de mon stage de DEA et de ma thèse (2002-2006), puis au sein de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) lors de mes travaux de post-doctorat puis d'ingénieur-chercheur (2006-présent). Ces travaux ont été ainsi motivés par des problématiques relatives à l'étude de plusieurs situations accidentelles considérées dans l'étude de sûreté des réacteurs nucléaires et, à ce titre, orientés par leur finalité. Le mémoire décrit ainsi un itinéraire de 18 années de recherche motivés par différentes problématiques de sûreté nucléaire qui sont brièvement décrites en section 2.2. Je ne rapporte donc pas dans cette section de résultats particuliers mais décrit plutôt le contexte menant à la formalisation de questions scientifiques, la démarche suivie pour les aborder et les perspectives correspondantes.

### 2.1 Thématiques et méthodes de recherche

L'axe principal de recherche des travaux présentés dans ce mémoire est la compréhension des phénomènes de transfert de chaleur impliquant le changement de phase liquide-vapeur de l'eau. Les configurations étudiées peuvent être catégorisées par rapport à différents régimes, selon la classification usuelle issue des travaux fondateurs de [Nukiyama \(1966\)](#),

- déclenchement de l'ébullition (nucléée hétérogène sur paroi chauffée, sur paroi non chauffée, à cœur);
- croissance, écoulement, coalescence-fragmentation, condensation à cœur des bulles;
- ébullition en film en configuration annulaire inversée (établissement, transfert de chaleur associé);
- ébullition en film à gouttes dispersées (mécanismes de transfert de chaleur, dynamique des gouttes en canal ou en spray).

L'étude plus spécifique des transferts entre un ensemble de particules fines et de l'eau a amené à des travaux concernant la dynamique d'écoulement des milieux fragmentés denses du type granulaires.

Par ailleurs, les configurations étudiées couvrent différentes situations relatives aux cinétiques d'établissement des transferts :

- le temps d'établissement du régime de transfert de chaleur est relativement court par rapport à la dynamique de l'écoulement : on étudie alors des situations principalement convectives et la relation entre les configurations établies de l'écoulement diphasique et les mécanismes de transfert et de transport d'énergie associés;
- le temps d'établissement du régime de transfert de chaleur est du même ordre de grandeur que celui du transport de la chaleur par l'écoulement : on étudie alors l'initiation et la propagation des régimes de chaleur avant d'atteindre la situation précédemment décrite;
- le temps d'établissement du régime de transfert de chaleur est plus court que celui du transport par l'écoulement : on étudie alors le couplage entre la dynamique des transferts de masse et de chaleur et celle de la relaxation mécanique du fluide avoisinant, amenant à sa mise en mouvement.

Les échelles spatiales auxquelles ces dynamiques ont été étudiées vont de la description des singularités localisées à l'interface jusqu'à la description statistique des écoulements à l'échelle du canal de l'écoulement principal. Il n'existe pas de méthode unique permettant l'appréhension de l'ensemble de ces phénoménologies (si tant est que cette existence repose sur un besoin). Ainsi j'ai considéré les méthodes suivantes :

- des simulations expérimentales reproduisant les configurations d'intérêt à l'aide de géométries idéalisées, voire réduites, voire dans des conditions de similitude de propriétés fluide;
- des simulations numériques basées sur des résolutions à différents niveaux de précision (de la simulation numérique directe avec description explicite de l'interface à des approches poreuses pour la description du cœur d'un réacteur).

Les réalisations expérimentales ont notamment nécessité des travaux conséquents d'inventivité et d'innovation dans leur conception. Les travaux numériques concernent à la fois le développement de méthodes de résolution, l'intégration de nouveaux modèles phénoménologiques dans un schéma de résolution prédéterminé, et le développement de méthodologie d'analyse des résultats de simulation.

## 2.2 D'un scénario accidentel l'autre

**Généralités** Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire repose sur le transfert de l'énergie associée aux réactions de fission vers des échangeurs. Ce transfert est associé à la circulation d'un fluide, dit caloporteur, au sein du coeur du réacteur qui contient les éléments combustible au sein desquels est la matière fissile. Le principe de sûreté d'un réacteur réside dans le confinement des matières radioactives ce qui est réalisé, pour les réacteurs à eau pressurisée du parc électro-nucléaire français, par la présence de trois barrières que sont, le matériau de gainage de l'élément combustible, les parois du circuit du réfrigérant, l'enceinte de confinement (paroi du bâtiment réacteur).

Les risques associés aux situations accidentelles concernent ainsi principalement des défaillances de l'étanchéité des barrières. Qu'elles soient la cause ou la conséquence d'un scénario hypothétique accidentel, les situations à examiner correspondent souvent à un déséquilibre entre la puissance produite et celle pouvant être évacuée par le refroidissement du coeur.

Les éléments combustible des réacteurs à eau pressurisée (REP) sont des tubes cylindriques, appelés crayons, dont le diamètre est de l'ordre du cm et la hauteur de l'ordre de 4 m et qui contiennent un empilement de pastilles de combustible de l'ordre du cm en hauteur. Le matériau combustible se fragmente sous l'effet des réactions de fission, voire de sollicitations thermiques et mécaniques accidentelles. Le réfrigérant, l'eau en l'occurrence, s'écoule dans le faisceau de tubes dans des interstices dont le diamètre hydraulique caractéristique est de l'ordre du cm. En fonctionnement normal, l'eau est à une pression de l'ordre de 15 MPa (soit une pression réduite  $P^* = 15/[P_c = 22] = 0.68$ , ce qui, par rapport aux propriétés aux conditions ambiantes, implique un relativement très faible ratio,  $\simeq 6$ , de volume spécifique entre la vapeur et le liquide à saturation et une chaleur latente de changement de phase environ deux fois moindre,  $\mathcal{L} \simeq 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ ) pour des températures de l'ordre de 300 °C (ce qui correspond à un état liquide sous-refroidi ( $T_{sat}(P=15.5\text{MPa}) \simeq 345 \text{ °C}$ , avec un nombre de Jakob,  $Ja = [h_{l,sat}(P) - h_l(P, T_l)]/\mathcal{L}(P) \simeq 0.3$ ) et les débits correspondent à des vitesses d'écoulement dans les interstices de l'ordre de  $5 \text{ ms}^{-1}$ , soit un nombre de Reynolds de l'ordre de  $Re \simeq 5.8 \cdot 10^5$ ).

**Surpuissance localisée et risque d'assèchement** Une des limites de fonctionnement des REP concerne la limite en puissance venant s'affranchir du risque d'assèchement des crayons qui viendrait potentiellement les endommager par un échauffement excessif. Ce risque est associé à la transition vers un régime de transfert en ébullition en film, cette transition correspondant ici à une crise d'ébullition dite par caléfaction. La crise d'ébullition est un phénomène correspondant à une limite haute du flux thermique pouvant être échangé entre une paroi et un écoulement dans le régime d'ébullition nucléée (ici convective et sous-refroidie), cette valeur du flux étant appelée flux critique (CHF : critical heat flux).

Le risque de caléfaction est couvert par la réalisation d'essais réalisés sur des grappes (le plus souvent un réseau 5x5 de crayons maintenus par des grilles d'assemblage avec ailettes de mélange). Ainsi chaque fournisseur de combustible réalise des essais de performance de ses produits et en déduit des corrélations utilisées dans la démonstration de sûreté. Dans ces corrélations, le flux critique est déterminé pour des valeurs des paramètres suivants de l'écoulement : pression, débit, titre thermodynamique. Des codes de calcul sont alors utilisés pour vérifier que les conditions de fonctionnement normal et incidentel du réacteur ne mènent pas au phénomène. Cette approche nécessite des essais relativement complexes et coûteux mais indispensables car l'état de l'art des connaissances sur la phénoménologie de la crise d'ébullition par caléfaction ne permet pas d'établir une modélisation physique fiable du flux critique. J'ai contribué, notamment lors de mes travaux de thèse, à l'analyse physique du phénomène. Dans une perspective de modélisation avancée, plusieurs équipes de recherche tentent de développer des méthodes prédictives en se basant sur des simulations numériques du type CFD diphasique moyennee (approche Euler-Euler, modèle à deux vitesses, une pression). Dans le contexte français, ces travaux sont réalisés dans le cadre du développement du logiciel Neptune\_CFD. La prédiction des conditions d'occurrence de la crise d'ébullition nécessite alors la modélisation de l'ébullition nucléée convective sous-refroidie dont le phénomène est la limite en flux avant la transition vers l'ébullition en film. Dans ce contexte, j'ai participé au développement de la fiabilité de cette modélisation via l'interprétation d'essais réalisés au CEA Grenoble (boucle DEBORA) avec des fluides simulants et j'ai contribué à l'évolution

de la modélisation de la dynamique des bulles en me focalisant notamment sur la prédiction de l'aire interfaciale volumique au sein de l'écoulement.

**Perte de réfrigérant primaire** Le scénario accidentel dit de perte de réfrigérant primaire (APRP, Loss Of Coolant Accident, LOCA) concerne une perte supposée de l'intégrité de la seconde barrière (rupture de tuyauterie primaire) amenant à l'écoulement du réfrigérant à travers une brèche et à une baisse de la pression au sein du cœur. Ainsi, l'eau se vaporise au niveau des assemblages combustible, ce qui peut amener à un découverture partiel de leur paroi. Même si les systèmes de sécurité permettent une réduction importante de la puissance à évacuer, cette dernière reste suffisamment conséquente pour nécessiter un maintien du refroidissement. Les transferts thermiques dégradés de la zone asséchée ont pour conséquence de solliciter thermiquement et mécaniquement le gainage des éléments combustible qui notamment se déforment en gonflant, ce qui vient boucher partiellement la section de passage du fluide. Un enjeu de sûreté est ainsi de s'assurer que cette sollicitation n'amène pas à une dégradation avancée de cette barrière de confinement et que l'injection d'eau par les systèmes auxiliaires de sûreté permet de les refroidir efficacement c.-à-d. notamment de ne pas atteindre un niveau critique de température du gainage correspondant à une oxydation exothermique de ses matériaux.

L'intensité des transferts de chaleur entre des crayons déformés et un écoulement de vapeur chargé en gouttes est un élément clé de l'évaluation de ce risque. Si plusieurs éléments de connaissance ont pu être apportés par des essais simulant la capacité de renoyage d'assemblages combustibles, certaines spécificités, notamment liées à la déformation des crayons, n'ont pas été à ce jour convenablement prises en compte dans ces essais, [Grandjean \(2007\)](#).

Depuis 2007, j'ai participé à l'élaboration, au suivi et à la réalisation d'actions de recherche sur cette thématique. Depuis 2012, j'ai également pris part aux réflexions associées à l'analyse d'une nouvelle méthodologie de calcul mise en place par EDF afin d'estimer le risque associé aux transitoires d'APRP, [Boutin et Graff \(2015\)](#).

Le programme de recherche concerne notamment le développement d'une modélisation mécaniste des différentes contributions des transferts de chaleur entre la paroi des crayons et l'écoulement dans la zone en aval du front de trempe pour laquelle on doit considérer un écoulement de vapeur portant des gouttelettes. On cherche alors à modéliser au sein d'outils de calcul scientifique de type CFD (en l'occurrence le logiciel Neptune\_CFD) la dynamique des gouttes et les transferts de chaleur et de masse. Plusieurs travaux sont présentés dans ce mémoire. Les travaux concernent ainsi des thèses ayant eu pour sujet :

- la chaleur extraite par l'impact d'une goutte isolée sur une paroi chaude en fonction de la taille de la goutte, de sa vitesse et de son angle d'impact ;
- les transferts radiatifs entre la paroi, la vapeur et les gouttes ;
- le flux de chaleur extrait à une paroi chauffée par un écoulement de gouttes et de vapeur canalisé,
- la répartition spatiale des gouttes au sein de l'écoulement vapeur.

Les trois premiers sujets ont été abordés par des études mêlant expériences et modélisation en collaboration avec le laboratoire LEMTA de Nancy, tandis que le dernier a fait l'objet de travaux théoriques et de simulations numériques en collaboration avec le laboratoire PROMES de Perpignan. L'ensemble de ces travaux a mené à des implémentations de modèles et des études (notamment via des stages de master et un contrat d'accueil de collaborateur étranger), certains ayant été réalisés dans le cadre de projets financés par la communauté européenne (NURISP et NURESAFE). Les travaux ont été continués dans le cadre du projet PERFROI financé par l'ANR auquel j'ai apporté un soutien technique au sein de l'IRSN. Ils font également l'objet d'échanges techniques avec les chercheurs d'EDF Lab Chatou qui développent le logiciel Neptune\_CFD et intègrent actuellement ces travaux.

### **Pic de puissance associé à un transitoire de réactivité du cœur**

**Le RIA - échauffement de la gaine** L'accident RIA (Reactivity Initiated Accident) est un accident dit de dimensionnement qui considère un scénario de perte de contrôle de la réactivité du réacteur. Le scénario le plus sollicitant pour les réacteurs à eau pressurisée concerne l'éjection d'une grappe de contrôle ce qui cause une augmentation soudaine et localisée de la puissance déposée dans le combustible nucléaire. L'augmentation de température associée, par effet Doppler, vient interrompre le pic de puissance. Mais l'énergie déposée est suffisante pour que le combustible se dilate et sollicite mécaniquement la gaine, ce qui constitue un premier risque de rupture. Quelques instants plus tard, la gaine du crayon est échauffée très rapidement par contact avec le combustible, jusqu'à plusieurs centaines de degrés par seconde. Cet échauffement peut alors déclencher l'ébullition de l'eau du circuit



primaire, voire assécher temporairement la paroi de la gaine. Dans cette dernière éventualité, les transferts de chaleur vers l'eau sont dégradés et la gaine, atteignant des températures élevées, peut à nouveau rompre. Les études passées ont montré que les transferts de chaleur dans ces conditions d'échauffement rapide ne peuvent pas être décrits par les lois usuelles déterminant l'intensité du flux de chaleur pour les différents régimes d'ébullition ainsi que les critères de transition de régime d'ébullition. Peu de données existent pour comprendre cet effet. J'ai donc contribué à l'élaboration d'un programme de recherche visant à améliorer la connaissance de cet effet de l'échauffement rapide d'une paroi sur les transferts de chaleur par ébullition dans des conditions d'écoulement convectif sous-refroidi (qui caractérisent le scénario accidentel).

L'échauffement rapide de la paroi induit une modification d'une condition qui caractérise classiquement les transferts de chaleur en ébullition (l'écart à la saturation de la température de paroi) sur des échelles de temps relativement courtes par rapport à celle des mécanismes sous-jacents à ces transferts (développement des couches limites, des poches de vapeur). On comprend donc intuitivement l'impact du paramètre de la vitesse d'échauffement sur l'intensité du transfert instantané. Néanmoins, malgré plusieurs expériences remarquables, notamment par l'équipe de Sakurai, la compréhension de la phénoménologie particulière à ces conditions très transitoires reste très limitée. Ce constat a guidé l'élaboration du programme de recherche en collaboration avec l'équipe Interface de l'IMFT (notamment C. Colin et J. Sebilliau) selon deux axes :

- la caractérisation expérimentale du phénomène, ce qui nécessite la capacité de le reproduire en laboratoire mais également d'adapter la finesse de l'instrumentation à des phénomènes à la fois rapides et localisés ;
- le développement d'un canevas de modélisation de phénomènes transitoires, ce qui implique à la fois la définition d'un "vocabulaire" ad-hoc pour représenter les données et la généralisation de l'écriture des lois d'échanges de chaleur, classiquement dédiées à la description de situations établies.

Après une dizaine d'années d'activités dans ce domaine, structurées par la succession de trois thèses, le bilan est le suivant :

- il a été montré que les phénomènes transitoires observés dans les études passées pouvaient être reproduits dans des conditions de laboratoire relativement moins contraignantes ;
- la combinaison de techniques avancées de mesure non intrusives (caméra infra-rouge et rapide notamment) avec un contrôle élaboré des conditions d'essai (protocole de préparation de la section d'essai, PID du système de chauffe) a permis de disposer d'un banc expérimental pouvant caractériser finement les principaux phénomènes associés au transfert de chaleur transitoire, et ce pour l'intégralité des phases (de la convection à l'ébullition en film) ;
- la dynamique de relaxation du transfert de chaleur lors d'un transitoire correspondant à un échauffement rapide a été mise en évidence et reliée aux principaux paramètres de contrôle.

Je tiens à souligner l'importance de pouvoir conduire ces travaux dans une continuité sur le long terme pour permettre de développer des résultats et de l'expertise.

Par ailleurs, l'IRSN mène le programme de recherche international CIP ([CABRI International Program sur le site de l'OCDE](#)) dont une des finalités est la réalisation d'essais simulant les conditions d'un accident de type RIA sur le réacteur d'essai CABRI de Cadarache, [Biard et coll. \(2020\)](#). Ces essais concernent un tronçon de crayon de combustible ayant séjourné en réacteur de puissance et qui est inséré dans une capsule d'essai reproduisant les conditions de l'écoulement au sein d'un cœur, notamment en terme de débit, pression et température. Le tronçon subit pendant l'essai une excursion de puissance reproduisant celle qu'il subirait lors d'un RIA. Les conditions de certains essais de ce programme sont choisies de sorte que l'ébullition se déclenche sur la paroi du tronçon, ce qui n'a pas pu être étudié jusqu'alors dans des conditions représentatives. L'instrumentation de ces essais est un challenge, notamment du fait des conditions hydrauliques (haute pression, haute température, débit), de l'aspect transitoire (échauffement rapide), de la conception difficile des dispositifs d'essais (dimensions du canal réduites et étanchéité et résistance dictées par des contraintes de sûreté) et de l'environnement rayonnant (pulse de puissance neutronique).

La modélisation d'un accident de RIA dans les études de sûreté visant à assurer l'intégrité de la gaine dans ces conditions est réalisée à l'aide d'outils de calculs scientifiques dit "codes combustible". L'IRSN développe le logiciel SCANAIR à cet effet, [Moal et coll. \(2014\)](#). La modélisation de l'ébullition dans des conditions transitoires a fait l'objet de travaux de mes prédécesseurs sur la base de l'interprétation de plusieurs essais. Néanmoins la validité des simulations du logiciel reste à améliorer, [Georgenthum et coll. \(2014\)](#). J'ai co-encadré des travaux de stage visant à intégrer dans le logiciel la modélisation des tables de Groeneveld et d'étudier les conséquences de cette modification de la modélisation sur (i) la

base de validation du logiciel et (ii) sur les calculs type des études de sûreté.

Au niveau international, plusieurs codes combustible permettent une simulation de ces situations. Dans le cadre des activités de l'OCDE (CSNI/WGFS), des ateliers permettant aux développeurs et utilisateurs de plusieurs codes d'échanger sur des problématiques de modélisation et la comparaison des résultats lors d'exercices de benchmark. Un des exercices considérait la simulation du déclenchement de l'ébullition suite à un RIA et j'ai été amené à participer à l'exercice d'interprétation des résultats qui se sont avérés très dispersés. Le fruit de ce travail fut la rédaction d'un document de synthèse des connaissances de l'ébullition transitoire appliqués à la thématique du RIA qui dégage également des pistes de travail afin d'améliorer la fiabilité des prédictions du comportement d'un crayon combustible en RIA. Cette synthèse est en cours d'intégration au sein d'une mise à jour du document de référence international sur la thématique dont l'écriture est pilotée par un groupe de travail OCDE.

Enfin, en perspective, j'ai proposé un sujet de thèse IRSN en cotutelle avec l'IMFT et l'Université de Pittsburgh et en collaboration avec l'Idaho National Laboratory, tous trois ayant des compétences et des moyens d'essais complémentaires sur la thématique. Ce sujet, proposé initialement pour la rentrée académique 2020 a dû être décalé du fait de la crise sanitaire.

**Le BORAX** est un accident de réactivité sur un réacteur de recherche<sup>3</sup>. Beaucoup de similarités existent avec le RIA mais quelques différences notables sont à relever. Du point de vue de l'évolution du pic de puissance par rapport à l'insertion de réactivité causant l'accident, on notera un faible poids de l'effet Doppler ou de la dilatation des matériaux sur l'intensité de la puissance. Ainsi, la contre-réactivité est également portée par l'effet modérateur dit de vide correspondant à la vaporisation partielle du réfrigérant. Ainsi, dans ces conditions de transfert thermique bouillant au sein du canal du réfrigérant, outre l'intensité du transfert de chaleur, il est tout aussi déterminant pour l'étude de l'accident de prédire le transfert de masse liquide/vapeur. Du point de vue de l'évolution de l'accident, les matériaux de l'assemblage combustible sont le plus souvent des alliages à base d'aluminium. Ainsi, pour les élévations de température considérées, on doit considérer l'éventuelle fusion du gainage ce qui génère un risque d'explosion vapeur (cf. le paragraphe suivant).

Depuis une dizaine d'années, j'ai été amené à étudier cet accident via l'examen à des fins d'expertise technique du dossier de sûreté du réacteur RJH en cours de réalisation par le CEA sur le centre de Cadarache. Sans avoir mené d'actions de recherche sur la thématique, j'ai apporté mon expertise acquise notamment du fait de mes travaux sur le RIA.

**Interaction combustible-réfrigérant** Ce phénomène concerne, avec des intensités variables, plusieurs scénarios accidentels. Il correspond à la mise en contact de combustible à haute température et avec une grande surface de contact avec l'eau du circuit primaire. Ce contact induit un intense transfert de chaleur qui est à l'origine d'une évaporation explosive avec génération de pic de pression et mise en mouvement violente des fluides environnant. Son étude est motivée par la nécessaire évaluation des risques d'endommagement des structures alentour.

Dans certains scénarios, le combustible est initialement sous forme liquide (RIA à très haute énergie déposée-hors du domaine d'étude accidentel, accident grave avec fusion du combustible, BORAX). Dans ce cas, la phénoménologie comporte une première phase associée à une évaporation intense : sous l'effet du cisaillement induit par l'écoulement du réfrigérant autour de la coulée de combustible, ce dernier est fragmenté progressivement en gouttelettes. Cette fragmentation augmente notablement la surface d'échange et par là même l'intensité des transferts de chaleur et de masse, générant le risque d'explosion vapeur. Mes travaux sur ce type de phénoménologie se sont limités à mon stage de DEA au CEA qui portait sur le calcul de l'expérience FARO à l'aide du logiciel MC3D, logiciel dédié à l'explosion vapeur toujours en développement à l'IRSN.

Un scénario plus spécifique correspond à la conséquence de la rupture d'un crayon combustible lors d'un RIA. Si cette hypothèse n'est pas considérée dans les études de sûreté portant sur des crayons standards du parc électro-nucléaire français, il reste d'intérêt pour deux problématiques de sûreté :

- il n'est pas possible d'exclure totalement la présence de crayons défectueux au sein du cœur, même si leur nombre est très réduit. Parmi les défauts, on considère notamment les crayons ayant une perte d'étanchéité. La présence d'eau au sein du crayon mène à une phénoménologie particulière lors du transitoire de type RIA : le transfert d'énergie du combustible vers cette eau entraîne une forte pressurisation interne à même de déformer et rompre la gaine, puis à éjecter

3. Le principe du type de réacteur de recherche concerné par le BORAX est relativement similaire aux réacteurs de production : génération d'énergie par fission au sein d'éléments combustible et transport de la puissance par fluide caloporteur. Néanmoins leur design et les matériaux peuvent être très différents.



violemment le combustible. Ce dernier, du fait de son irradiation de base en réacteur mais probablement également du fait du transitoire de puissance est alors fragmenté en fines particules (les plus fines étant de l'ordre de quelques microns). Dans cette configuration, le combustible solide a ainsi une grande surface de contact avec le réfrigérant et des essais en réacteur ont montré qu'on observait conséquemment des pics de pression et une mise en mouvement violente du fluide environnant;

- dans l'évaluation de sûreté des dispositifs d'essais du réacteur CABRI portant sur l'étude des conséquences d'un RIA sur un crayon combustible, il est nécessaire d'envisager la rupture de ce dernier (qui est l'objectif de certains essais du programme CIP en cours de réalisation). La tenue mécanique du dispositif est alors à assurer pour des raisons de sûreté. Enfin et surtout, l'interprétation des résultats de ces mêmes essais a pour objectif de mieux comprendre la phénoménologie d'interaction-combustible réfrigérant lors d'un RIA.

Ainsi, pour le premier sujet, j'ai été amené à expertiser le dossier d'EDF dans le cadre de l'instruction dite du Groupe Permanent "critères". J'ai ainsi porté une recommandation sur la thématique devant cette instance et les réponses d'EDF sur ce sujet sont actuellement à l'étude. Pour le second sujet, je suis en charge de plusieurs actions parmi lesquelles :

- contribution aux essais via la définition des objectifs, le suivi de la préparation, l'interprétation, et la définition des examens post-essais;
- développement de l'outil de calcul scientifique IRSN CIGALON utilisé pour les études de sûreté des dispositifs d'essai dans le réacteur CABRI et pour l'interprétation des essais;
- définition et mise en œuvre d'un programme de recherche d'acquisition de connaissances sur la thématique.

La démarche de ce programme de recherche est présentée dans la section suivante.

**La part des choses** L'analyse des essais ayant donné lieu à une interaction permet clairement de mettre en évidence deux phénomènes typiques consécutifs à la rupture de la gaine :

- un ou plusieurs pics de pression au sein du dispositif;
- un déplacement important du liquide environnant la zone rompue.

Par ailleurs, dans ces essais, on retrouve à la fin du transitoire une quantité relativement importante de fragments de combustible hors du crayon. On a pu également mesurer sur les crayons non rompus voisins d'un crayon rompu un échauffement plus important (qu'en l'absence d'un tel voisinage), [Tanzawa et Fujishiro \(1987\)](#). Ainsi il en ressort que l'éjection de combustible hors du crayon induit une vaporisation plus importante du réfrigérant que dans le cas où cette chaleur est évacuée par des échanges à travers une gaine non rompue. Cette vaporisation induit une expansion locale du fluide qui déplace le liquide environnant. La poche de vapeur ainsi créée peut assécher temporairement les crayons voisins, dégradant de ce fait les transferts thermiques. L'intensité de ce phénomène est corrélée à la surface d'échange du combustible éjecté in fine. La relation entre l'intensité du pic de pression et les conditions de l'interaction est difficile à déterminer car l'interaction est à la fois une éjection, un transfert de chaleur et un transfert de masse. J'ai ainsi défini un programme de recherche visant à améliorer la connaissance de deux phénomènes contribuant à la pressurisation induite par le transfert de chaleur entre particules et fluide :

- le premier axe de recherche concerne ainsi la détermination de la cinétique de mise en contact de particules avec un fluide et a mené à une collaboration avec l'équipe granulaire de l'IUSTI (2013-2020),
- le second axe de recherche concerne la détermination de la cinétique de vaporisation violente d'un fluide en contact avec une masse donnée d'un corps chaud et a mené à une collaboration avec le CETHIL (2014-2021).

In fine, la modélisation de l'ensemble des phénomènes dans une approche de simulation numérique plus avancée que le logiciel CIGALON fait le sujet d'une thèse proposée pour la rentrée académique prochaine<sup>4</sup> avec la collaboration de l'IMSIA.

**Perte de refroidissement des piscines d'entreposage** Les piscines d'entreposage sont des bassins accueillant le combustible à sa sortie du réacteur et avant qu'il ne soit transféré vers des sites de stockage ou de retraitement. La puissance résiduelle de chaque assemblage est relativement faible mais la puissance totale peut atteindre plusieurs MW. L'accident de Fukushima Daïchii a illustré que, en situation accidentelle, une perte de la capacité de refroidissement des piscines représentait un risque important :

4. finalement reportée

une fois découverts de l'eau, les assemblages combustible peuvent s'échauffer et se dégrader fortement et le confinement de la matière fissile n'est plus assuré.

Dans le cadre des projets financés par l'ANR post-Fukushima, l'IRSN a lancé le programme DENOPI, [Martin et coll. \(2017a\)](#), pour lequel plusieurs installations expérimentales axées sur la thermohydraulique ont été réalisées. J'ai participé notamment aux réflexions préliminaires concernant le concept général de l'expérience MIDI dont les premiers essais sont programmés pour 2021. Sur cette même thématique, j'ai également contribué à l'analyse de dossier à expertiser par l'IRSN, [IRSN \(2018\)](#).

Enfin, en complément des travaux d'expérimentation à grande échelle du programme DENOPI, j'ai participé au développement d'une étude expérimentale plus analytique permettant de mieux caractériser les conditions de nucléation dans un bassin. Ces travaux sont décrits dans la section [4.2.1](#) et font l'objet d'une thèse en cours dont je suis le tuteur IRSN et en collaboration avec l'UCL.

**Autres accidents** Enfin, en tant que référent de l'activité thermohydraulique du laboratoire, je suis amené à apporter mon expertise pour une série de sujets tels que :

- l'efficacité des systèmes passifs ;
- le risque de rupture par vibration des tubes des générateurs de vapeur ;
- les conséquences d'un passage en ébullition en film des crayons combustible dans les premières phases d'un transitoire accidentel par rapport à une seconde sollicitation en puissance au cours de ce même transitoire ;
- le temps de chute des grappes de contrôle au sein du cœur.

### 3 Dynamique des écoulements particulaires

La dynamique des particules au sein d'un écoulement principal formé par un fluide continu est par principe la combinaison du mouvement individuel de chacun des éléments constituant la population suivie. On peut néanmoins envisager que la dynamique de la population suit un mouvement d'ensemble qui peut être décrit à partir d'une approche plus macroscopique, et que son écoulement, que l'on peut définir à l'aide d'approches statistiques, est lui même régi par des lois relativement similaires à celle d'un fluide aux propriétés particulières (parce que particulaire).

On introduira dans un premier temps la description d'un écoulement à partir des équations de bilan de population, en présentant les travaux relatifs à la modélisation de la polydispersion en taille des écoulements à bulles, puis à gouttes. On s'intéressera alors à la description des lois phénoménologiques permettant de décrire les déplacements des particules dans le sens transverse à l'écoulement principal (loi de portance) dans une telle modélisation fluide. Enfin, on exhibera certaines propriétés des écoulements granulaires denses couplés avec une dynamique de détente d'un gaz et on discutera de leur modélisation.

#### 3.1 Moyenne d'ensemble et bilan de quantité de mouvement d'une population

##### 3.1.1 Contexte de ces travaux

Les travaux réalisés ont été menés principalement lors de mon post-doctorat à l'IRSN (2006-2008) en collaboration avec N. Seiler-Marie, en relation avec C. Colin de l'IMFT, Ch. Morel du CEA et E. Krepper et D. Lucas d'HZDR. Ils ont mené à diverses publications pour présenter le développement de la méthode, la comparer à des données expérimentales et à d'autres méthodes de prise en compte de la polydispersion, l'appliquer à des cas d'études (Mimouni et coll. (2017b)).

##### 3.1.2 Développement d'une approche prenant en compte une dispersion en taille

La description statistique d'une population de particules permet d'introduire des lois de distribution des différentes propriétés individuelles des même particules, au titre desquelles, pour les écoulements qui nous intéressent, on retient la vitesse, le taux de présence (fraction volumique) et la taille caractéristique. Cette taille caractéristique est un élément déterminant pour les transferts interfaciaux de chaleur et de quantité de mouvement : elle intervient au premier ordre dans la surface de contact (l'aire interfaciale) et de nombreuses corrélations prédisent également que l'intensité des transferts dépend fortement de cette taille.

Dans de nombreuses configurations d'écoulement il n'est pas possible de donner une valeur a priori de cette taille des particules, de nombreux phénomènes venant modifier cette taille le long de la trajectoire de la particule (compressibilité, transfert de masse, coalescence, rupture... ). Les travaux décrits ci-après permettent d'établir la base théorique des équations permettant de décrire l'évolution des propriétés d'une population de particules.

**Les équations de transport des moments** On introduit tout d'abord l'équation de transport de la distribution  $F$  décrivant les statistiques des propriétés de la population. On notera  $\underline{d}/dt$  la dérivée particulaire associée à la description fine de la phase dispersée (le long de la trajectoire d'une bulle) et  $\vec{\xi} = \xi_i \vec{e}_i$  le vecteur des coordonnées de l'espace des phases, soit dans notre cas  $\vec{\xi} = (\vec{x}, t, d, \vec{w})$ . On note  $\nabla_{\vec{\xi}} = \frac{\partial}{\partial \xi_i} \vec{e}_i$ . L'équation cinétique suivante

$$\nabla_{\vec{\xi}} \cdot \left( \frac{\underline{d}\vec{\xi}}{dt} F \right) = \dot{F} \quad (1)$$

dite de Liouville ou de Williams (dans le contexte des sprays), est une équation de transport de type Boltzmann décrivant l'évolution de la distribution statistique de particules dans un fluide. Les événements de création (nucléation, fragmentation)/disparition (coalescence, collapse) des particules sont modélisés par le terme  $\dot{F}$  tandis que les évolutions de la distribution par le transport des particules, les variations de taille et de vitesse le long de la trajectoire sont décrites par les composantes du vecteur  $\underline{d}\vec{\xi}/dt$ .

Nous introduisons alors différentes moyennes sur la population :

— les valeurs moyennes d'une quantité  $\psi$  pondérée par une quantité  $Y$  (résultat homogène à  $\psi$ )

$$\langle \psi \rangle_Y \hat{=} \frac{\int_{\Omega_{int}} F \psi Y \partial d \prod_i \partial w_i}{\int_{\Omega_{int}} F Y \partial d \prod_i \partial w_i}; \quad (2)$$

— les grandeurs volumiques  $\mu_\psi$  (résultat homogène à une densité de  $\psi$ )

$$\mu_\psi(\vec{x}, t) \hat{=} n \langle \psi \rangle_1 = \int_{\Omega_{int}} F \psi \partial d \prod_i \partial w_i. \quad (3)$$

Quand  $\psi$  vaut  $d$  à la puissance  $\gamma$ ,  $\mu_{d^\gamma}$  est le moment statistique, autour de zéro, d'ordre  $\gamma$  en taille de la distribution.

À partir de l'équation de Liouville (1), on peut déduire que le transport de toute quantité scalaire  $\mu_\psi$  (c.-à-d. telle que  $\psi$  soit un scalaire) obéit à une équation dite d'Enskog (Simonin (1996)) qui s'écrit

$$\frac{\partial \mu_\psi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mu_\psi \langle \vec{w} \rangle_\psi) = n \left\langle \nabla_{\vec{\xi}} \psi \cdot \left( \frac{d \vec{\xi}}{dt} \right) \right\rangle_1 + \underbrace{\int_{\Omega_{int}} \dot{F} \psi \partial \xi_{int, i}}_{\dot{\mu}_\psi} \quad (4)$$

La vitesse de transport  $\langle \vec{w} \rangle_\psi$  n'est pas *a priori* la vitesse de transport de la phase dispersée  $\vec{v}_{disp}$ .

Les grandeurs moyennes classiques de description d'un écoulement de particules sphériques, la fraction volumique de la phase dispersée,  $\alpha$ , sa vitesse de transport moyenne (de son centre de masse)  $\vec{v}_{disp}$  et l'aire interfaciale volumique  $a_i$ , sont des moments particuliers de la distribution :

$$\alpha = \frac{\pi \mu_{d^3}}{6} \quad (5)$$

$$\vec{v}_{disp} = \langle \vec{w} \rangle_{d^3} \quad (6)$$

$$a_i = \pi \mu_{d^2} \quad (7)$$

En retenant ces trois variables principales comme descripteurs de l'écoulement, l'évolution des propriétés de la population s'écrit ainsi :

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (a_i \langle \vec{w} \rangle_{d^2}) = n \left\langle 2\pi d \frac{d d}{dt} \right\rangle_1 + \int_{\Omega_{int}} \dot{F} \pi d^2 \partial d \prod_i \partial w_i \quad (8a)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \langle \vec{w} \rangle_{d^3}) = n \left\langle \frac{\pi d^2}{2} \frac{d d}{dt} \right\rangle_1 + \int_{\Omega_{int}} \dot{F} \frac{\pi d^3}{6} \partial d \prod_i \partial w_i \quad (8b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha \langle \vec{w} \rangle_{d^3}}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \langle \vec{w} \rangle_{d^3} \langle \vec{w} \rangle_{d^3}) &= n \left\langle \frac{\pi d^3}{6} \frac{d \vec{w}}{dt} \right\rangle_1 + n \left\langle \frac{\pi d^2}{2} \vec{w} \frac{d d}{dt} \right\rangle_1 \\ &+ \int_{\Omega_{int}} \dot{F} \frac{\pi d^3}{6} \vec{w} \partial d \prod_i \partial w_i - \nabla \cdot (\langle \langle \vec{w}' \vec{w}' \rangle \rangle_{d^3}) \end{aligned} \quad (8c)$$

où  $n = \mu_{d^0}$  est la densité de nombre de particules et  $\vec{w}'$  est la fluctuation de la vitesse d'une particule par rapport à la vitesse  $\vec{v}_{disp}$  qui apparaît dans le tenseur cinétique.

Les équations de transport de ce système d'équation ont pour membre de gauche les expressions des équations bilan générales d'une modélisation moyennée d'un écoulement diphasique et, pour membre de droite les expressions particulières associées à la description d'un écoulement dispersé.

La détermination de la formulation explicite des termes des membres de droite requiert notamment une modélisation des évolutions de  $d$  et  $\vec{w}$  le long des trajectoires des particules ainsi que la modélisation de la fonction de distribution  $F$  elle-même.

### 3.2 Une fermeture particulière pour les écoulements à bulles

**Loi de distribution idéalisée** Nos travaux ont notamment porté sur ce dernier point. Le nombre de degrés de liberté dans la paramétrisation de la fonction de distribution  $F$  correspond à la complexité nécessaire à la description de l'écoulement. La détermination de l'évolution de ces paramètres s'exprime

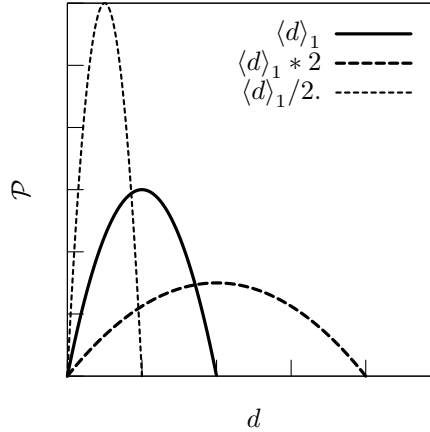


FIGURE 1 – Distribution en taille au sein d'un écoulement à bulles idéalisé par une loi quadratique pour différentes valeurs du diamètre moyen  $\langle d \rangle_1$

par autant d'équations de transport (dans le cas présent on représente la distribution par 3 paramètres :  $\alpha$ ,  $\vec{v}_{disp}$  et  $a_i$ ). Nous avons alors proposé une allure simple et facilement paramétrisable de la fonction de distribution en taille (on ne considère pas ici de distribution en vitesse corrélée à la distribution en taille, ce qui pourrait être nécessaire pour certains écoulements) comme une loi quadratique :

$$f(\vec{x}, t, d) \hat{=} \iiint F(\vec{x}, t, d, \vec{w}) \prod_i \partial w_i \hat{=} \begin{cases} \frac{3n(\vec{x}, t) d}{4 \langle d \rangle_1^3(\vec{x}, t)} (2 \langle d \rangle_1(\vec{x}, t) - d) & \text{si } d \leq 2 \langle d \rangle_1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (9)$$

Remarque :  $\langle d \rangle_1 = d_{1,0}$  est la moyenne arithmétique du diamètre, mais aussi dans le cas particulier de cette loi, le diamètre le plus probable et le diamètre médian. Cette loi est illustrée sur la figure 1. Les différents avantages théoriques de la loi choisie sont :

- son support borné (pas de divergence des termes sources pour les inclusions de taille infinie);
- la simplicité des relations moments-paramètres;
- l'existence d'une valeur maximale et l'annulation de la p.d.f. pour les bulles de taille nulle.

Ces avantages permettent une intégration aisée des différentes modélisations de fermeture des phénomènes affectant la distribution en taille de la population de bulles (en l'occurrence les phénomènes de coalescence, rupture et les forces de traînée et de portance) dans la formulation des équations de transport résolues. Les limites de cette loi de distribution relativement arbitraire résident notamment dans :

- son incapacité à avoir une distribution nulle sur un intervalle de taille  $[0 : d_{min}]$ ;
- la relation forcée liant diamètre médian et écart type.

**Relations phénoménologiques le long de la trajectoire de la particule** Le choix des relations décrivant les différents phénomènes physiques affectant les particules achève de déterminer la formulation des membres de droite du système d'équations 8. Pour les cas particuliers d'écoulements adiabatiques de bulles qui nous ont intéressé, nous avons ainsi considéré les choix suivants : la traînée a été modélisée par la corrélation de [Ishii et Zuber \(1979\)](#), la force de portance par la corrélation de [Tomiyama et coll. \(1995\)](#), la coalescence et la fragmentation par les modèles de [Prince et Blanch \(1990\)](#). Les autres contributions (force de paroi, masse ajoutée, force de dispersion turbulente et tenseur cinétique) ne sont pas affectées par la distribution particulière de la distribution en taille et on conserve les formulations retenues par [Morel et coll. \(2003\)](#). Le détail des formulations et calculs est rédigé dans [Ruyer et coll. \(2007b\)](#); [Ruyer \(2008\)](#).

Des travaux complémentaires ont été entrepris pour étendre cette approche aux écoulements bouillants (ajout d'une équation de transport pour l'enthalpie moyenne de la phase dispersée avec prise en compte de l'ensemble des phénomènes de compressibilité, thermique et changement de phase). Ils sont décrits dans [Seiler et Ruyer \(2008a\)](#); [Ruyer et Seiler-Marie \(2009\)](#).

**Simulation numérique d'écoulements à bulles adiabatiques en conduite verticale** La validité des développements théoriques (en particulier le bien-fondé du choix relativement arbitraire de la fonction

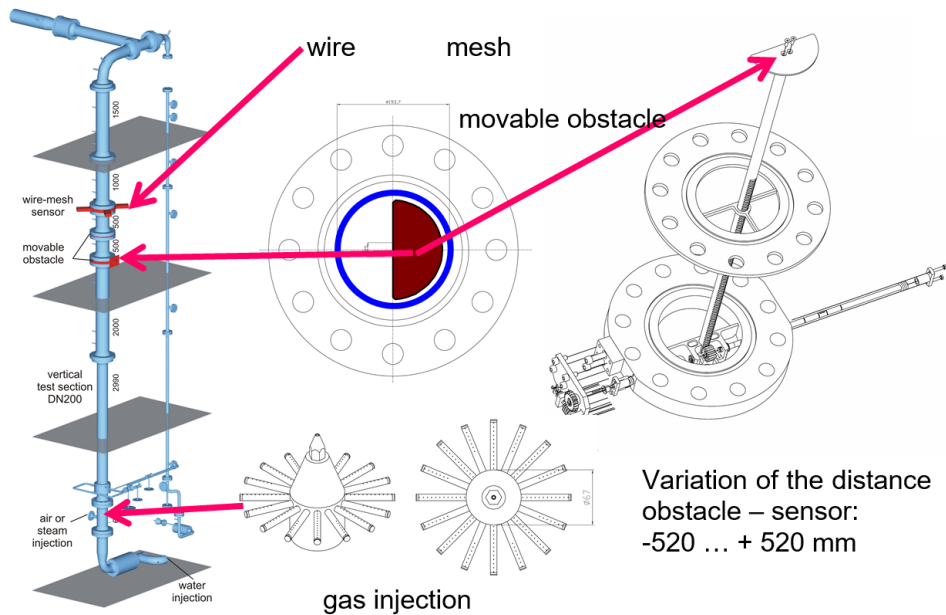


FIGURE 2 – Schéma de principe de l'installation TOPFLOW avec obstacle.

de distribution en taille) se mesure par la comparaison des résultats obtenus avec la résolution numérique du modèle à des résultats expérimentaux. Nous discuterons des performances de cette approche par rapport à des cas d'écoulements bouillants dans la section 4.3 et nous limitons dans cette section aux cas d'écoulements adiabatiques.

Nos travaux ont porté sur différentes séries d'expériences et ont débuté par l'étude du cas d'écoulement à bulles ascendant dans une conduite verticale cylindrique de diamètre interne 200mm et au sein de laquelle un obstacle en forme de demi-lune obstrue localement la moitié de la conduite tel qu'illustré sur la figure 2. La mesure des propriétés de la population de bulles est réalisée à l'aide d'un "wire-mesh sensor". Ce capteur est constitué d'un réseau de fils croisés et mesure un signal électrique faible les traversant. Le principe repose sur la différence de signal suivant la longueur mouillée de chaque fil. Un traitement avancé du signal permet alors d'obtenir des cartographies au travers de l'ensemble de la section de passage des distributions en taille et vitesse des bulles. Les résultats expérimentaux sont illustrés en figure 3.

On observe clairement sur ces illustrations l'effet de l'obstacle : l'écoulement se concentre sur la partie non obstruée (droite sur les schémas) et une accumulation de bulles se forme derrière l'obstacle. Dans cette zone, on observe une zone de recirculation et les bulles piégées coalescent ce qui impacte significativement leur taille, comme illustré figure 4a. Les résultats numériques ont été obtenus à l'aide du logiciel Neptune\_CFD, [Guelfi et coll. \(2007\)](#), au sein duquel a été codé le modèle. Ils permettent de retrouver ces résultats à condition de ne pas prendre en compte la fragmentation qui domine numériquement dans la zone de recirculation, voir figure 4b (remarque : les valeurs relativement élevées des diamètres ne correspondent pas à une zone pour laquelle est prédite une fraction volumique de bulles significative). Cette étude a ainsi permis de mettre en évidence une lacune certaine dans la formulation des phénomènes de fragmentation. Par ailleurs, il a été montré qu'il était important de prendre en compte la dispersion en taille de la population de bulles et son effet sur l'évaluation de la portance agissant sur les bulles pour retrouver ce résultat. En effet, comme illustré sur la figure 4c, ce coefficient varie significativement au sein de l'écoulement (du fait de la variation des tailles de bulles) et change de signe ce qui modifie l'orientation de la portance par rapport à la direction principale du cisaillement de l'écoulement liquide. Ces analyses ont été complétées par plusieurs études d'écoulements obtenus sur d'autres dispositifs expérimentaux et dans d'autres conditions. Elles ont fait également l'objet de comparaison avec des approches alternatives pour la prise en compte d'une polydispersion en taille (parmi lesquelles une approche à p.d.f. à loi imposée - log normale - et des approches de discrétisation de la p.d.f. par classes de taille), [Krepper et coll. \(2011\)](#); [Morel et coll. \(2010\)](#).

**Conclusions - perspectives.** Si la méthode que nous avons proposée a pu avoir des résultats relativement satisfaisants par rapport aux autres, (voir l'illustration de la figure 5), ces travaux ont surtout mis



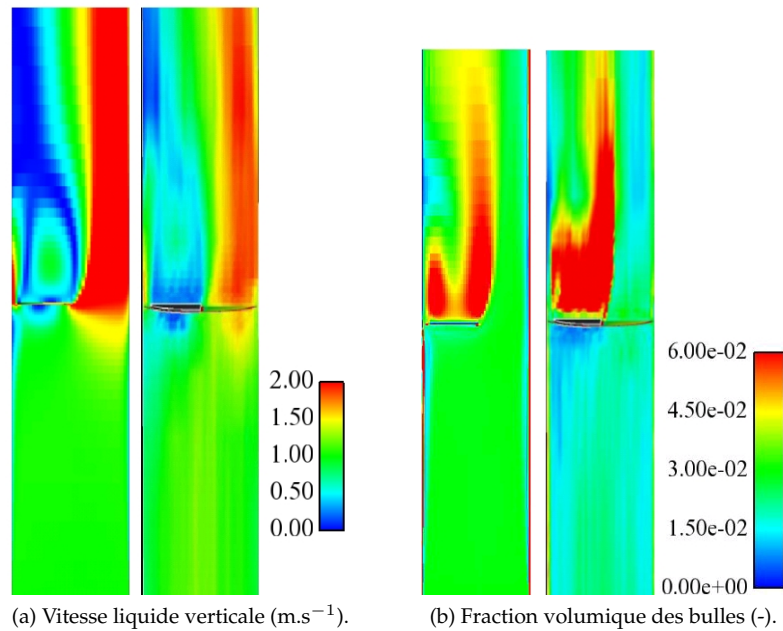


FIGURE 3 – Analyse du cas TOPFLOW avec obstacle n° 074 (vitesses superficielles liquide et gaz :  $J_L = 1.017 \text{ m.s}^{-1}$  et  $J_G = 0.0368 \text{ m.s}^{-1}$ ). Champs représentés le long du plan de symétrie de la conduite, l'obstacle obstrue la partie gauche de la conduite à mi-hauteur de l'image. Pour chaque paire d'images : image de gauche résultat numérique, de droite résultat expérimental.

en évidence une difficulté commune à toutes les méthodes dans la prédiction de l'équilibre entre coalescence et fragmentation dans ces conditions d'écoulement. Il s'avère que la détermination expérimentale des modèles pour ces phénomènes (dont les mécanismes peuvent être multiples) reste un défi pour la communauté. Ainsi, la sophistication trop avancée des modèles de prise en compte de la polydispersion en taille n'apporte clairement pas les éléments les plus pertinents pour progresser dans la qualité de la prédiction de ces écoulements.

Aujourd'hui, le modèle que j'ai développé est retenu comme le modèle par défaut pour la base de validation du logiciel et des études récentes permettent d'évaluer sa qualité, [Mimouni et coll. \(2017b\)](#).

### 3.3 Dispersion latérale de gouttes dans un écoulement cisailé

Dans le contexte de la détermination des transferts thermiques entre les crayons combustibles et les écoulements en aval d'un front de trempe (problématique de la détermination de la température maximale de gaine lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire, voir section 2.2), on s'est intéressé au régime d'écoulement dit à gouttes dispersées. La modélisation de la thermique est présentée plus en détail en section 4.6, mais on comprendra aisément que la répartition spatiale des gouttes dans l'épaisseur du "canal" entre les crayons (distance à la paroi, taux d'impact sur la paroi) agit au premier ordre sur les transferts.

Les travaux de recherche se sont portés sur la modélisation de la dynamique d'un écoulement de gouttes dans une géométrie tubulaire avec un fort écoulement ascendant de vapeur et ont été réalisés dans le cadre de la thèse de [Baalbaki \(2011\)](#) en collaboration avec A. Toutant et F. Daumas Bataille de l'Université Via-Domitia à Perpignan. L'approche numérique retenue correspond à la description moyennée d'un écoulement diphasique à phase dispersée sur la base du modèle à deux vitesses - une pression (approche dite Euler-Euler), la résolution numérique étant réalisée à l'aide du logiciel Neptune\_CFD.

Dans ces configurations d'écoulement, la gamme de taille de gouttes est telle qu'on doit considérer, pour les plus grosses, des nombre de Stokes relativement élevés, soit un comportement inertiel. La modélisation de la traînée ne pose pas de question et leur vitesse verticale dépend donc de leur position latérale dans le canal (étant donné le cisaillement de la phase vapeur). La problématique principale réside donc dans leur répartition radiale dans le tube qui est le résultat de plusieurs contributions :

- la force de portance induite principalement par le cisaillement local de la phase vapeur ;
- la dispersion turbulente induite principalement par l'agitation turbulente de la phase vapeur.

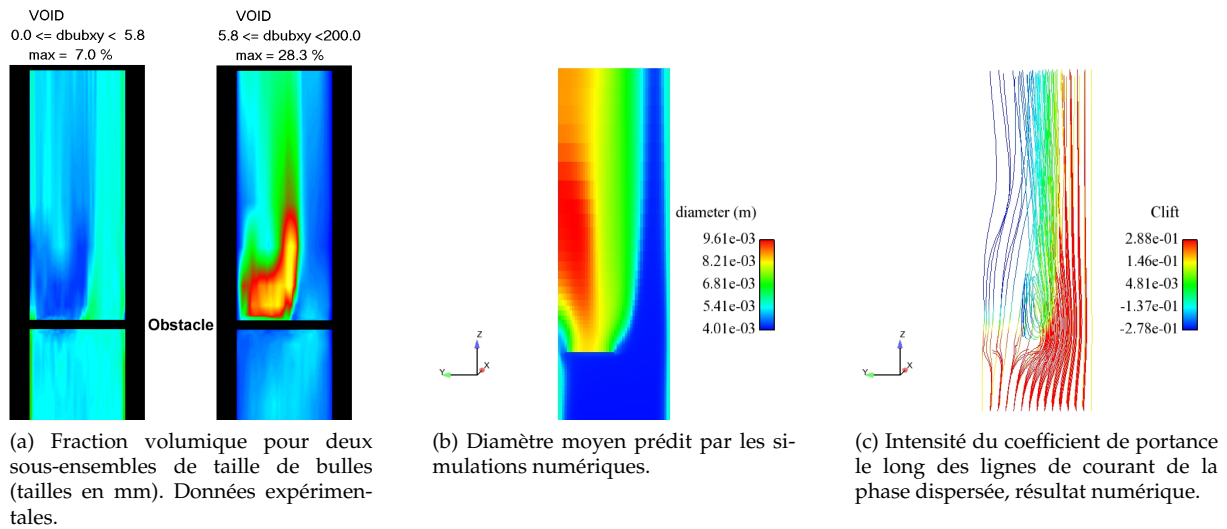


FIGURE 4 – Analyse du cas TOPFLOW avec obstacle n° 074, suite.

Fig. 18: comparison of the spatial averaged IAC

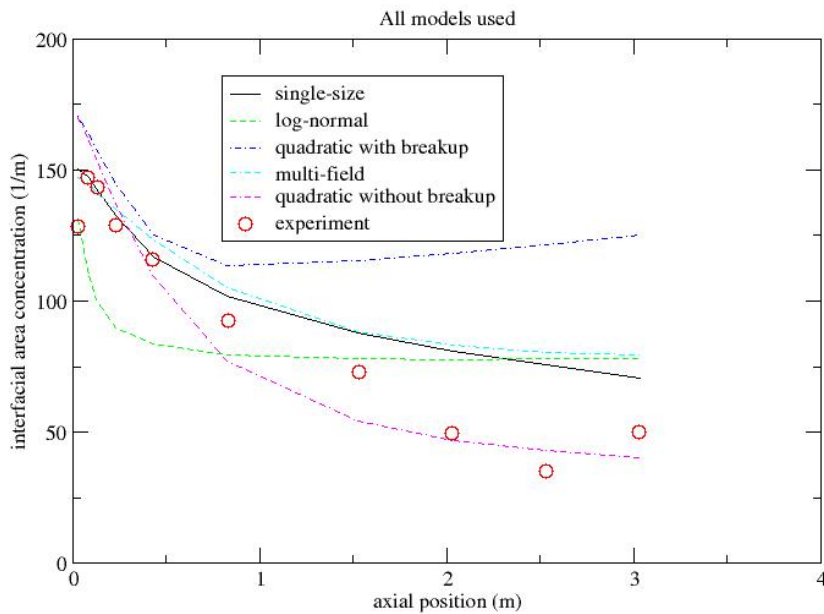


FIGURE 5 – Comparaison de la prédiction de l'évolution axiale de la concentration volumique en aire interfaciale entre les résultats d'une expérience MTLOOP et différentes approches pour prendre en compte la modélisation de la distribution en taille de bulle au sein de l'écoulement, figure extraite de Morel et coll. (2010). Le modèle proposé est indiqué "quadratic".

**Dispersion turbulente** Les gouttes étant relativement inertielles, il existe une échelle de coupure de la taille des tourbillons affectant leur dynamique. Par ailleurs, la dynamique des gouttes affecte elle-même l'agitation de la phase vapeur en "laminarisant" certaines structures traversées. La modélisation de ces phénomènes n'est pas triviale et les approches les plus complètes considèrent des équations de transport des tenseurs des fluctuations de vitesse bâtis sur les vitesses de la phase porteuse, de la phase dispersée et du couplage entre les deux, Simonin (1996). La modélisation des termes de ces équations (production, dissipation) doit alors couvrir des couplages relativement complexes et est insuffisamment déterminée à ce jour. La démarche permettant leur détermination est par exemple l'analyse statistique de calculs Lagrangiens, voir Simonin et coll. (2016). D'autres approches plus simples considèrent par exemple une



Cas	1	2	3	4
Turbulence vapeur	$k-\varepsilon$	$R_{ij}-\varepsilon$	$R_{ij}-\varepsilon$	$R_{ij}-\varepsilon$
Turbulence gouttes	Tchen	$q_2q_{12}$	$q_2q_{12}$	$q_2q_{12}^*$
Portance	Auton	Auton	Baalbaki	Baalbaki
Puissance (W)	12,4	16,4	19,6	27,2

TABLE 1 – Puissance extraite en paroi (température uniforme) par convection vapeur pour un écoulement vapeur-gouttes en fonction des différentes modélisations de la dynamique des gouttes.

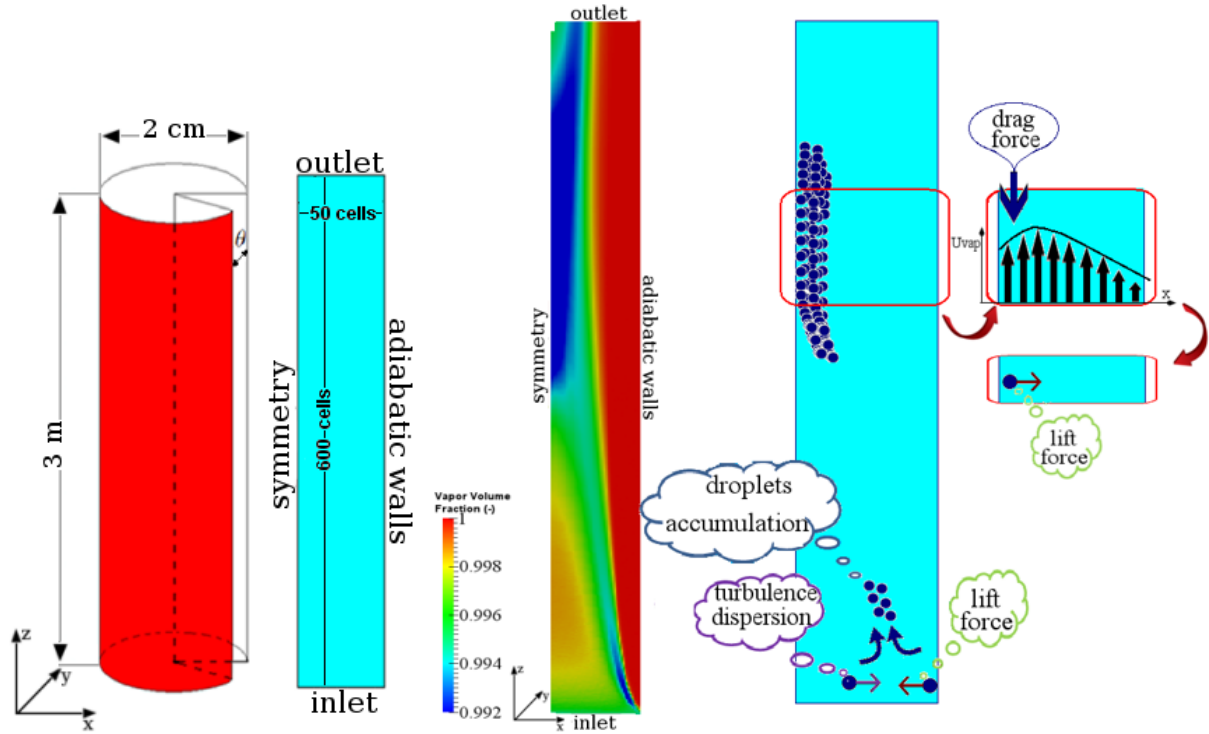
équation de transport isotrope pour la modélisation de l'agitation turbulente de la phase continue (du type  $k-\varepsilon$ ) et d'une équation algébrique à l'instar de celle proposée par Tchen (1947); Deutsch (1992). Pour des particules inertielles, l'utilisation d'un modèle algébrique, c'est à dire ne faisant dépendre l'agitation des particules que de la turbulence locale de la phase continue n'est pas adaptée.

**Portance** La force de portance agissant sur les gouttes est modélisée par un transfert interfacial de quantité de mouvement dans la direction orthogonale au mouvement relatif et dirigée selon le cisaillement de la phase porteuse. Son intensité dépend néanmoins du cisaillement local, du nombre de Reynolds particulaire et de rapport entre la distance à la paroi et la taille de la particule. Sur la base d'une revue bibliographique de travaux de simulation numérique directe, nous avons montré que les formulations usuelles de Saffman (1965) ou Auton (1987) ne permettent pas de rendre compte des résultats. Nous avons alors proposé une corrélation adaptée pour la modélisation Euler-Euler qui a été codée dans le logiciel Neptune\_CFD, Baalbaki et coll. (2013).

**Impact de la modélisation sur la répartition spatiale** Les performances relatives des choix évoqués ci-dessus ont été analysées en se basant sur une confrontation aux résultats expérimentaux de Kulick et coll. (1994), présentée dans Toutant (2013); Baalbaki (2011). Nous avons alors étudié dans quelle mesure la répartition spatiale des gouttes évoluait dans un canal cylindrique en présence d'un écoulement ascendant vertical de vapeur. La taille de ce canal représente un diamètre hydraulique relativement équivalent à celui d'un sous-canal au sein d'un assemblage combustible. Les formulations de portance classiques (Auton ou Saffman) induisent une concentration de gouttes le long de l'axe de symétrie, ce qui, du fait de la traînée, induit un cisaillement de l'écoulement vapeur, et in fine une portance le long de cet axe dirigée vers les parois. Ceci est illustré sur les schémas de la figure 6. Nous avons alors étudié un cas pour lequel la vapeur chaude échange par convection avec une paroi chaude du canal, les gouttes étant à la température de saturation et pouvant donc s'évaporer. Dans ce cas, la répartition spatiale des gouttes dans le canal influe sur le champ de température vapeur et sur la quantité de chaleur extraite par convection. Les données du tableau 1 illustrent que la variation de la répartition spatiale des gouttes (induite par des choix différents de modélisation de la force de portance et de l'agitation turbulente des gouttes) est déterminante pour l'évaluation de la quantité de chaleur extraite. Par ailleurs, nous verrons en section 4.6 que la répartition spatiale des gouttes agit également sur l'intensité des flux radiatifs ainsi que sur la chaleur extraite par leur impact sur la paroi.

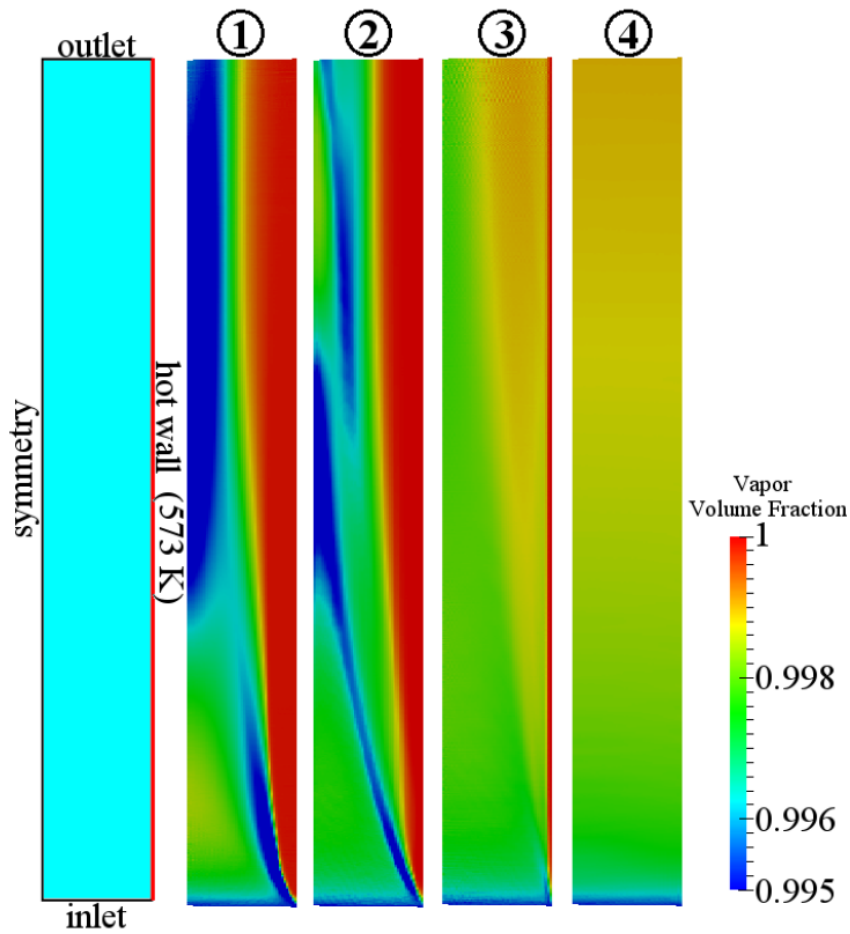
**Déviations induites par la géométrie du canal** Dans la configuration d'intérêt, l'écoulement vapeur gouttes ascendant détermine les températures maximales atteintes par les crayons combustible. Une partie de ces crayons ayant potentiellement ballonné, certains sous-canaux sont partiellement obstrués. Cette obstruction induit une déviation partielle du débit vers des zones moins obstruées : cette déviation est ainsi également déterminante pour l'estimation des transferts. La figure 7 illustre une géométrie élémentaire que nous avons déterminée afin d'évaluer ce type de situation.

Sur cette thématique, j'ai notamment contribué à l'étude de la simulation numérique de la déviation des écoulements lors de travaux de stage (B. Biton, F. Deffayet) et dans le cadre du projet européen NURESAFE, Ruyer (2015). Ces études ont concerné à la fois des comparaisons avec des résultats de la littérature, Fairbairn et Piggott (1984), et une analyse des résultats obtenus par une approche CFD et une approche plus macroscopique (logiciels CATHARE ou CESAR, représentant le domaine fluide à l'aide d'une approche poreuse avec une discrétisation spatiale d'une maille par sous-canal dans le plan perpendiculaire à l'axe principal de ces canaux). Des comparaisons des évolutions axiales des vitesses débitantes dans chaque sous-canal sont reproduites sur la figure 8. Les calculs CFD permettent de retrouver convenablement les répartitions de débit entre canaux et révèlent des spécificités de l'écoulement en aval de la zone ballonnée : l'écoulement vapeur reste relativement concentré dans la zone centrale des



(a) Schéma de principe du domaine de calcul considéré

(b) Représentation schématique des effets combinés des différents transferts interfaciaux de quantité de mouvement



(c) Variabilité de la répartition spatiale des gouttes selon les modélisations retenues

FIGURE 6 – Distribution spatiale des gouttes dans un canal cylindrique.

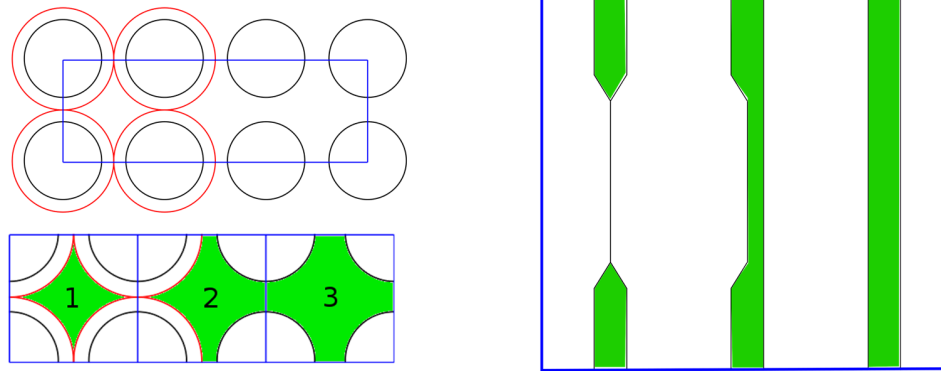


FIGURE 7 – Schéma de principe de la zone modélisée : On considère un ensemble de 2 rangées de 4 cylindres (cracons combustibles) formant un motif à pas carré régulier. Les 4 cylindres de gauche présentent une zone dite ballonnée avec un diamètre plus important sur une partie de leur hauteur. Dans le rectangle bleu (correspondant au domaine de calcul, on peut donc différencier trois zones d'écoulement. La zone 1 correspond à la zone entourée de cracons ballonnés, la zone 2 à la zone centrale intermédiaire et la zone 3 à une zone de cracons non ballonnés. La vue en haut à gauche correspond à une vue du haut des huit cracons. La vue en bas à gauche correspond au domaine de calcul avec les canaux colorés en vert et représentés à mi-hauteur. La vue de droite correspond à une vue latérale du domaine de calcul, les canaux étant colorés en vert.

canaux bouchés et la vitesse proche paroi est donc relativement faible : la longueur au bout de laquelle les débits entre sous-canaux se ré-équilibrent est relativement longue. Les calculs avec une approche plus macroscopique ne permettent pas de reproduire ces deux derniers phénomènes, le premier n'étant pas représenté, le second étant lié au fait que les débits entre sous-canaux, dits transverses, sont corrélés à des différentiels de pression entre canaux ce qui ne permet pas de prendre en compte convenablement le ré-équilibrage des débits (les calculs CFD révèlent que les pressions s'équilibrent plus rapidement que les débits). Cette géométrie a également été étudiée en prenant en compte la présence des gouttes et l'ensemble des phénomènes thermiques (voir section 4.6).

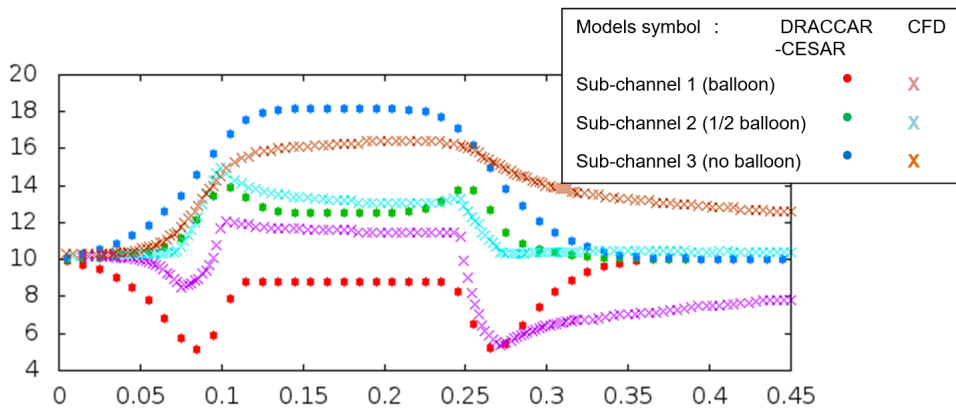
À la suite de ces travaux auxquels j'ai plus directement contribué, j'ai été associé à leur poursuite, notamment dans le cadre du programme PERFROI financé par l'ANR, [Repetto et coll. \(2015a\)](#). Dans le cadre de ce programme et concernant la thématique de la déviation des écoulements, on peut noter la définition et l'analyse d'essais d'hydraulique au sein d'une géométrie typique avec caractérisation des champs de vitesse par résonance magnétique nucléaire, [Oliveira et coll. \(2020c\)](#). J'ai contribué à l'écriture d'un sujet d'étude post-doctorale (en cours de recrutement) visant à qualifier les logiciels CFD et l'approche macroscopique sur la base de ces essais, tout en étendant l'étude aux phénomènes de convection.

**Conclusion perspectives** In fine, cette méthode est retenue par défaut pour la validation du logiciel Neptune\_CFD. Des travaux théoriques s'en inspirant ont été entrepris par la suite au CEA dans le cadre de la thèse de [Zaepffel \(2011\)](#) afin de pallier le défaut de l'incapacité de la formulation retenue à représenter une population de bulle monodisperse en taille (l'écart type de la loi étant déterminé par la taille moyenne). J'ai suivi avec beaucoup d'intérêt le développement de méthodes inspirées des travaux de R. Fox qui semblent très prometteurs. J'ai participé au suivi des travaux de thèse de [Foissac et coll. \(2011, 2013\)](#) sur la dynamique des sprays De mon point de vue, la difficulté principale réside dans la compréhension des dynamiques de coalescence et de fragmentation des écoulements à bulles qui reste très complexe à caractériser expérimentalement.

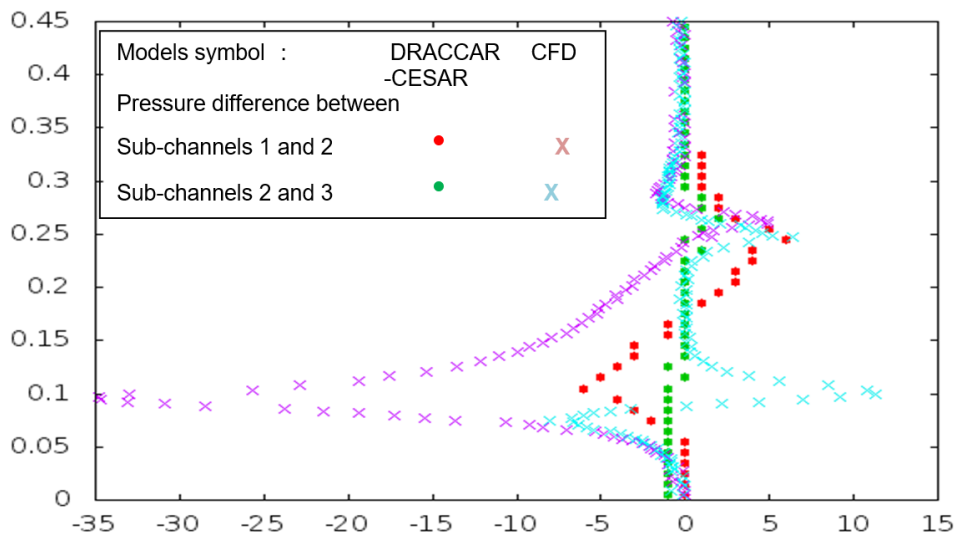
### 3.4 Écoulement granulaire de type vidange assistée par un écoulement gazeux

#### 3.4.1 Problématique générale et structuration des activités de recherche

Ce sujet de recherche est motivé par l'étude de l'interaction combustible-réfrigérant initiée suite à un hypothétique accident d'insertion de réactivité menant à une rupture de gaine. L'intensité du phénomène d'interaction est en partie déterminée par la cinétique avec laquelle les fragments de combustible



(a) Évolution axiale de la vitesse verticale moyenne ( $\text{ms}^{-1}$ ) pour les trois canaux.



(b) Évolution axiale de la différence de pression (Pa) entre canaux voisins.

FIGURE 8 – Comparaison entre des calculs CFD x et des calculs avec une approche macroscopique •, figures extraites de Ruyer (2015)

chauds contenus dans la gaine sont mis en contact avec l'eau pressurisée du cœur du réacteur. Or la modélisation historique dans le logiciel CIGALON de cette cinétique se limite à la détermination arbitraire d'un temps caractéristique de vidange sans lien avec des grandeurs physiques. La variabilité (et par là même l'incertitude) des estimations de l'intensité de l'interaction par rapport à ce paramètre est ainsi importante. On cherche donc, par cet axe de recherche, à mieux comprendre comment les grandeurs a priori déterminantes (taille et faciès de la rupture de la gaine, taille et forme des fragments de combustible, pressions interne et externe à la gaine) influent sur ce débit.

Réaliser l'étude dans les conditions de l'accident est impossible et la stratégie de recherche que j'ai développée consiste à considérer les connaissances relatives à des écoulements les plus similaires possibles. L'IRSN a développé des compétences dans le cadre de l'étude du combustible fragmenté et de sa dynamique d'écoulement au sein d'une gaine, notamment via des travaux de thèses (Martin (2010); Amarsid (2015)) ou le développement d'un logiciel de simulation numérique LMGC90. Ces activités de recherche sont en partie réalisées dans le cadre d'un laboratoire commun MIST MIST. Une première étude a ainsi été réalisée lors d'un stage de fin d'étude (F. Tan-2012) et a consisté en l'étude numérique d'une éjection simplifiée (particules circulaires dans un réservoir bi-dimensionnel) et sans prise en compte du couplage avec un fluide. Le besoin d'une caractérisation expérimentale de ce type de vidange m'a amené à bâtir une collaboration avec P. Aussillous de l'IUSTI lors de deux thèses successives (Zhou (2016); Zou (2019)). Outre le développement de bancs expérimentaux dédiés et innovants, la constitution d'une base de données et l'interprétation des résultats, ces travaux ont permis d'identifier les principales lois d'échelle de ce type d'écoulement et de confronter certains résultats à des simulations LMGC90. Ces simulations considèrent la description explicite du milieu granulaire et il y a un intérêt évident à analyser les phénomènes à une échelle plus mésoscopique. À cette échelle, le milieu peut être considéré comme un milieu continu mais la détermination des lois phénoménologiques régissant son écoulement (sa rhéologie) est une question encore actuellement ouverte dans la communauté scientifique. Pour étudier cette piste, nous avons associé P.-Y. Lagrée de  $\partial'$ Alembert au suivi des travaux de thèses et, avec la collaboration de son collègue S. Popinet, avons travaillé sur l'approche dite  $\mu(I)$  au sein du logiciel *Basilisk* (Popinet, 2013-2016).

Ces travaux ont fait l'objet des publications suivantes, Zhou et coll. (2015b, 2017, 2019); Zou et coll. (2020).

### 3.4.2 Débit de vidange gravitaire

**Le modèle du sablier** Le système physique illustrant le plus simplement les spécificités de la vidange d'un milieu granulaire depuis un réservoir est le sablier : son débit est constant dans le temps et dépend uniquement, au premier ordre, de la taille de l'orifice. Il est ainsi indépendant des autres paramètres géométriques du réservoir et, qui plus est, indépendante des caractéristiques des grains (hauteur de remplissage, tailles, formes, matériau), tant que la taille de l'orifice est significativement plus importante que celle des grains. Cette propriété fait du sablier un instrument plus idéal pour la mesure du temps que la clepsydre, mais la raison fondamentale de cette différence entre les propriétés d'écoulement d'un fluide et d'un milieu granulaire n'est pas triviale, Staron et coll. (2012).

L'analyse dimensionnelle de ce type de vidange permet de construire une loi d'échelle relativement simple pour le débit massique de vidange  $Q$ , comme nous l'avons décrit dans Zhou et coll. (2017), et d'introduire une loi dite d'Hagen-Beverloo, Hagen (1852); Tighe et Sperl (2007); Beverloo et coll. (1961), par exemple dans une configuration pour laquelle l'orifice a une géométrie circulaire de taille  $D$  :

$$Q \propto \rho_p \phi_b D^2 \sqrt{gD} \quad (10)$$

où  $\phi_b$  est la fraction volumique du milieu granulaire et  $\rho_p$  sa masse volumique.

Dans la configuration qui nous intéresse, nous devons examiner dans quelle mesure les spécificités suivantes influent sur le débit de vidange gravitaire et le font s'écarter du modèle précédent :

- la position latérale de l'orifice (par rapport à une position au fond du réservoir) permet-elle de préserver la loi d'échelle (ou la hauteur et la largeur de l'orifice ne jouent pas un rôle équivalent) ?
- la faible largeur du réservoir (crayon combustible) qui peut être du même ordre de grandeur que l'orifice joue-t-elle un rôle sur la loi de vidange ?
- dans ces configurations, quel rôle joue la taille des grains ?

**Configurations expérimentales** Plusieurs systèmes expérimentaux modèle ont été conçus (thèses de Zhou (2016); Zou (2019)) pour étudier ces questions et leur schématisation est illustrée sur la figure 9. Le principe est de faire varier les dimensions géométriques du réservoir et de l'orifice ainsi que les tailles

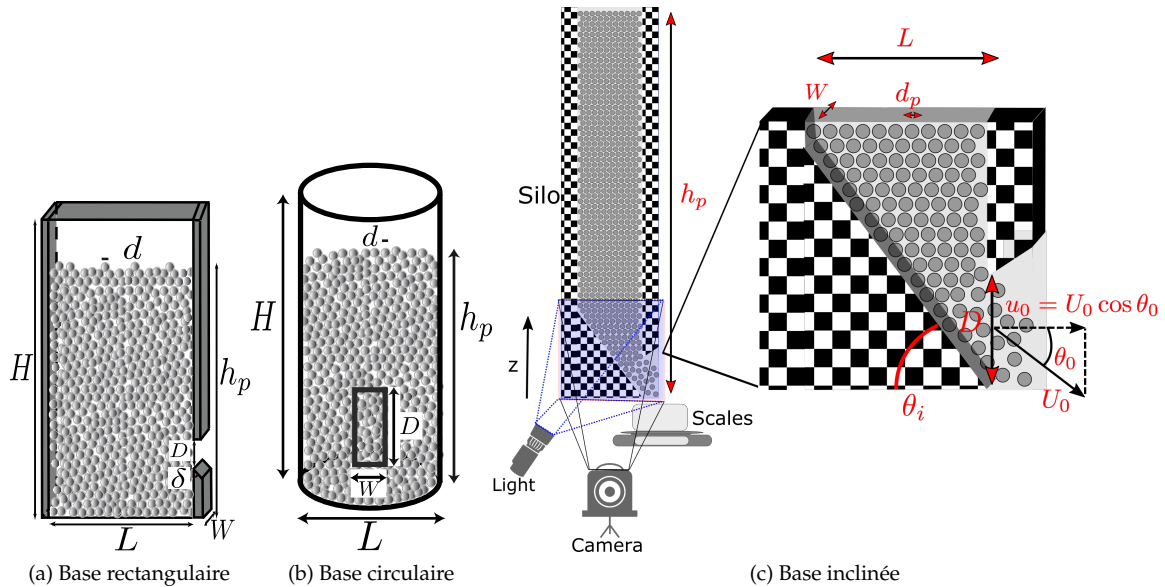


FIGURE 9 – Schémas des différentes configurations de silos pour l'étude de la vidange gravitaire.

caractéristiques des particules, qui sont des billes sphériques dont la distribution en taille est quasi-monodisperse. Les valeurs particulières des paramètres considérées dans ces expériences sont détaillées dans le tableau 2, l'ensemble des combinaisons étant explorée ce qui nous permet de disposer d'un très grand ensemble de mesures pour asseoir notre analyse. Par ailleurs, de nombreux tests ont été reproduits deux fois pour s'assurer de la bonne reproductibilité des résultats.

Le système de mesure principal est une pesée des grains collectés en sortie du réservoir à l'aide d'une balance électronique. Pour la configuration avec une base inclinée, une faible largeur  $W$  du réservoir permet, à l'aide d'un système de traitement d'images (P.I.V.), de déterminer les champs de vitesse et de fraction volumique du milieu granulaire au sein de l'écoulement.

Nous avons dans un premier temps (résultats non détaillés ici, voir Zhou (2016)) considéré l'étude de la configuration plus classique de la vidange de réservoirs (de base circulaire et rectangulaire) ayant un orifice sur leur base inférieure, ce qui nous a permis d'avoir de retrouver les lois d'échelle classiques et de constituer une base de référence pour nos études particulières.

Enfin, nous avons complété ces études par des expériences numériques permettant notamment d'étudier la structure interne de l'écoulement en simulant la vidange d'un réservoir bidimensionnel (particules circulaires). La vidange est simulée à l'aide du logiciel LMGC90 de résolution de la dynamique des contacts et un post-traitement a été développé pour étudier les profils de vitesse et fraction volumique en sortie tout en assurant une précision donnée. Une première série de simulations concerne l'impact de la position de l'orifice (sur la base inférieure du réservoir versus sur une paroi latérale) pour deux tailles de particules (petites de diamètre 2mm et grandes de diamètre 6mm) et en faisant varier la taille de l'orifice. Ces résultats sont présentés dans Zhou (2016); Zhou et coll. (2015b). Une seconde série de simulations permet de déterminer l'impact d'une polydispersion en taille des particules, Zhou et coll. (2015b). Le réservoir, ayant un orifice sur sa base inférieure (36mm), est rempli d'une population de particules circulaires constituée d'un mélange de tailles, petites et grandes, dont on fait varier les proportions respectives.

**Un premier résultat : des vidanges similaires, des lois particulières** L'ensemble des vidanges réalisées sont des phénomènes stationnaires : le débit (déduit d'une dérivée numérique de la mesure de la balance) est constant. On peut alors s'intéresser aux lois du débit en fonction des paramètres  $W$ ,  $D$ ,  $d_p$  et  $\theta_i$ .

Un premier résultat remarquable est l'identification de deux régimes de vidange suivant le rapport d'aspect de l'orifice du silo (rapport hauteur/largeur= $D/W$ ). Ainsi, comme illustré sur la figure 10a, pour de faibles rapport d'aspect ( $D/W \ll 1$ ), la loi puissance est similaire à la loi classique. L'impact de l'orientation de l'orifice (notamment par rapport à l'accélération de la pesanteur  $\vec{g}$ , moteur de la vidange) n'a qu'une influence sur les valeurs des paramètres (coefficients empiriques) de la loi. Pour



	$D$ (mm)	$W$ (mm)	$\theta_i$ (deg)	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )
Base rectangulaire	{2.7; 5.4; 10; 15; 20; 25; 30; 35}	{3.5; 5; 10; 20; 30; 40}	$\emptyset$	verre : {124; 190; 375; 538; 762; 1129; 1347}
Base circulaire	{5; 10; 20; 25; 30; 35; 40; 41.5}	{5; 10.1; 15.4; 20.9; 33.9; 62.8}	$\emptyset$	verre : {124; 190; 375; 538; 762; 1129; 1347}
Base inclinée	{10; 20; 30; 40; 50}	{5; 10}	{0; 20; 40; 60; 70; 80}	verre : {190; 375; 538; 762; 1129; 1347} céramique : 4170

TABLE 2 – Valeurs des paramètres dimensionnels des expériences de vidange gravitaire de silo : géométrie du silo, type de particules. Les grandeurs correspondent au schéma de la figure 9.

les orifices les plus étroits ( $D/W \gg 1$ ), nous avons montré que la vitesse débitante des particules est en  $\sqrt{gW}$ . Ce régime d'écoulement n'est pas observé pour des orifices situés sur la base inférieure du silo. Dans le cas d'un orifice sur la paroi latérale, nous avons donc identifié un régime d'écoulement de vidange granulaire non classique.

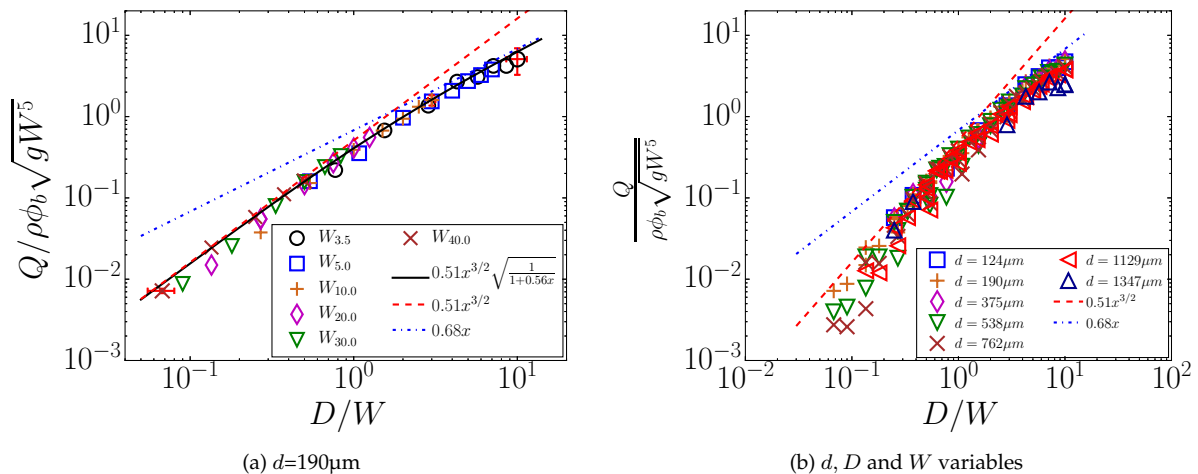
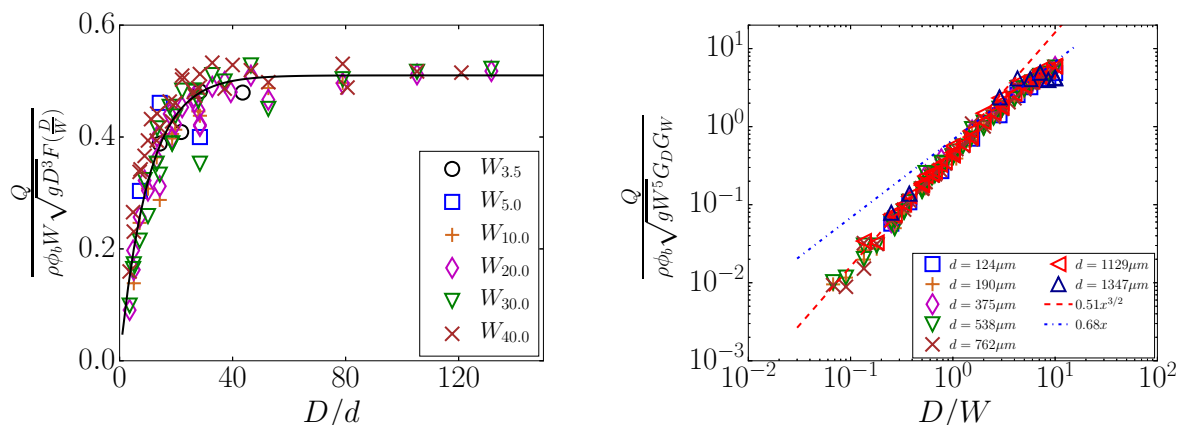


FIGURE 10 – Débit de vidange obtenu sur des réservoirs à base rectangulaire normalisés par  $\rho\phi_b\sqrt{gW^5}$  en fonction du rapport d'aspect  $D/W$  de l'orifice. Chaque symbole correspond à une expérience, les barres d'incertitude expérimentale sont représentées pour les données aux extrémités du domaine  $D/W$  exploré. Les courbes (traits pleins, tirets et pointillés) correspondent aux fonctions spécifiées en légende.

**Effet de la taille des particules** Ces résultats se retrouvent pour l'ensemble des tailles de particules utilisées, mais on constate une dispersion des résultats d'autant plus importante que la taille est importante (figure 10b). L'effet de la taille des particules sur le débit de vidange est effectivement reporté dans la littérature. Ainsi Janda et coll. (2012) étudient expérimentalement la vidange d'un réservoir mono-couche (une seule couche de billes dans l'épaisseur) en faisant varier la taille de l'orifice (sur la base inférieure) et mettent en évidence que pour un faible nombre de particules au travers de l'orifice  $D/d$ , on observe une dilatation plus importante de l'écoulement au niveau de l'orifice. Les auteurs proposent une fonction exponentielle, que nous appellerons géométrique, pour corréliser leurs résultats. Nous avons retrouvé ce résultat à l'aide de simulations numériques LMGC90 (dans le cas de vidanges avec un orifice sur la base inférieure et sur le côté latéral) et étendu son domaine de validité en faisant varier expérimentalement  $D$  et  $d$  ainsi qu'en explorant les cas bi-disperse, Zhou et coll. (2015b).

On illustre avec la figure 11a que la dépendance en fonction de la taille des particules  $d$  du débit

(pour une sélection de cas pour lesquels le nombre de particules dans la largeur de l'orifice  $W/d$  est suffisamment grand) se réduit à une fonction de  $D/d$  qui est bien approchée par une fonction exponentielle notée  $G_D(D/d)$ . Cette fonction est constante pour un grand nombre de particules dans la hauteur de l'orifice  $D/d$ . De manière similaire, pour les cas où le nombre de particules dans la largeur devient faible, les résultats expérimentaux sont bien corrélés par une fonction similaire notée  $G_W(W/d)$ . On illustre alors sur la figure 11b que le débit normalisé par la prise en compte de cet effet de taille de particules ne dépend bien plus que du rapport d'aspect de l'orifice  $D/W$  avec une très faible dispersion des résultats. Cet effet de la taille des particules est également retrouvé expérimentalement dans le cas des



(a) Débit normalisé par sa dépendance en  $D$  et  $W$  en fonction du nombre de particules dans la hauteur de l'orifice, sélection des cas  $W/d > 10$ . La ligne en trait plein correspond à la fonction  $G_D$ .

(b) Débit normalisé par sa dépendance en la taille des particules (fonctions  $G_D$  et  $G_W$ ). La dépendance en  $D/W$  peut alors s'approcher par la fonction  $F$ .

FIGURE 11 – Résultats des expériences de vidange de silo à base rectangulaire et orifice latéral. La fonction  $F(D/W)$  correspond aux deux régimes asymptotiques pour respectivement  $D/W \ll 1$  et  $D/W \gg 1$ . L'expression des fonctions géométriques est  $G_X(X/d) = [1 - \alpha_X e^{-\beta_X \frac{X}{d}}]$  avec  $X = D$  ou  $W$  et  $\alpha_D = 1$ ,  $\alpha_W = 0.46$ , et  $\beta_D = \beta_W = 0.1$ .

réservoirs à fond incliné (Zou et coll. (2020)), mais aussi pour les écoulements pour lesquels la vidange est assistée par un écoulement gazeux.

**Silos étroits et orifice latéral : focus sur le nouveau régime** Afin de mieux comprendre les spécificités du régime de vidange identifié (fortes valeurs de  $D/W$  et orifice latéral), nous avons étudié en quoi la position latérale de l'orifice modifiait l'équilibre des efforts au sein de l'écoulement. Des études préliminaires lors de la thèse de Y. Zhou ont orienté des travaux entrepris lors de la thèse de Z. Zou.

Notre interprétation de l'existence de ce régime est que la rotation de l'écoulement joue un rôle plus important pour une vidange latérale que par le fond. Dans le cas d'une vidange par le fond, les lignes de courant se resserrent à l'approche de l'orifice, mais l'écoulement reste principalement vertical. Sur les extrémités latérales du fond du réservoir, une zone morte (vitesse d'écoulement nulle) se dessine naturellement dessinant un cône naturel d'écoulement. Dans le cas d'une vidange latérale, l'écoulement vers l'orifice prend une inclinaison plus ou moins accentuée, la vitesse horizontale déterminant le débit. La facilité de rotation de l'écoulement dans la zone proche de l'orifice, et ainsi le débit de vidange, est alors sujette, pour les silos les plus étroits, à une influence relative plus importante du frottement pariétal. Ce dernier point sera présenté dans la partie ci-après consacrée à la modélisation continue de l'écoulement granulaire.

Dans le but de vérifier la relation entre inclinaison de l'écoulement à la sortie, zone morte et débit, le dispositif du réservoir à fond incliné (cf. illustration de la figure 9c) a été conçu pour permettre un contrôle forcé de l'inclinaison en sortie. Ce réservoir étroit permet une étude des lignes de courant et des champs de vitesse au sein même du silo comme illustré sur la figure 12. On observe ainsi que pour une inclinaison de l'ordre de  $40^\circ$ , l'écoulement est pratiquement privé de sa zone morte. Nous avons étudié l'inclinaison de l'écoulement en sortie et comment il variait en fonction de  $D/W$  et de  $\theta_i$ . Nous avons ainsi pu relier l'influence de  $D/W$  à son impact sur la capacité de l'écoulement à s'incliner, et in fine sur le débit de vidange, Zou et coll. (2020). Ainsi,  $D/W$  tout comme  $\theta_i$  agissent sur l'orientation



de l'écoulement à la sortie et le débit. L'inclinaison du fond  $\theta_i$  ne vient modifier le débit que dès lors qu'elle est suffisamment prononcée par rapport à celle déterminée par  $D/W$  : pour de faibles épaisseurs de réservoir (grand  $D/W$ ) elle est quasiment sans effet. Ceci est illustré par la figure 12c.

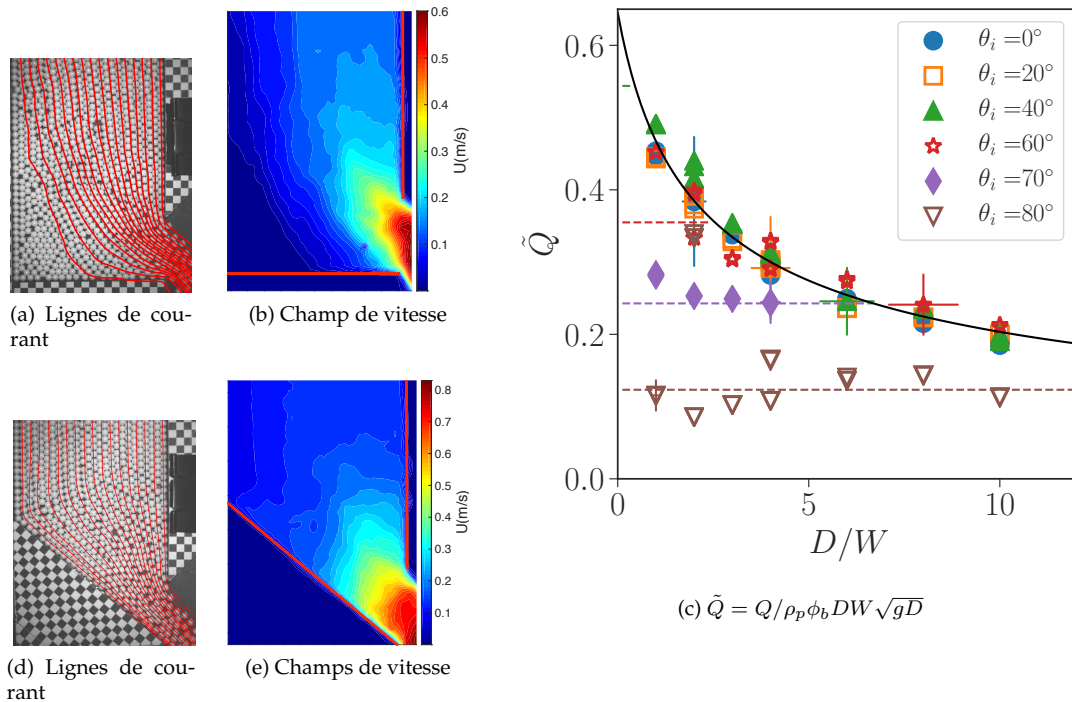


FIGURE 12 – (a, b) Lignes de courant et (d,e) intensité du champ de vitesse pour les expériences de vidange mono-couche ( $d=4170\text{mm}$ ) avec  $D=40\text{mm}$  et (a, b)  $\theta_i = 0^\circ$  et (d, e)  $\theta_i = 40^\circ$ ; (c) : Débit de vidange normalisé en fonction du rapport d'aspect de l'orifice pour différents angles d'inclinaison du fond, résultats expérimentaux pour  $d=190\mu\text{m}$ . La ligne continue représente la dépendance en  $D/W$  (fonction  $F$  décrite plus haut)

Ces analyses reposent également sur une analyse des auto-similarités des profils de vitesse et de fraction volumique en sortie obtenus par imagerie expérimentale et sur une analyse en parallèle de simulations numériques LMGC90 ainsi que de simulations numériques avec une approche continue (décrites plus bas). C'est en travaillant de manière conjointe avec l'ensemble de ces approches que l'on peut au mieux accéder à la structure des écoulements granulaires et à la compréhension des mécanismes physiques sous-jacents.

### 3.4.3 Force motrice associée à un écoulement gazeux

Dans certaines situations accidentelles, un différentiel de pression entre l'interne du crayon de combustible et son environnement génère un écoulement des gaz initialement présents dans le crayon à travers l'orifice. On se pose donc ici la question de l'influence de ce phénomène sur la vidange des fragments.

**Dispositifs expérimentaux** L'approche expérimentale a consisté à ajouter des systèmes permettant le contrôle ou la mesure de débit de gaz depuis le réservoir vers l'extérieur. Le réservoir a été conçu pour être étanche à l'exception de l'orifice. Le fluide considéré est de l'air issu du réseau pressurisé du laboratoire. Nous avons travaillé par complexité croissante :

- Dans un premier temps, nous avons étudié un dispositif permettant d'injecter au sommet de la colonne granulaire du réservoir un débit constant (ce qui suppose de maîtriser les pertes de charge en amont du fait de la modification pendant la vidange de la perméabilité de la colonne granulaire). Cette situation génère naturellement une vidange stationnaire, les débits de grain et de gaz étant alors constants. Ces résultats ont été publiés, [Zhou et coll. \(2019\)](#). Ils concernent des réservoirs à base circulaire ou rectangulaire avec des orifices sur le fond ou sur la paroi latérale, p. ex. figures 13a, 13b. L'impact de la forme du silo et de la position de l'orifice sur le débit de

vidange étant tout à fait similaire à celui observé pour la vidange gravitaire, nous nous sommes par la suite limités à l'étude de silos à base circulaire et à orifice sur leur base ce qui facilite leur réalisation.

- Dans un second temps, nous avons développé un dispositif permettant d'imposer un différentiel de pression constant entre le sommet de la colonne granulaire au sein du réservoir et l'atmosphère, cf. figure 13c. Lors de la vidange, la perméabilité de la colonne granulaire diminue avec sa hauteur, ce qui fait varier dans le temps les conditions des écoulements et les intensités des débits.
- Dans un dernier temps, le dispositif a été conçu en collaboration avec l'équipe "Chocs" de l'IUSTI, cf. figure 13d. Le réservoir est initialement pressurisé, orifice fermé, figure 13e. La rupture de l'orifice (figure 13f) est déclenchée par un seuil de surpression et le différentiel de pression entre le sommet de la colonne granulaire et l'atmosphère varie rapidement au fur et à mesure de l'éjection du gaz au sein du réservoir.

La mesure du débit gazeux repose sur une série de capteurs de pression en paroi du réservoir à différentes distances de l'orifice. Nous avons fait varier principalement les propriétés du milieu granulaire (taille, forme, masse volumique) afin de faire varier notablement la perméabilité mais aussi l'inertie de ce milieu. À titre illustratif, le tableau 3 donne les paramètres explorés pour le dispositif permettant de réaliser des vidanges avec un différentiel de pression imposé.

$L(\text{mm})$	$D(\text{mm})$	$d_p (\mu\text{m})$
20	10	Particules de verre - $\rho_p=2500 \text{ kg.m}^{-3}$ : {124; 190; 375; 538; 762; 1129; 1347} Particules de céramique - $\rho_p=6000 \text{ kg.m}^{-3}$ : {180; 550; 1165}
{40; 60}	{10; 20}	
		Sable - $\rho_p=2500 \text{ kg.m}^{-3}$ : 864 Mélange bidisperse en taille (particules de céramique) : 50% massique de $d_p^f=180$ et de $d_p^f=1165$

TABLE 3 – Paramètres des expériences réalisées avec le dispositif à pression imposée.

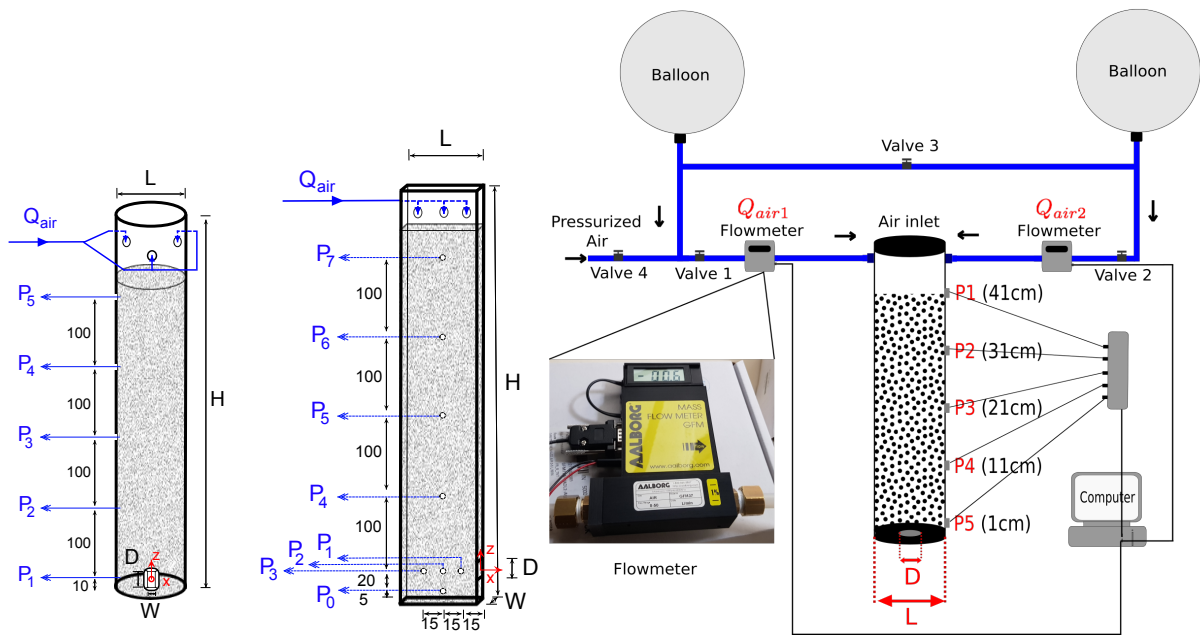
**Écoulement gazeux et perméabilité de la colonne granulaire** Lors des vidanges à débit ou pression imposées, ou lors de la phase finale de la vidange déclenchée par rupture de l'orifice, les surpressions gazeuses au sein du réservoir sont modérées (de l'ordre de quelques milliers de Pa), et il est licite de négliger les effets de masse volumique variable du gaz. Les gradients de pression verticaux sont constants dans la partie supérieure de la colonne granulaire et plus importants dans la zone proche de l'orifice où, du fait de la convergence de l'écoulement vers l'orifice, une accélération de l'écoulement est attendue. Pour toute la hauteur du réservoir, nous avons montré que le gradient de pression est lié à la vitesse relative de l'air par rapport aux particules par une relation de type Darcy-Forchheimer, les coefficients de perméabilité et perméabilité étant très bien décrits par les relations de Kozeny-Carman :

$$-\frac{\partial p^f}{\partial x_i} = \beta_1 \eta_f (U_i - u_i^p) + \beta_i \rho_f d_p (U_i - u_i^p) |U_i - u_i^p| \quad (11)$$

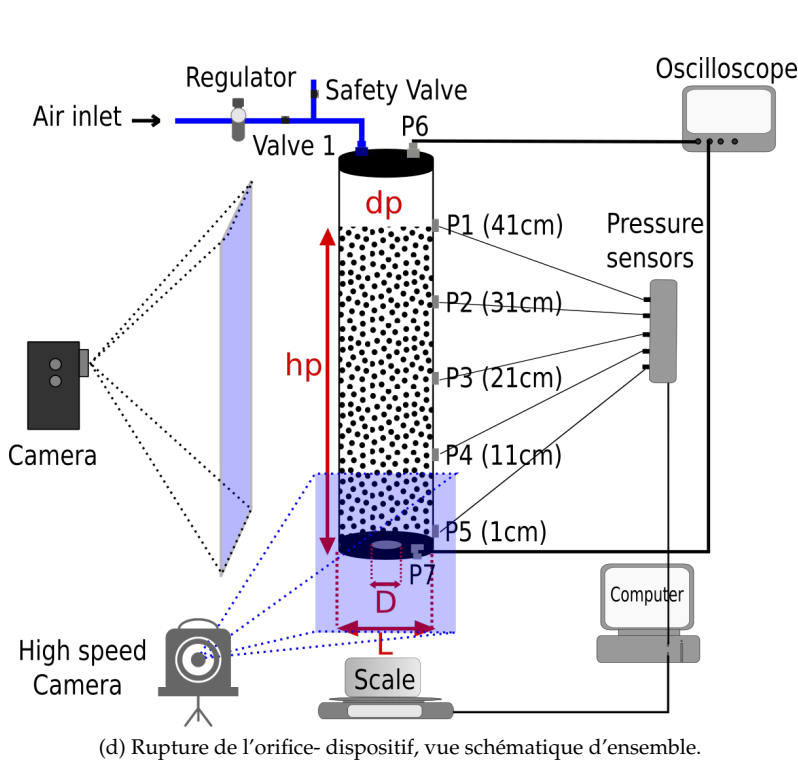
avec  $\beta_1(\phi, d_p) = \frac{150\phi^2}{(1-\phi)^3 d_p^2}$  et  $\beta_i(\phi, d_p) = \frac{1.75\phi}{(1-\phi)^3 d_p^2}$  et  $(U_i - u_i^p)$  la vitesse relative débitante. Dans la région proche de l'orifice, un ajustement de la fraction volumique de particules  $\phi_o$  (par rapport à la fraction volumique moyenne  $\phi_{bi}$  de la colonne déterminée expérimentalement) est néanmoins nécessaire. La figure 14a illustre cet ajustement pour des essais à pression imposée et des mesures de gradient de pression proche de l'orifice, zone pour laquelle le terme quadratique est relativement important. Chaque série de symbole correspond à un essai particulier, les débits granulaire et gazeux augmentant durant la décharge du fait de la diminution de la hauteur de la colonne granulaire.

Nous avons alors montré que le ratio  $\phi_o/\phi_{bi}$  dépend au premier ordre du nombre de particules au travers de l'orifice  $D/d$  et que son évolution correspond à une dilatation de l'écoulement granulaire pour un faible nombre. En outre, cette variation est bien décrite par la fonction géométrique déterminée pour les essais de vidange gravitaire comme l'illustre la figure 14b.

**Couplage mécanique entre écoulements granulaire et gazeux** La détermination du gradient de pression fluide permet tout autant d'estimer la force exercée sur le milieu de granulaire. Cette traînée agit ainsi comme une force complémentaire à l'accélération de la pesanteur. En s'inspirant de travaux de



(a) Débit d'air imposé, base circulaire, orifice latéral. (b) Débit d'air imposé, base rectangulaire, orifice latéral. (c) Pression imposée, réservoir à base circulaire et trou à la base.



(d) Rupture de l'orifice- dispositif, vue schématique d'ensemble.

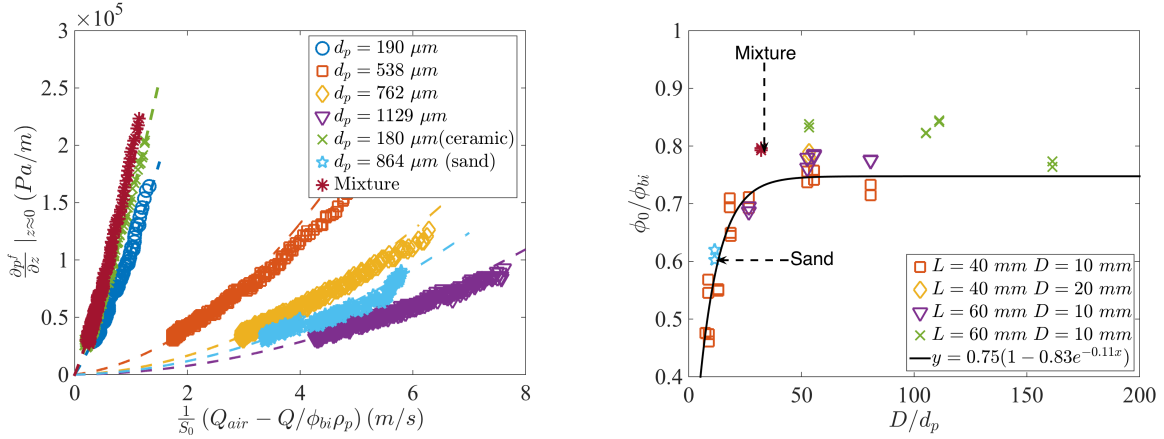


(e) Base du dispositif, prise de pression et orifice circulaire bouché.



(f) Feuille d'aluminium obstruant initialement l'orifice à la fin de l'essai.

FIGURE 13 – Illustrations des différents dispositifs d'essai. Les dimensions des deux premiers schémas sont en mm. Les capteurs de pression sont repérés par les symboles  $P_{...}$ .



(a) Gradient de pression proche de l'orifice en fonction de la vitesse relative débitante pour différents milieux granulaires. Les lignes en pointillé correspondent à l'équation 11 avec une valeur de la fraction volumique  $\phi = \phi_o$  ajustée.

(b) Évolution de la constante d'ajustement  $\phi_o$  normalisée par la fraction volumique initiale de la colonne  $\phi_{bi}$  en fonction du nombre de particules au travers de l'orifice  $D/d$ . La ligne en trait plein représente la fonction géométrique  $G_D$  avec les paramètres précisés en légende.

FIGURE 14 – Vidange d'un réservoir cylindrique avec pression imposée au sommet de la colonne granulaire.

la littérature, de Jong (1969), on montre alors que le débit granulaire est corrélé au gradient de pression. Ceci peut être pris en compte comme une correction du débit  $Q$  par rapport au débit de vidange gravitaire dans des conditions similaires  $Q_0$  :

$$Q = Q_0 \left( 1 + \frac{1}{\phi_o \rho_p g} n_i \frac{\partial p^f}{\partial x_i} \Big|_o \right)^{1/2} \quad (12)$$

La détermination de cette relation permet alors d'écrire un modèle complet pour la vidange, valable dans les différentes configurations étudiées à l'exception des phases pour lesquelles la compressibilité du gaz joue un rôle important. Nous avons mis en équation sans dimension ce modèle en introduisant les nombres suivants :

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_0} \quad \text{et} \quad \tilde{Q} = \frac{\phi_o \rho_p Q_{air}}{Q_0} \quad (13)$$

$$\mathcal{N}_{i0,b} = \frac{\eta_f \beta_l(\phi_{0,b}, d_p) Q_0}{\phi_{0,b}^2 \rho_p^2 g S_{o,b}} \quad \text{et} \quad \mathcal{N}_{i0,b} = \frac{\rho_f d_p \beta_i(\phi_{0,b}, d_p) Q_0^2}{\phi_{0,b}^3 \rho_p^3 g S_{o,b}^2} \quad (14)$$

où  $S$  est la section de passage et les indices indiquent respectivement l'état du milieu au sein de la colonne granulaire (indice  $b$ ) ou proche de l'orifice (indice  $o$ ). La combinaison des équations (11) et (12) permet d'obtenir une équation quadratique

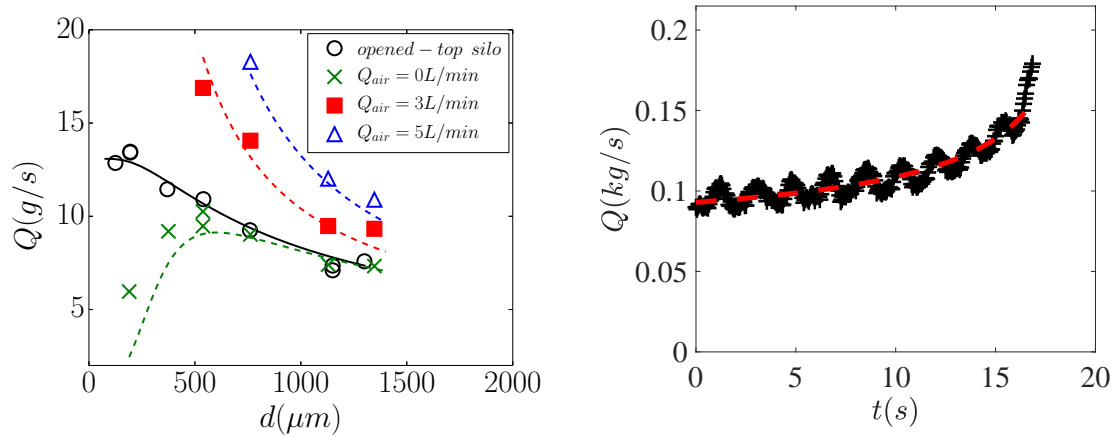
$$-\mathcal{N}_{i0} \tilde{Q}^2 + (2\mathcal{N}_{i0} \bar{Q} - \mathcal{N}_{i0}) \tilde{Q} + (1 - \mathcal{N}_{i0}) \bar{Q}^2 + \mathcal{N}_{i0} \bar{Q} - 1 = 0 \quad (15)$$

dont la résolution donne

$$\tilde{Q} = \bar{Q} + \frac{\sqrt{\Delta} - \mathcal{N}_{i0}}{2\mathcal{N}_{i0}} \quad \text{with} \quad \Delta = 4\mathcal{N}_{i0} \bar{Q}^2 - 4\mathcal{N}_{i0} + \mathcal{N}_{i0}^2 \quad (16)$$

On illustre sur les courbes de la figure 15 la capacité du modèle à prédire l'évolution du débit granulaire dans différentes configurations avec écoulement gazeux.

**Compressibilité en cas de rupture de l'orifice** Dans la configuration d'essai avec rupture de l'orifice, la pression au sein du réservoir est initialement beaucoup plus élevée (de l'ordre de  $3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ). La phase initiale de vidange correspond à une éjection très importante de grains ainsi qu'à une dépressurisation rapide comme illustré sur les courbes des figures 16a et 16b.



(a) Débit granulaire pour la configuration débit d'air imposé pour différentes conditions expérimentales. silo rectangulaire avec  $L = 60\text{mm}$ ,  $D = 10\text{mm}$  and  $W = 3.5\text{mm}$  et ouverture sur le fond.

(b) Évolution temporelle du débit granulaire pour le cas d'un mélange bidisperse et d'une pression imposée.  $D=10\text{mm}$ ,  $L=40\text{mm}$ . Les oscillations de débit ont pu être attribuées au système de mesure par pesée.

FIGURE 15 – Prédiction du débit granulaire en présence d'un écoulement gazeux. Les lignes correspondent à la résolution du modèle de l'équation (16)

Dans ce cas, nous avons pu montrer que, du fait notamment de la forte variabilité de la masse volumique du gaz avec la pression, le gradient de pression n'est pas uniforme au sein de la colonne granulaire tel qu'illustré sur la figure 16c. L'établissement d'un gradient de pression au sein du réservoir s'apparente à un processus diffusif. Nous avons déterminé les équations de ce processus et pu montrer que le temps d'établissement  $\tau$  qui s'exprime comme

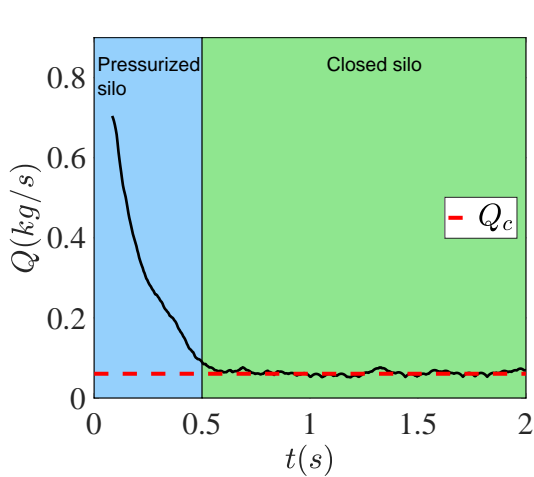
$$\tau \approx = \frac{150(h_p^0)^2 \eta \phi_{bi}^2}{\rho_{fc} c_0^2 d_p^2 (1 - \phi_{bi})^2} \quad (17)$$

permet de bien représenter nos données expérimentales (cf. figure 16d).

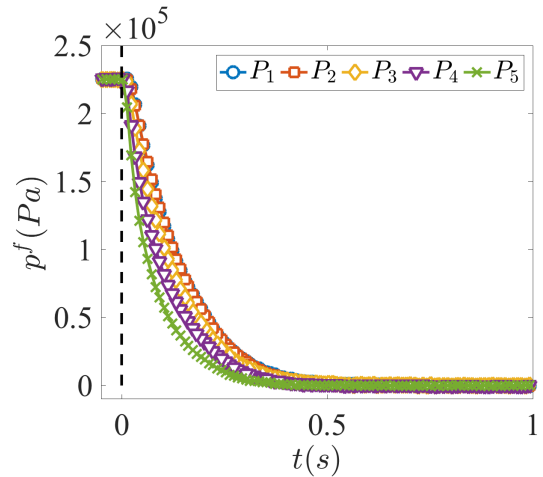
### 3.4.4 Jet en sortie du réservoir

**Oscillations** Lors des expériences avec rupture de l'orifice pour lesquelles les débits granulaires les plus importants ont pu être obtenus, nous avons observé une structure particulière du jet avec la formation régulière d'instabilités sous la forme de panaches en parapluie (dans les autres cas, le jet ne s'évase quasiment pas) ainsi qu'illustré sur la figure 17a. À l'aide d'un post-traitement dédié des images vidéos, nous avons pu déterminer les instants d'occurrence des panaches et constater que leur fréquence diminuait au cours des premiers instants de la vidange. L'analyse du signal de pression au sein du silo a révélé qu'un signal de même fréquence se conjugait à la phase de décroissance rapide, voir la courbe de la figure 17b. Ainsi les oscillations du jet sont associées à des cycles d'augmentation et diminution relatives de la pression du gaz lors de sa détente. Nous avons proposé un mécanisme pour les instabilités du jet basé sur des oscillations de la vitesse d'éjection des grains au sein du jet.

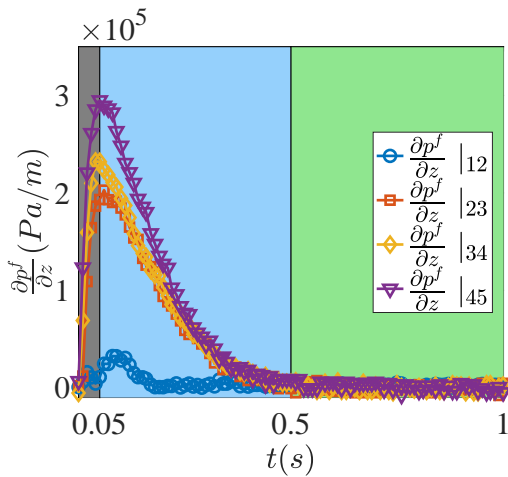
**Sortie en milieu liquide** Dans l'ensemble des configurations expérimentales précédentes, la sortie du réservoir était aux conditions atmosphériques. Dans la configuration d'intérêt, les particules sont éjectées dans un milieu liquide à haute pression, liquide avec lequel elles interagissent thermiquement (cf. section 4.7). Concernant la dynamique de vidange, nous avons choisi de plonger le réservoir dans un environnement liquide afin d'étudier l'effet d'une sortie du mélange gaz-particule dans un environnement fluide quasi incompressible et dense. Ces travaux ont permis de mettre en évidence que pour les situations de vidange de gaz et de particules, l'impact du milieu liquide se résumait à l'effet hydrostatique, la pression liquide venant amoindrir le différentiel de pression entre l'intérieur du réservoir et sa sortie. Nous avons également constaté que les instabilités du jet persistaient dans le liquide, le jet étant entouré d'une poche de gaz, que les particules soit hydrophobes ou non.



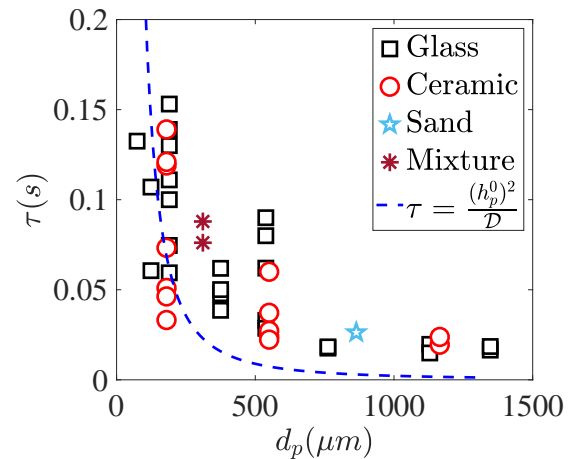
(a) Débit granulaire en fonction du temps.



(b) Pression au sein du réservoir en fonction du temps.



(c) Gradient de pression fluide à différentes hauteurs en fonction du temps.



(d) Temps caractéristique de l'établissement du gradient de pression au sein de la colonne granulaire pour différentes conditions d'essai. La courbe en pointillés correspond à l'équation (17)

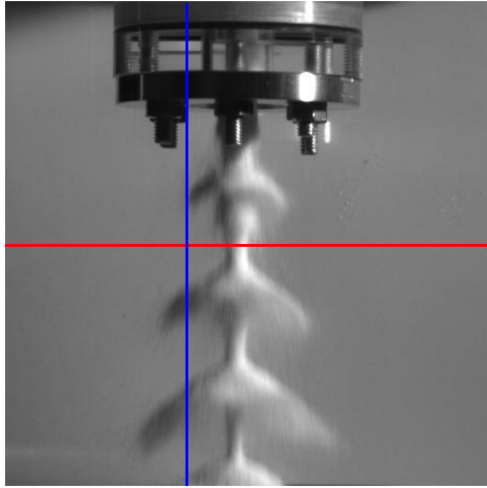
FIGURE 16 – Premiers instants de la vidange après ouverture de l'orifice. Les courbes (a-c) correspondent aux conditions particulières suivantes  $L = 40\text{mm}$ ,  $D = 10\text{mm}$  and  $d_p = 550\mu\text{m}$  (billes de céramique).

### 3.4.5 Modélisation continue

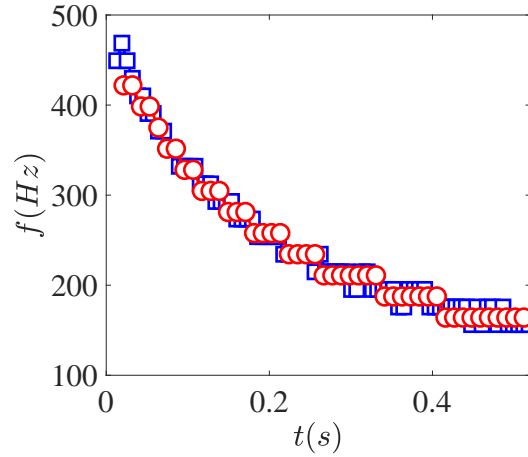
Les lois d'échelle des débits de vidange ont pu être déterminées dans un grand nombre de configurations. Mais elles ne suffisent pas à décrire une dynamique de vidange particulière, du fait de l'indétermination des coefficients empiriques. Nous avons ainsi travaillé au développement d'une modélisation numérique de cette dynamique de vidange permettant à la fois de reproduire les lois d'échelle et applicable à une configuration géométrique quelconque. Si les modélisations numériques représentant explicitement chaque particules ont la capacité de simuler de telles dynamiques, elles introduisent un grand nombre de degrés de liberté relativement secondaires par rapport à l'estimation du débit et générant un coût de calcul élevé.

Le milieu granulaire peut, dans plusieurs conditions d'écoulement, se décrire comme un continuum fluide aux propriétés rhéologiques particulières. Parmi les modélisations de sa rhéologie, nous avons choisi de développer la rhéologie dite du  $\mu$ -I, [MIDI \(2004\)](#), et de s'associer au laboratoire d'Alembert qui développe le logiciel libre *Basilisk* et l'avait déjà appliqué avec succès à des vidanges de silo [Staron et coll. \(2014\)](#).





(a) Instantané du jet.



(b) Analyse en fréquence de l'apparition des instabilités (analyse de niveaux de gris le long de la ligne bleue de l'image voisine : évolution temporelle (○). Analyse des fréquences d'oscillation de la pression au sein du réservoir (□))

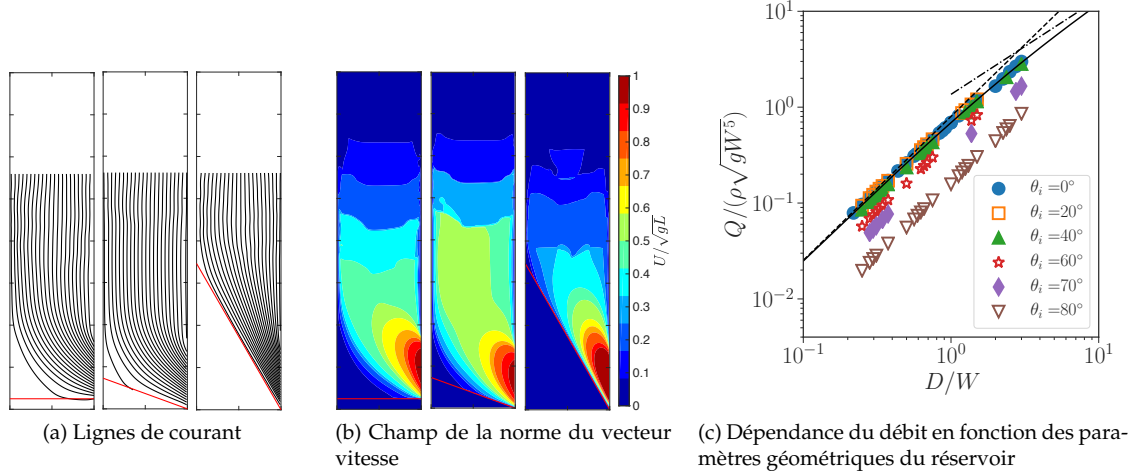
 FIGURE 17 – Vidange d'un réservoir pressurisé initialement à  $3 \cdot 10^5 \text{Pa}$ ,  $L = 40 \text{mm}$ ,  $D = 10 \text{mm}$  et  $d_p = 180 \mu\text{m}$  (billes de céramique).

**Équations gouvernant la dynamique couplée gaz-milieu granulaire** L'approche dite  $\mu(I)$  repose sur des lois particulières obtenues sur des configurations de cisaillement modèles : un milieu granulaire de fraction volumique  $\phi$  composé de sphère de taille  $d$  et de masse volumique  $\rho_p$  est soumis à une poussée  $P^p$  et un taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  en appliquant un effort  $\sigma$ . Dans ces configurations, le seul paramètre sans-dimension  $I = \dot{\gamma}d/\sqrt{P^p/\rho_p}$  contrôlant la dynamique permet d'exprimer les variations du tenseur des contraintes  $\sigma(I)$  au sein du milieu et de la fraction volumique  $\phi(I)$ , [Jop et coll. \(2006\)](#). Ces lois ont été généralisées à une configuration tri-dimensionnelle afin de tester leur validité à modéliser la rhéologie d'écoulements granulaires plus complexes. Dans nos configurations d'écoulement en réservoir, le milieu granulaire reste globalement très compact, à l'exception de la zone proche de l'orifice pour laquelle nous avons mis en évidence des phénomènes de dilatation du milieu granulaire dès lors que le ratio taille de particules/taille de l'orifice est relativement grand. Pour l'approche numérique, nous avons négligé ce dernier effet et avons considéré un milieu granulaire de fraction volumique uniforme. Le tenseur des contraintes au sein du milieu granulaire  $\sigma_{ij}^p = -p^p \delta_{ij} + \tau_{ij}^p$  est le fruit des interactions par contact direct entre particules et peut être décrit par une rhéologie frictionnelle dépendant du cisaillement, [MIDI \(2004\)](#); [Jop et coll. \(2005\)](#) :

$$\tau_{ij}^p = \eta_p(|\dot{\gamma}|, p^p) \dot{\gamma}_{ij} \quad \text{with} \quad \eta_p(|\dot{\gamma}|, p^p) = \frac{\mu(I)p^p}{|\dot{\gamma}|}, \quad I = \frac{|\dot{\gamma}|d}{\sqrt{p^p/\rho_p}}, \quad \text{and} \quad \mu(I) = \mu_s + \frac{\Delta\mu}{I_0/I + 1}. \quad (18)$$

où  $\dot{\gamma}_{ij} = \partial u_i^p/\partial x_j + \partial u_j^p/\partial x_i$  est le tenseur de taux de déformation avec  $|\dot{\gamma}| = \sqrt{(\dot{\gamma}_{ij}\dot{\gamma}_{ij}/2)}$  son second invariant, et où  $I_0$ ,  $\mu_1$ , and  $\mu_2$  sont des constantes spécifiques du milieu granulaire dépendant notamment du matériau et de la forme des particules.

Pour modéliser l'écoulement diphasique gaz-milieu granulaire, nous choisissons une approche Euler-Euler de deux milieux s'interpénétrant, la fraction volumique gazeuse  $(1 - \phi)$  étant uniforme dans le milieu granulaire par conséquence de l'hypothèse précédente. Au sein de ce milieu gazeux, nous faisons l'hypothèse que le tenseur des contraintes visqueuses de l'écoulement moyen est négligeable devant le cisaillement autour de chaque grain, qui correspond aux forces de traînée. Ainsi, le tenseur des contraintes fluides se réduit à sa partie isotrope (la pression fluide), soit  $\sigma_{ij}^f = -p^f \delta_{ij}$ . Par ailleurs, nous négligeons les effets inertiels ainsi que la force de pesanteur au sein du fluide, qui sont négligeables par rapport à la traînée, [Nield et Bejan \(2006\)](#). Ces hypothèses restent valides tant que  $\rho_f \ll \rho_p$ ,  $D \gg d$  et que le nombre de Froude défini sur l'échelle de longueur de la taille de la particule  $Fr_p = (u^f - u^p)^2/gd \approx Q_{air}^2/(gdD^2) \gg \kappa_i d^{-2}$ . Les valeurs de  $\kappa$  correspondent aux perméabilités et passabilités du fluide dans le milieu poreux constitué par le milieu granulaire, soit dans notre cas pour


 FIGURE 18 – Résultats *Basilisk* de vidange de réservoir à fond incliné

lequel le modèle d'[Ergun \(1952\)](#), s'applique  $\kappa_v = \frac{(1-\phi)^3 d^2}{150\phi^2}$  and  $\kappa_i = \frac{(1-\phi)^3 d^2}{1.75\phi}$ .

Par souci de lisibilité, nous introduisons pour le système d'équations, la vitesse de mélange  $U_i$  définie comme la vitesse pondérée par la fraction volumique, soit  $U_i = \phi u_i^p + (1-\phi) u_i^f$ .

Dans ce cadre, le système d'équations s'écrit

$$\frac{\partial(U_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (19)$$

$$-\frac{\partial p^f}{\partial x_i} = \frac{\eta_f}{\kappa_v}(U_i - u_i^p) + \frac{\rho_f d}{\kappa_i}(U_i - u_i^p)|U_i - u_i^p|, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial(\phi u_i^p)}{\partial x_i} = 0, \quad (21)$$

$$\rho_p \phi \left[ \frac{\partial u_i^p}{\partial t} + u_j^p \frac{\partial u_i^p}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial \sigma_{ij}^p}{\partial x_j} - \frac{\partial p^f}{\partial x_i} + \phi \rho_p g_i. \quad (22)$$

Le système d'équation a été codé dans différentes configurations, permettant notamment de prendre en compte l'espace gazeux au sommet du réservoir et pour différents systèmes de coordonnées (notamment 2D et cylindrique). Le solveur, [Popinet \(2015\)](#), repose sur une méthode de projection de type volumes-finis et l'étape principale de résolution correspond à une équation du type Poisson–Helmholtz<sup>5</sup>. Un traitement spécifique des zones de faible cisaillement a été introduit en prenant en compte une viscosité artificielle, [Lagrée et coll. \(2011\)](#); [Staron et coll. \(2012, 2014\)](#); [Zhou et coll. \(2017\)](#). Plusieurs études de sensibilités ont été menées, notamment en fonction des conditions aux limite appliquées le long des parois du réservoir mais aussi en fonction des paramètres numériques (discrétisations spatiale et temporelle).

**Résultats principaux** Ces travaux numériques ont accompagné l'ensemble des réalisations expérimentales présentées dans les sections précédentes avec des développements spécifiques :

- Afin de reproduire l'effet de l'épaisseur du silo sur la vidange (et du rapport d'aspect  $D/W$ , nous avons considéré une représentation bi-dimensionnelle des réservoirs (en intégrant dans la direction de l'épaisseur) et introduit une force supplémentaire pour traduire le frottement pariétal (en faisant une analogie avec la configuration d'Hele-Shaw et en supposant que le frottement obéit à une loi de type Coulomb  $-\mu_w p^p$ ). L'intensité de ce terme est ainsi, en 2D, inversement proportionnel à l'épaisseur  $W$ . Cette technique a été également appliquée aux réservoirs avec un fond incliné. La figure 18 illustre que la simulation numérique permet de reproduire l'impact de la géométrie sur le débit.
- afin de reproduire l'effet de l'écoulement gazeux sur la vidange, la résolution du système d'équations (19-22) a été réalisée dans un premier temps pour un système avec une pression gazeuse

5. <http://basilisk.fr/src/poisson.h>



imposée constante au sommet de colonne, voir figure 19. L'analyse des résultats montre que le débit granulaire et le gradient de pression dans la zone de sortie sont corrélés par une loi identique à celle obtenue expérimentalement. Le post-traitement de la moyenne spatiale du gradient de pression à la sortie permet de relier les coefficients empiriques de cette loi à l'étendue de la zone où le gradient est important. Dans un second temps, la configuration avec rupture de l'orifice a également été simulée en supposant que l'air obéit à une loi de type gaz parfait en suivant une évolution isotherme. Les courbes de la figure 20 illustrent la cohérence entre le comportement numérique et celui des expériences, idéalisé par le modèle quasi-stationnaire sur ces figures.

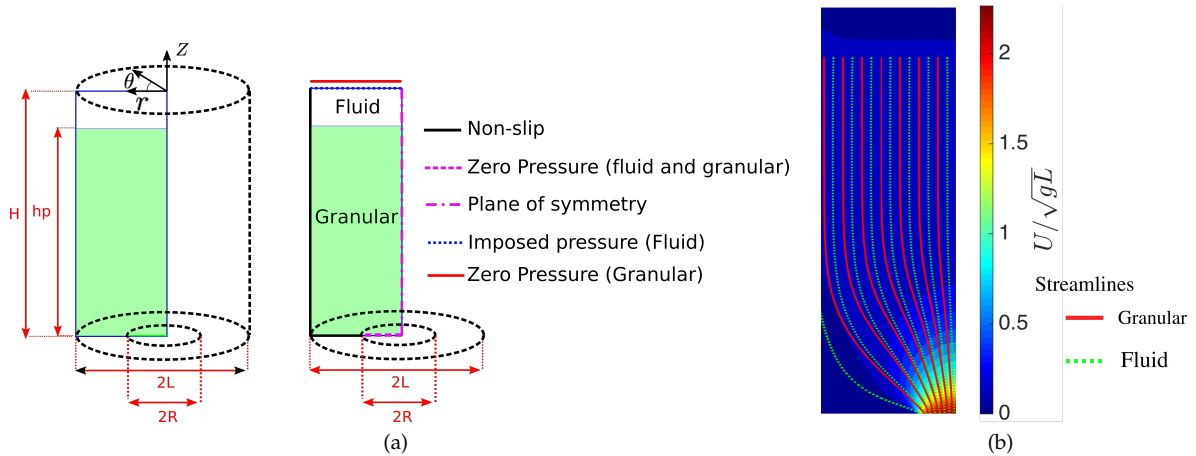
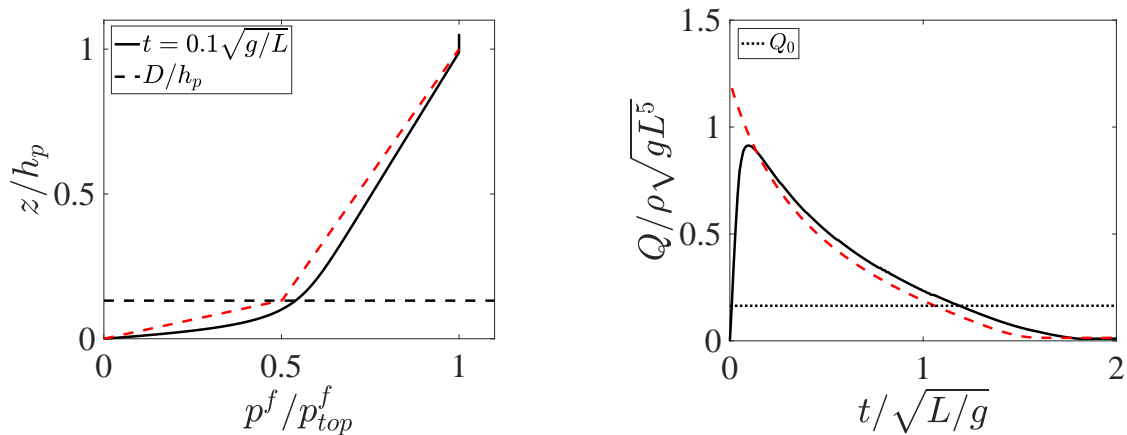


FIGURE 19 – Illustration de la dynamique d'une vidange prédite numériquement. (a) Configuration du calcul et (b) champ de couleur : norme de la vitesse normalisée du milieu granulaire, lignes de courant fluide et granulaire.



(a) Profil de pression fluide normalisée  $p^f/p_{top}^f$  vertical au centre du silo à un instant particulier

(b) Évolution temporelle du débit granulaire normalisé  $Q/\rho\sqrt{gL^5}$ .

FIGURE 20 – Confrontation entre les résultats numériques (lignes continues noires) et le modèle quasi-stationnaire (lignes pointillées rouges) avec les paramètres suivants (correspondance explicitées dans Zou (2019))  $A = 0.28$ , for  $R = 0.25L$ ,  $h_p^0 = 3.8L$  and  $p_{top}^f(0) = 40\rho gL$ ,  $B_l = 25\rho\sqrt{g/L}$ ,  $B_{i0} = 6.3\rho/L$  et  $R_{f0} = 0.002\rho$ .

### 3.4.6 Conclusion - perspectives

Ces travaux de recherche ont clairement permis d'identifier les lois gouvernant les débits de grains et de gaz dans des configurations fortement similaires à celle d'intérêt. En outre, la démarche a permis de reproduire ces comportements à l'aide d'une modélisation relativement mécaniste de la dynamique de ces milieux. L'approche numérique correspondante permet a priori d'étudier des configurations variées et donc d'extrapoler le comportement observé à des conditions d'intérêt. Les lois déterminées lors de la thèse de Zhou (2016) ont par ailleurs été intégrées dans l'outil de simulation d'une interaction combustible réfrigérant et celles issues de Zou (2019) le seront à l'occasion des prochains développements. La poursuite des travaux sur ces dynamiques concernent notamment un projet de collaboration avec Ph. Lafon (IMSIA) autour du développement d'une approche numérique permettant à la fois de résoudre cette dynamique granulaire et de traiter la problématique des transferts de chaleur et de masse au sein du fluide. Sur les aspects purement granulaires, des perspectives de recherche ont été dégagées qui vont au-delà de l'application au cas accidentel : j'ai participé à l'élaboration d'une proposition ANR en 2018 autour d'une collaboration entre l'IRSN, l'IUSTI, le LMGC et d'Alembert sur la thématique du frottement pariétal d'un milieu granulaire (projet GRAPA non sélectionné). Des articles de valorisation des résultats obtenus par Z. Zou sont actuellement en rédaction.

## 4 Transferts de masse et de chaleur

Lili Prune inventa l'eau chaude, l'eau froide, l'eau tiède chaude, l'eau tiède un peu chaude, l'eau tiède froide, l'eau tiède un peu froide et l'eau tiède tiède. Pour prendre des bains à différentes températures.

*La revanche de Lili Prune*  
Claude Ponti

Le changement de phase liquide-vapeur de l'eau est le mécanisme fondamental pour expliquer l'efficacité des transferts thermiques en situation d'ébullition. À l'échelle des structures diphasiques, il est déterminé par le couplage entre transfert de masse et de chaleur à l'interface. L'efficacité globale dépend quant à elle de la configuration topologique du milieu diphasique (notamment la densité volumique d'aire interfaciale) et du transport hydrodynamique (flottabilité, convection) des structures.

Les travaux auxquels j'ai contribué dans ce domaine concernent à la fois différentes configurations des écoulements bouillants (en réservoir ou en bassin, en écoulement convectif), selon différents régimes (ébullition nucléée, en film annulaire inversé, en film à gouttes dispersées) et à différentes échelles (interface d'une inclusion d'une phase dans une autre, propriétés statistiques locales d'un écoulement diphasique, flux de chaleur pariétal en fonction des conditions macroscopiques de l'écoulement).

### 4.1 Description interfaciale

Les systèmes diphasiques auxquels je me suis intéressé correspondent à un mélange entre un liquide volatil et un mélange gazeux constitué de sa vapeur et d'incondensables. La variété des configurations topologiques de la répartition spatiale des phases mène à une diversité de comportements phénoménologiques des phénomènes de transport (convection, chaleur). Pour les configurations dites à phase dispersée (bulles et gouttes), la détermination de la densité volumique d'aire interfaciale est un paramètre dominant dans la modélisation de ces écoulements. C'est que l'interface est une singularité déterminante pour les transferts de chaleur et de masse. Dans cette section, je présente des travaux qui portent sur la modélisation de certains phénomènes interfaciaux. Après avoir introduit des relations génériques permettant de décrire les propriétés de cette interface comme une surface de discontinuité, j'évoquerai les travaux portant sur la modélisation :

- des propriétés thermodynamiques d'un fluide diphasique ;
- d'un fluide diphasique de type champ de phase pour la simulation numérique d'écoulements avec une représentation de ces discontinuités ;
- des phénomènes diphasiques en présence d'incondensables.

#### 4.1.1 Relations de saut

Dès lors que l'on se situe à des niveaux de pression et température relativement éloignés du point critique du fluide considéré, l'interface correspond à une zone de transition entre les phases d'épaisseur négligeable. Ainsi, il est justifié de suivre l'approche développée par [Gibbs et Chatelier \(1899\)](#). On se place alors dans le formalisme de la description des phénomènes irréversibles par la thermodynamique hors-équilibre tel que décrit dans [de Groot et Mazur \(1984\)](#). En appliquant les principes fondamentaux à un système liquide-vapeur, on montre que si on considère l'interface comme une surface géométrique ne portant pas de masse, il vient les relations de saut suivantes<sup>6</sup> :

$$\llbracket u_n \rrbracket = \dot{m} \llbracket v \rrbracket \quad (23a)$$

$$\llbracket P \rrbracket = \sigma \mathcal{K} - \dot{m}^2 \llbracket v \rrbracket \quad (23b)$$

$$\dot{m} \llbracket h \rrbracket = \llbracket k \nabla T \cdot \vec{n} \rrbracket - \dot{m}^3 \llbracket v \rrbracket \{v\} \quad (23c)$$

$$\{T\} \phi_s = -\dot{m} (\llbracket g \rrbracket + \llbracket T \rrbracket \{s\} + \dot{m}^2 \llbracket v \rrbracket \{v\}) \quad (23d)$$

On note  $\llbracket X \rrbracket$  et  $\{X\}$  respectivement les sauts et valeurs moyenne à l'interface et les grandeurs physiques sont ici  $u$ , la vitesse,  $\dot{m}$  le taux de transfert de masse,  $v$  le volume spécifique,  $P$  la pression,  $\sigma$  la tension superficielle,  $\mathcal{K}$  la courbure locale de l'interface,  $h$  l'enthalpie massique,  $k$  la conductivité thermique<sup>7</sup>,

6. On n'introduit pas ici le bilan de quantité de mouvement dans la direction tangentielle à l'interface qui n'est pas l'objet des développements.

7. On se place dans le cadre d'application de la loi de Fourier.

$\phi_s$  le taux de création d'entropie massique à l'interface,  $g$  l'enthalpie libre massique, et  $s$  l'entropie massique. Ces équations sont les bilans à l'interface écrits de manière générique avec dans l'ordre : le bilan de masse, celui de quantité de mouvement projeté selon la normale à l'interface, le bilan d'énergie et le bilan d'entropie. Les trois premiers bilans permettent notamment de retrouver les conditions d'équilibre ( $\dot{m} = 0$ ) à l'interface : absence de saut de vitesse, relation de Laplace, bilan de chaleur équilibré. Les conditions de Gibbs supplémentaires (continuité de la température et du potentiel chimique) ne sont pas strictement imposées par le bilan interfacial d'entropie et le problème reste globalement incomplet tant qu'une forme particulière pour le taux de création d'entropie à l'interface  $\phi_s$  n'a pas été modélisée.

L'application du second principe implique la positivité de  $\phi_s$  et l'expression explicite du membre de droite revient à définir une relation cinétique particulière. Une fermeture particulière correspond à une nullité de  $\phi_s$  et une absence de saut de température, soit

$$[[T]] = 0 \quad (24a)$$

$$\dot{m} \underbrace{T_{int}(s_v - s_l)}_{\mathcal{L}} = [[k\nabla T]] \quad (24b)$$

$$[[g]] = -\dot{m}^2 [[v]]\{v\} \simeq 0 \quad (24c)$$

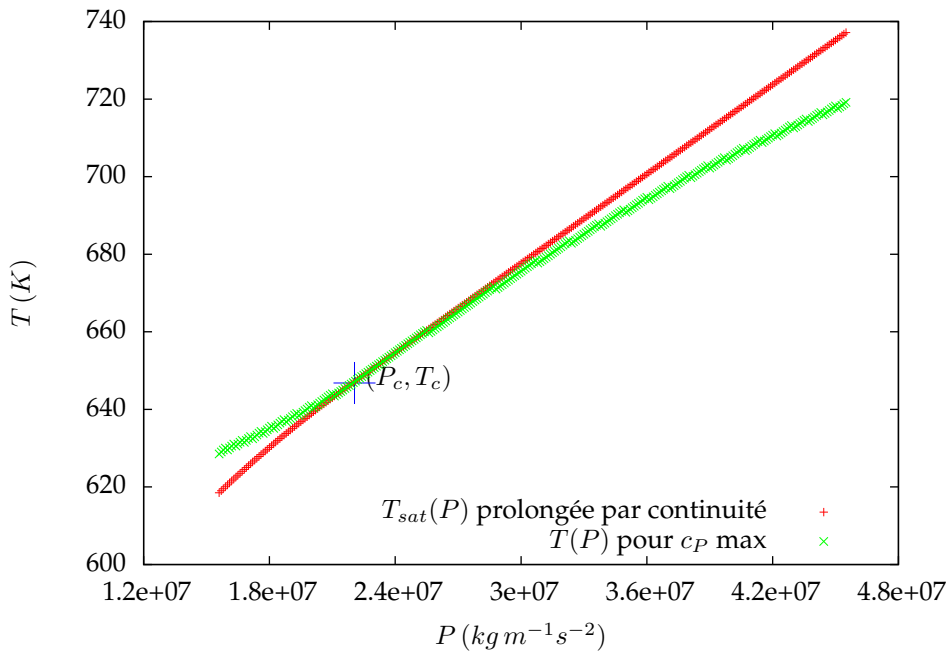
où on note  $\mathcal{L}$  la chaleur latente de changement de phase et  $T_{int}$  la valeur particulière de la température d'interface. Ces relations ne sont donc pas une généralité [Bedeaux et Kjelstrup \(2004\)](#) et d'autres expressions permettent de définir une résistance d'interface, qui reste, notamment pour le changement de phase liquide-vapeur de l'eau, une notion en débat.

#### 4.1.2 Description des propriétés thermodynamiques des phases

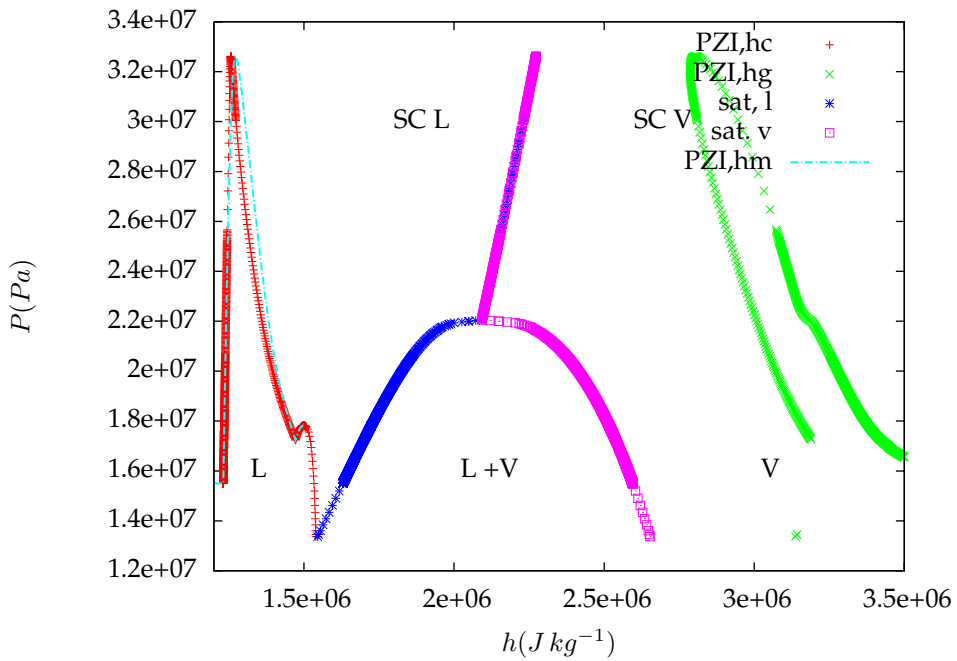
Dans le cadre de la description des phénomènes relatifs à l'interaction combustible réfrigérant, je suis responsable du logiciel CIGALON, développé à l'IRSN. Ce logiciel, développé depuis 1995, permet une résolution numérique du couplage entre trois systèmes physiques : le crayon combustible qui agit comme un réservoir de combustible chaud et de gaz, la zone d'interaction au sein de laquelle on décrit les transferts de masse et de chaleur entre les matériaux éjectés du crayon et le fluide à leur contact, et le fluide environnant qui détermine les conditions limite de la mécanique d'expansion de la zone d'interaction. Il applique en cela les principaux modèles définis par [Cho et coll. \(1972\)](#). Dans les calculs considérés, les pression et température fluide varient sur des échelles relativement importantes [100-3000K] et [ $10^5$ - $10^7$ Pa] sur des échelles de temps relativement courtes [ $10^{-3}$ - $10^{-2}$ s]. Le logiciel décrit ainsi les propriétés thermodynamiques de l'eau à l'aide d'une expression de l'énergie libre  $f(\rho, T)$ , issue de la littérature, [Haar et coll. \(1984\)](#). Ainsi, une formulation unique représente l'ensemble des états liquide, vapeur et supercritiques et introduit naturellement les domaines de stabilité, métastabilité et instabilité du fluide. Le logiciel modélise dans la zone d'interaction le fluide comme se répartissant en une masse liquide et une masse vapeur, séparées par une interface à saturation. Valide jusqu'au point critique, cette formulation ne permet pas de décrire les états au-delà. Néanmoins, il semble licite de considérer que pendant la courte excursion au-delà du point critique lors des calculs, la zone initialement liquide (dense et froide) ne se mélange pas instantanément avec la zone initialement vapeur (peu dense et chaude). Parmi les évolutions du logiciel que j'ai définies et encadrées, [Ruyer \(2013b\)](#), j'ai notamment proposé une formulation étendant la notion de saturation au delà du point critique (qui est un domaine parcouru lors des calculs) en me basant sur les travaux de [Imre et coll. \(2012\)](#) et en identifiant une pseudo-saturation comme le lieu d'inflexion de l'enthalpie fluide, [Ruyer \(2011a\)](#) tel qu'illustré par la courbe du haut de la figure 21. La courbe du bas illustre alors les états thermodynamiques successifs des systèmes liquide et vapeur lors d'un transitoire d'interaction combustible réfrigérant calculé par le logiciel CIGALON.

J'ai également encadré la mise en place, dans le cadre d'une prestation, d'un formalisme similaire pour la description du  $CO_2$ , fluide utilisé pour des expériences décrites en section ?? en se basant sur les travaux de [Span et Wagner \(2003b,a\)](#).

Il n'est pas trivial de décrire de manière précise et rigoureuse les propriétés des fluides. La force principale de la formulation proposée dans le logiciel CIGALON est de reposer sur une unique formulation analytique dont les combinaisons de dérivées numériques permettent de déduire l'ensemble des propriétés nécessaires à la description du système et de son évolution. Cela permet notamment d'obtenir de très bonnes performances lors de l'évaluation des erreurs sur les bilans globaux (notamment de masse et d'énergie) lors des étapes de résolution.



(a) Courbe de pseudo saturation de l'eau définie par  $c_P$  max pour  $P > P_c$



(b) Diagramme de Mollier de l'eau avec courbe de pseudo saturation. En bleu la saturation de l'eau liquide, en violet, la saturation de l'eau vapeur. Autres couleurs : schématisation des états lors d'un transitoire de 4ms calculé par le logiciel CIGALON : rouge, état de l'eau liquide, vert, état de l'eau vapeur, bleu clair, enthalpie du mélange liquide-vapeur.

FIGURE 21 – Modélisation des propriétés thermodynamiques de l'eau jusque des domaines au delà du point critique.

### 4.1.3 Résolution numérique des écoulements avec interface

**Complexité de la gestion numérique des discontinuités et nécessaire régularisation spatiale** La principale difficulté numérique dans la simulation des systèmes diphasiques reste la description de l'interface qui est une frontière mobile (convection et transfert de masse), constituant à la fois une frontière à laquelle s'applique la condition limite des transferts thermiques (température d'interface), portant une force associée à la courbure locale (tension superficielle) et une frontière à travers laquelle se localisent de nombreuses discontinuités (sauts de propriétés, et en premier lieu la masse volumique, ou de flux, notamment de chaleur). Plusieurs techniques numériques peuvent être considérées pour résoudre ces problématiques :

- maillage mobile, l'interface correspondant à des arêtes du maillage de la zone fluide ;
- maillage superposé, l'interface étant décrite par un ensemble de marqueurs lagrangiens (front tracking) ;
- représentation implicite via la localisation d'un niveau arbitraire d'une fonction indicatrice (volume of fluid, level-set, second-gradient ou champ de phase).

Toutes ces formulations, du fait de la discrétisation spatiale des différents termes des équations ou du processus de transport de la frontière mobile, ou encore du fait d'étapes de régularisation mathématique pour maîtriser la diffusion numérique, induit, plus ou moins explicitement, une épaisseur numérique à la zone de transition entre les phases. Il reste difficile de maîtriser l'ensemble du schéma de résolution afin qu'à convergence l'ensemble des bilans (masse, quantité de mouvement et énergie) soient vérifiés à un niveau de précision satisfaisant. Le cas test de l'équilibre d'une bulle en l'absence de gravité est à ce titre un des exercices les plus difficiles et la seule prise en compte de la tension superficielle (dans une approche isotherme) génère des circulations fluides non-physiques, les courants dits parasite. Même dans le cadre d'une modélisation de l'interface comme une zone de transition continue sur la base des principes fondamentaux de la thermodynamique (approche dite du second gradient issue des travaux fondateurs sur la capillarité [van der Waals \(1979, 1894\)](#)), qui permet d'appliquer des schémas de résolution de la mécanique des fluides classique (en l'absence des problématiques de singularité associée à la présence de l'interface), la maîtrise de ces courants nécessite des formulations spécifiques, [Jamet et coll. \(2002\)](#).

**Un modèle thermodynamique motivé par des contraintes numériques** Le succès de la résolution numérique d'un fluide diphasique sur la base de la théorie du second gradient repose sur l'intérêt numérique d'une description de l'interface comme une zone de transition continue au sein de laquelle on peut continuer à appliquer les schémas de résolution ayant fait leur preuve au sein des domaines monophasiques. Néanmoins, dans le cadre de la théorie classique de la capillarité, l'épaisseur de la zone de transition est intimement liée à l'énergie libre du fluide et on ne peut la décorréler des autres propriétés macroscopiques, notamment la tension superficielle. Ainsi, l'épaisseur physique de cette zone de transition est excessivement faible et nécessite une discrétisation spatiale tellement fine pour être résolue que la méthode n'est pas applicable à des domaines de la taille d'une bulle ou d'une goutte dès lors qu'on ne considère pas le voisinage du point critique. Son champ d'application est donc trop réduit.

L'idée des travaux menés lors de ma thèse est ainsi de développer une modélisation thermodynamique artificielle de la zone de transition continue venant ajouter des degrés de liberté dans sa paramétrisation afin de définir l'épaisseur de cette zone indépendamment des propriétés du fluide que l'on souhaite décrire. Ce concept avait été développé notamment pour des applications pour les transitions de phase solide-solide en introduisant une variable indicatrice de phase dite champ de phase<sup>8</sup> notée  $\varphi$ . Afin de tester dans un cadre relativement simple cette formulation, on considère un fluide modèle composé de deux phases liquide et vapeur et des lois de comportement simplifiées. J'ai ainsi proposé l'écriture d'une enthalpie spécifique du fluide comme :

$$g = v(\varphi) \left( P - P_{eq}(T) + \lambda \left[ W(\varphi) + \frac{h^2}{2} (\nabla\varphi)^2 \right] \right) + g_{eq}(T) \quad (25)$$

où

- le volume massique se réduit à la fonction  $v(\varphi)$  (du fait de la linéarité de  $g$  en fonction de  $P$ ) et est une fonction d'interpolation  $\nu$  entre la valeur supposée constante dans chacune des phases  $v_{vap}$  et  $v_{liq}$ ,  $v(\varphi) = v_{vap}\nu(\varphi) + v_{liq}(1 - \nu(\varphi))$  ;

8. Bien que dans le cas des applications solide-solide, l'approche physique la plus naturelle soit de choisir l'entropie comme paramètre d'ordre.



- une variation de  $P_{eq}(T)$  suffit à introduire une relation de Clapeyron et donc une chaleur latente  $dP_{eq}/dt = \mathcal{L}/[T(v_{vap} - v_{liq})]$ ;
- le paramètre  $\lambda$  permet de définir une échelle de tension superficielle  $\sigma = \lambda/h$  indépendante de l'échelle de l'épaisseur à l'équilibre de la zone de transition  $h$ ;
- le terme en  $(\nabla\varphi)^2$  et la fonction double puits  $W$  permettent de stabiliser les états intermédiaires entre liquide et vapeur au sein de la zone de transition (reprenant ici l'idée d'origine de la théorie de la capillarité);
- la fonction  $g_{eq}(T)$  permet de définir une échelle pour la capacité calorifique massique  $c_P$  du fluide.

Les conditions d'équilibre d'un tel fluide s'écrivent alors

$$\nabla T = 0 \quad (26a)$$

$$\nabla g = 0 \quad (26b)$$

$$\tilde{\mu} \doteq \frac{\partial g}{\partial \varphi} - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \left( \rho \frac{\partial g}{\partial \nabla \varphi} \right) = 0 \quad (26c)$$

Nous avons également déterminé les équations de la stabilité d'un équilibre monophasique (correspondant à  $\nabla\varphi = 0$ ). Nous avons alors montré comment les choix particuliers (illustrés sur la figure 22) :

- d'un polynôme d'ordre 4 pour la fonction double puits  $W$ ;
- d'un polynôme d'ordre 5 pour la fonction d'interpolation  $\nu(\varphi)$ ;

étaient nécessaire et suffisant à l'obtention des propriétés suivantes :

- le profil de  $\varphi$  pour l'équilibre d'une interface plane est une tanh;
- la courbure de l'interface induit une faible dyssymétrie du profil tant que son rayon est grand devant l'épaisseur à l'équilibre du cas plan; la relation de Laplace est alors retrouvée. Pour des courbures fortes, l'énergie en excès ne diverge pas et permet de traiter numériquement les phénomènes de nucléation ou de collapse;
- en imposant l'égalité des masses volumiques des phases liquide et vapeur, le modèle proposé permet de décrire des transitions de phase du type solide-liquide ou solide-solide et dégénère en un modèle de champ de phase de la littérature dont les propriétés mathématiques ont été étudiées, [Benzoni-Gavage et coll. \(2012\)](#).

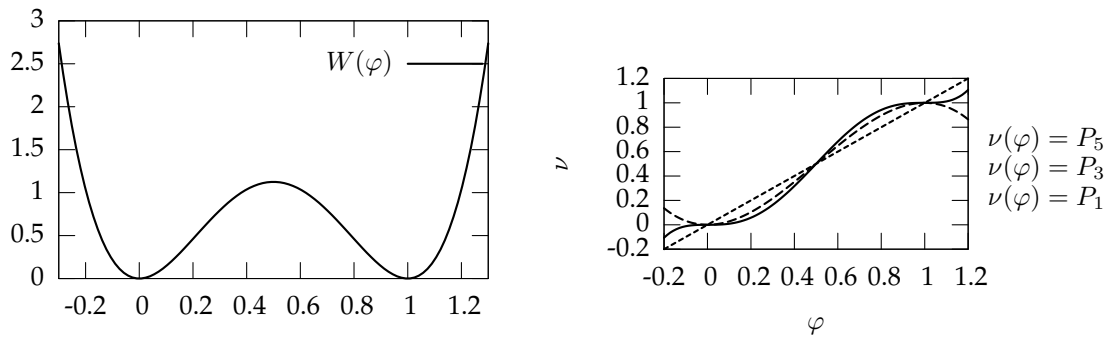


FIGURE 22 – Fonction double puits, graphe de gauche, et fonctions d'interpolation de degré 1, 3, et 5, graphe de droite, utilisées dans l'étude du modèle thermodynamique.

Après avoir établi les équations de la dynamique d'un tel fluide à partir des principes fondamentaux, introduit les phénomènes dissipatifs et démontré l'existence de 14 paramètres cinétiques, nous avons alors considéré des fermetures classiques (viscosité de type Newton et conductivité thermique de type Fourier) et introduit une équation de relaxation de type Ginzburg-Landau pour la cinétique de retour à l'équilibre portée par le potentiel chimique  $\tilde{\mu}$

$$\frac{d\varphi}{dt} = - \underbrace{\kappa}_{>0} \tilde{\mu} \quad (27)$$

Cette relaxation permet tout à la fois de contrôler que la température de l'interface relaxe vers la température d'équilibre classique et que le profil de  $\varphi$  dans la zone de transition garde une épaisseur d'ordre  $h$ . Cette relaxation introduit une relation cinétique interfaciale. En utilisant l'approche des développements asymptotiques raccordés (et en considérant l'épaisseur de l'interface  $h$  comme le petit paramètre),

cette relation s'écrit

$$\phi_s \propto \frac{\dot{m}^2}{\kappa} \quad (28)$$

au premier ordre en fonction de l'épaisseur de l'interface, les ordres supérieurs pouvant être associés à des variations de la conductivité thermique au sein de la zone de transition. Ce premier ordre correspond à une non-nullité de  $\tilde{\mu}$  dans la zone de transition ce qui correspond à la fois à un écart à la relation d'équilibre des phases  $g_l = g_v$  et à une distorsion du profil de  $\varphi$  par rapport à la solution d'équilibre. En ce qui concerne le premier écart, il est ainsi équivalent à la théorie de la croissance normale (Truskinovsky (1994)) :

$$(\{P\} - P_{eq}) \llbracket 1/\rho \rrbracket - (\{T\} - T_{eq}) \llbracket s \rrbracket \propto \dot{m} \Leftrightarrow \phi_s \propto \dot{m}^2$$

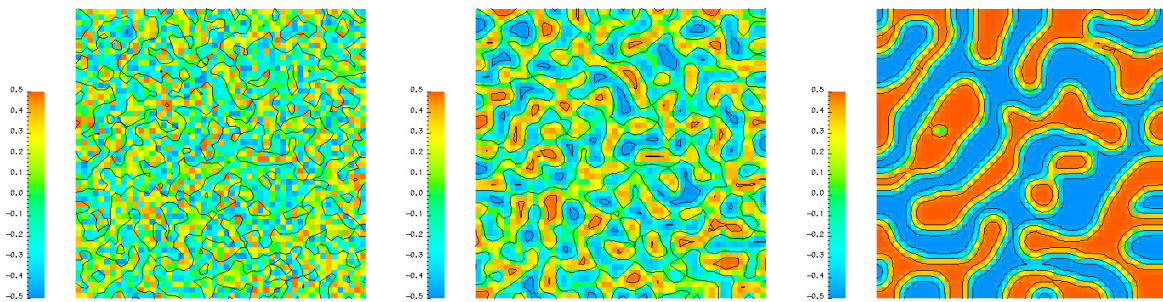
**Stabilité et métastabilité** La stabilité des états homogènes monophasiques a été étudiée en prenant en compte les phénomènes dissipatifs. La stabilité à une perturbation linéaire permet d'étudier la relation de dispersion en fonction des choix particuliers de la fermeture du modèle champ de phase et notamment de la fonction d'interpolation. Nous avons montré alors qu'il est nécessaire et suffisant d'utiliser le polynôme de degré 5 retenu pour que seules les solutions  $\varphi = 0$  et  $\varphi = 1$  correspondent à des solutions monophasiques à l'équilibre stable, et qu'il est possible par ailleurs de déterminer un domaine de métastabilité indépendamment du choix de l'épaisseur de l'interface.

**Simulation numérique** Ces travaux ont considéré la résolution de problèmes de complexité croissante et le développement de schémas numériques correspondants, à savoir :

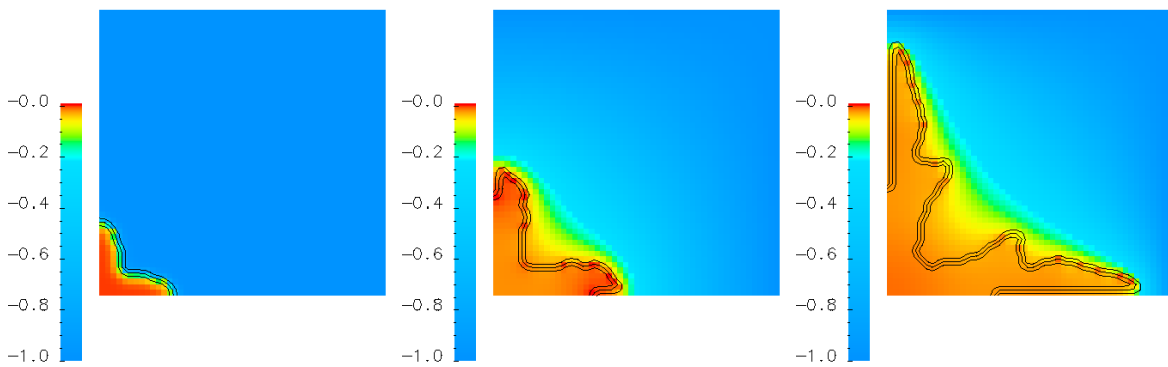
- changement de phase sans différence de densité à l'aide d'un schéma partiellement implicite :
  - résolution du problème de Stefan d'un changement de phase stationnaire ;
  - changement de phase instationnaire et comparaison à la solution analytique de Lemonnier et coll. (2005) ;
  - séparation de phase (décomposition spinodale) (illustrée sur la figure 23a) ;
  - croissance dendritique (illustrée sur la figure 23b) ;
- dynamique isotherme avec différence de densité à l'aide d'un schéma de projection et d'une linéarisation de l'équation de relaxation (permettant de réduire la résolution à une étape implicite couplant équation de Poisson et équation de relaxation) :
  - changement de phase 1D imposé par une poussée liquide jusqu'au collapse de la poche de vapeur, comparé aux solutions analytiques déterminées par ailleurs et illustrant la relation cinétique du type croissance normale ;
  - dynamique d'une inclusion 2D (illustration sur la figure 24) montrant la capacité de la méthode à prendre en compte gravité et capillarité (le changement de phase local est dans ce cas négligeable devant les autres dynamiques) ;
- changement de phase liquide-vapeur anisotherme sur la base d'un algorithme similaire au cas précédents (illustrations non reproduites ici mais dans la thèse) :
  - cas test 1D dit de l'auto-cuiseur : dans un système fermé, on apporte un flux de chaleur constant en paroi venant générer changement de phase et augmentation de la pression en suivant la courbe de saturation ;
  - cas test de condensation 1D en milieu semi-ouvert, comparaison avec un modèle théorique ;
  - cas tests 2D : ces travaux se sont limités à tenter de reproduire les dynamiques 1D ci-dessus et ont montré que le schéma retenu initialement générait des courants parasites. L'analyse a permis de montrer que la partie irrotationnelle du vecteur capillaire du bilan de quantité de mouvement  $\left( \frac{\partial W}{\partial \varphi} - h^2 \Delta \varphi \right) \nabla \varphi$  était à l'origine de ces courants. Le schéma proposé pour contraindre ces courants s'est avéré coûteux numériquement et difficile à généraliser.

**Perspectives** Même si mes travaux dans ce domaine n'ont pas été poursuivis, on peut dégager ici quelques perspectives générales. L'approche champ de phase pour décrire les transitions de phase liquide-vapeur est aujourd'hui encore un domaine actif de recherche, p. ex. Pan et coll. (2019); Guo et Lin (2015). Certes, il faut continuer à voir l'introduction d'une variable de champ de phase comme un artifice de modélisation motivé par les contraintes numériques, puisque la théorie classique de la capillarité de van der Waals suffit à expliquer les phénomènes observés. La puissance des théories non-locales doit également être considérée comme étant un modèle minimal permettant tout à la fois de :

- proposer des mécanismes physiques à la capillarité et à la structure de l'interface et des états homogènes instables ;



(a) Décomposition spinodale à partir d'un champ 2D aléatoire de  $\varphi \in [-0.5 : 0.5]$  (valeurs prises dans les phases stables pour ce cas), champ de couleur correspondant à  $\varphi$  et isocontours  $\varphi = -0.25, 0, 0.25$ . Capture à différents instants depuis l'état initial.



(b) Croissance d'un grain solide au sein d'un liquide, la température de la frontière extérieure (bords haut et droit) est imposée plus faible que la température d'équilibre. Les conditions limites aux bords bas et gauche sont des conditions de symétrie. Simulation numérique 2D, iso  $\varphi$  en ligne noire, colorisation par champ de température sans dimension (valeur d'équilibre à 0). Notons la régularité de l'épaisseur de la zone interfaciale malgré la courbure locale.

FIGURE 23 – Illustration des résultats du modèle de champ de phase pour des dynamiques de décomposition spinodale ou de croissance dendritique.

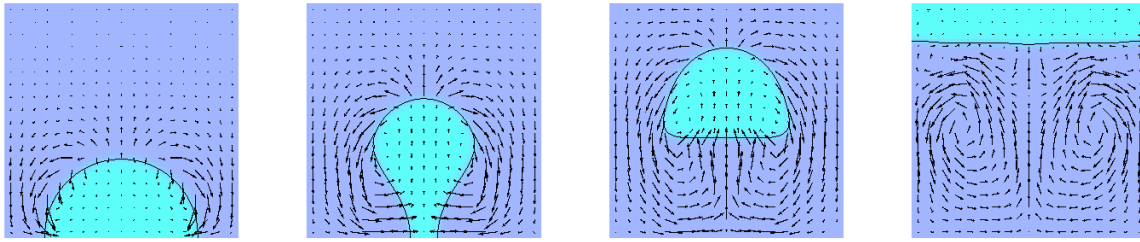


FIGURE 24 – Ascension d’une bulle sous l’action de la gravité dans une boîte fermée, calcul 2D isotherme. Le champ de couleur correspond à  $\varphi$  (clair=vapeur, foncé=liquide) et l’isocontour  $\varphi=0.5$  est tracée ainsi que le champ des vecteurs vitesse. Condition limite d’angle de contact perpendiculaire à la paroi.

- décrire les mécanismes thermodynamiques dissipatifs qui génèrent une résistance d’interface, [Bedeaux et Kjelstrup \(2004\)](#);
- étudier des théories non classiques de la nucléation, [Karthika et coll. \(2016\)](#).

#### 4.1.4 Présence d’incondensables

**Une modélisation** On s’intéresse à la détermination des transferts couplés de masse,  $\dot{m}$  (donnant lieu à la vitesse de déplacement de l’interface  $w$ ), de chaleur (nombres de Nusselt  $Nu$  de part et d’autre de l’interface) et d’espèce (nombre de Sherwood  $Sh$ ) pour un système (schématisé sur la figure 25) composé d’un liquide dans l’état thermodynamique  $(P_l, T_l)$  d’épaisseur  $L_l$  et séparé d’un mélange de vapeur et d’incondensables à l’état thermodynamique  $(P_g, T_g, \omega_{v,g})$  d’épaisseur  $L_g$ .

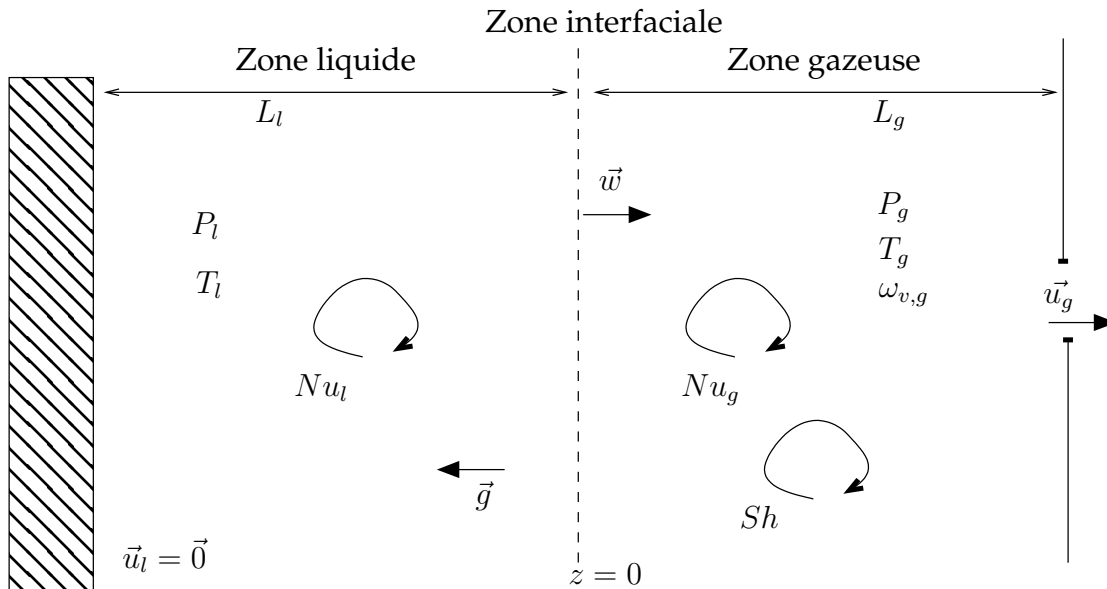


FIGURE 25 – Schéma de la configuration type du système considéré

Dans un premier temps, on a établi les relations de saut en présence de flux d’espèces en utilisant les principes de modélisation de la thermodynamique des processus irréversibles dans le cadre de l’hypothèse des mélanges idéaux. On a également précisé sur quel domaine il est possible, pour un mélange gazeux constitué de vapeur d’eau et d’un mélange de gaz incondensables ayant un comportement de

gaz parfait, d'utiliser la relation simplifiée de Raoult. On aboutit alors au système d'équations suivant :

$$\llbracket u_n \rrbracket = \dot{m} \llbracket v \rrbracket \quad (29a)$$

$$\dot{m} (1 - \omega_{int}) = -\rho \mathcal{D} \nabla \omega \cdot \vec{n} \quad (29b)$$

$$\dot{m} \mathcal{L}(P_{int}, T_{int}) = \llbracket k \nabla T \cdot \vec{n} \rrbracket \quad (29c)$$

$$T_{int} = T_{sat}(x_{v,int} P) \quad (29d)$$

$$x_{v,int} = \omega_{int} \frac{M_{H2o}}{M_g} \quad (29e)$$

pour lequel il est nécessaire de résoudre les flux (et donc notamment les gradients de température et de fraction massique des espèces  $\omega$ ) à l'interface.

Pour plusieurs cas simples (monodimensionnels et stationnaires) on a présenté la solution analytique du problème de transport de part et d'autre de l'interface et de la relation particulière entre le taux de transfert de masse interfacial et les forces motrices à son origine. Ainsi, on a établi que l'écoulement, dit de Stefan, induit par ce taux de transfert de masse avait un impact important sur le transport d'énergie et/ou d'espèce au sein de la phase gazeuse. En reprenant les études historiques de Stefan, [Stefan \(1873\)](#); [Strnad \(2013\)](#), sur la problématique d'un transfert de masse isotherme piloté par la diffusion d'espèce, on a par exemple considéré la solution analytique d'un changement de phase monodimensionnel piloté par une surchauffe de la vapeur imposée à une distance  $\delta$  de l'interface et prenant en compte l'effet de souffle au sein de cette couche (le liquide étant supposé à l'équilibre avec l'interface). Dans ce cas, le problème est piloté par le nombre de Peclet  $Pe = \frac{\delta \dot{m} c_P}{k}$  et le profil de température entre l'interface et la distance  $\delta$  est donné par

$$T = \frac{(\exp(\text{Pe } z) - 1)}{(\exp(\text{Pe}) - 1)} \quad (30)$$

tel qu'illustré sur la figure 26, le taux de transfert de masse étant déterminé par la relation  $Pe = \log\left(1 + \frac{c_P \Delta T}{\mathcal{L}}\right)$ . Les diverses relations analytiques établies à partir du problème historique de Stefan permettent de constituer des cas-test d'intérêt pour la vérification des résolutions numériques.

Dans un cadre plus général pour lequel les mécanismes de transport sont modélisés par des relations de fermeture utilisées à une échelle plus macroscopique, on a proposé de prendre en compte l'effet de l'écoulement de Stefan par un facteur correctif aux relations établies dans des situations sans transfert de masse.

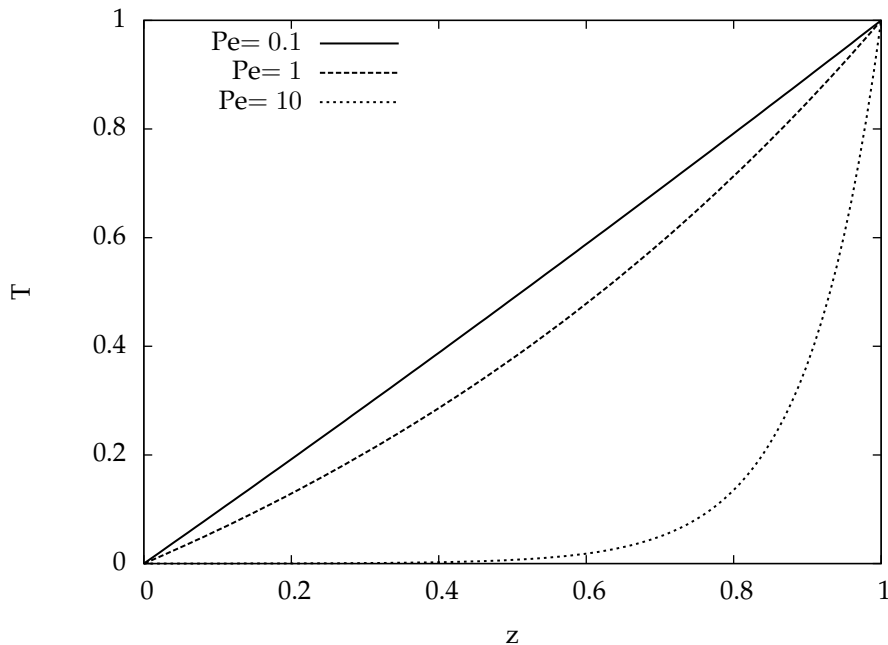


FIGURE 26 – Allure du profil de température suivant l'intensité de la surchauffe, température adimensionnelle en fonction de la distance à l'interface.

En partant d'un système liquide gaz pour lequel on suppose connus les états au sein de chacune des phases, une topologie simplifiée, ainsi que des coefficients d'échange (de chaleur et d'espèce) entre

les phases et l'interface, on a écrit que la détermination de l'intensité du transfert de masse et l'état thermodynamique de l'interface étaient liés par le système d'équation suivant

$$\dot{m}(1 - \omega) = -\rho \mathcal{D} \nabla \omega \cdot \vec{n} \quad (31a)$$

$$\dot{m} \mathcal{L}(T_{int}, P) = \llbracket k \nabla T \cdot \vec{n} \rrbracket \quad (31b)$$

$$T_{int} = T_{eq}(P, x_{int}) \quad (31c)$$

pour lesquels les flux à l'interface peuvent être exprimés en introduisant des nombres sans dimension classiques et des échelles de longueur  $L_l$  et  $L_g$  pour les transferts de part et d'autre de l'interface

$$k_l \nabla T_l \cdot \vec{n} = -k_l Nu_l L_l^{-1} (T_l - T_{int}) \quad (32a)$$

$$k_g \nabla T_g \cdot \vec{n} = k_g Nu_g^* L_g^{-1} \underbrace{\frac{Pe^{th}}{\exp(Pe^{th}) - 1}}_{\zeta(Pe^{th})} (T_g - T_{int}) \quad (32b)$$

$$j_{v,int} = -\rho \mathcal{D} Sh^* L_g^{-1} \underbrace{\frac{Pe^m}{\exp(Pe^m) - 1}}_{\zeta(Pe^{th})} (\omega_{v,int} - \omega_{v,g}) \quad (32c)$$

$$Pe^{th} \hat{=} \dot{m} \frac{L_g c_{P,g}}{k_g Nu_g^*} \quad (32d)$$

$$Pe^m \hat{=} \dot{m} \frac{L_g}{\rho \mathcal{D} Sh^*} \quad (32e)$$

La résolution numérique du système d'équations (31) ne pose pas de problème particulier dans le cas général, même si il faut prêter une attention particulière à proximité du point triple ou du point critique pour certains cas de condensation. On a alors étudié la solution de ce système pour plusieurs situations (cas de la vapeur pure, cas des basses pressions réduites, cas des mélanges gazeux dilués en vapeur). D'un point de vue pratique, on propose une étape de détermination de la solution en se fixant tout d'abord les grandeurs suivantes (qui a priori dépendent faiblement de la solution) : la pression  $P$  qui détermine ainsi le coefficient  $\theta = \mathcal{L}/c_{P,g}$  [K], les états au sein des phases à cette distance  $L$ , à savoir  $T_l$ ,  $T_g$  et  $\omega_{v,g}$ . ainsi que les coefficients d'échange du système (sur l'échelle de longueur  $L$  non résolue, contenant éventuellement une couche limite) en l'absence d'un impact du transfert de masse, soit  $h_{l,i}$ ,  $h_{g,i}^*$  et  $h_{m,i}^* = Le^{-1} h_{g,i}^*$ , donnés par :

$$h_{l,i} = k_l Nu_l L_l^{-1} \quad (33a)$$

$$h_{g,i}^* = k_g Nu_g^* L_g^{-1} \quad (33b)$$

$$h_{m,i}^* = \rho \mathcal{D} Sh^* L_g^{-1} \quad (33c)$$

ce qui revient à se donner les nombres de Nusselt  $Nu$  côté gaz et liquide, le nombre de Sherwood  $Sh$  étant déterminé via le nombre de Lewis  $Le$ . L'état à l'interface est alors déterminé par la valeur de la fraction massique en vapeur à l'interface  $\omega_{int}$  telle que

$$\frac{h_{l,i}}{Le h_{g,i}^*} (T_{eq}(P, \omega_{int}) - T_l) + \log \left( \frac{1 - \omega_{v,g}}{1 - \omega_{int}} \right) \left[ \theta - \frac{(T_g - T_{eq}(P, \omega_{int}))}{\left[ \frac{1 - \omega_{v,g}}{1 - \omega_{int}} \right]^{Le} - 1} \right] = 0 \quad (34)$$

et la température d'interface est la valeur  $T_{eq}(P, \omega_{int})$  telle que

$$g_l(P, T_{int}) = g_v(P, T_{int}, \omega_{int}) \quad (35)$$

Pour un grand nombre d'applications, on a montré que cette dernière relation peut s'approcher par la loi de Raoult, qui utilise la loi de la température de saturation de l'eau  $T_{sat}(P)$  de sorte que

$$T_{eq}(P, \omega_{int}) \simeq T_{sat} \left( \omega_{int} \frac{M_{H_2O}}{M_g} P \right) \quad (36)$$

où  $M_g$  est la masse molaire du mélange gazeux de la vapeur et d'incondensables.



**Mise en œuvre de la modélisation du changement de phase en présence d'incondensables** Ce modèle a notamment été appliqué afin de mieux modéliser la situation particulière qu'a connue la piscine de stockage du combustible du réacteur n°4 de la centrale de Fukushima Daïchi lors de l'accident de mars 2011 : privée temporairement de source de refroidissement, cette dernière a vu sa température augmenter menant à une évaporation importante, [Martin et coll. \(2017b\)](#).

Par ailleurs, dans plusieurs logiciels de calcul scientifique développés pour des études de thermo-hydraulique pour la sûreté nucléaire, la prise en compte des incondensables repose sur l'estimation du taux d'incondensables dans la maille, la pression partielle de vapeur est alors estimée par une loi de type Dalton et la température d'interface vaut la température de saturation à la pression partielle de vapeur. Cette formulation a deux limitations principales :

- à haute pression, la loi de Dalton n'est plus valable, la vapeur d'eau ne pouvant plus être assimilée à un gaz parfait ;
- en situation de déséquilibre important, il existe un fort gradient de fraction massique de vapeur entre l'interface et son voisinage et la température d'interface ne peut pas être correctement évaluée à partir de la valeur dans la maille.

Ainsi, en me basant sur les travaux théoriques présentés ci-avant, j'ai proposé d'ajouter la variable "fraction massique de vapeur à l'interface" à la formulation ainsi que les relations permettant de la déterminer en fonction du degré de déséquilibre local (flux de chaleur et d'espèces). J'ai ainsi encadré les développements correspondants pour le logiciel CIGALON, [contrat CA 22002331 \(2018\)](#), conseillé les développements ([Zambaux \(2019\)](#)) pour le logiciel CESAR ([Chailan et coll. \(2019\)](#)), et co-dirigé les développements en cours pour le logiciel NEPTUNE\_CFD, [Martin \(2018\)](#).

## 4.2 Déclenchement de l'ébullition

L'eau peut exister à l'état liquide à des niveaux de température significativement plus élevés que la température de saturation qui correspond à l'état de l'eau liquide à l'équilibre thermodynamique avec sa phase vapeur, l'interface étant plane. Cette observation, reportée depuis longtemps dans la littérature, [Dufour \(1861a,b\)](#) s'applique peu aux conditions d'ébullition les plus communes. Néanmoins, la définition même d'un critère d'initiation de l'ébullition est une problématique relativement complexe et on ne peut en aucun cas confondre les états à saturation et les « points d'ébullition », [Chang \(2008\)](#). Cette limitation est intimement liée à la compréhension des mécanismes de nucléation et à la possibilité, pour l'eau, d'obtenir une nucléation dite homogène (soit celle de l'eau pure en contact avec aucun autre corps), [Caupin et Herbert \(2006\)](#). Les conditions de nucléation hétérogènes, notamment sur des parois chauffées, sont mieux connues et dépendent notamment des cavités pouvant exister en paroi et piégeant des nuclei de gaz (incondensables ou vapeur) qui deviendront des sites actifs passé un seuil en température, [Hsu \(1962\)](#).

Dans nos travaux de recherche, j'ai étudié deux situations pour lesquelles les conditions du déclenchement de l'ébullition jouent un rôle important :

- Lors de l'échauffement rapide (de l'ordre de 1000K/s) d'une paroi en contact avec un écoulement d'eau sous-refroidie ( $P=15.5$  MPa,  $Re=5 \cdot 10^5$ , titre thermodynamique compris entre -0.12 et -0.36), on s'intéresse à l'intensité des transferts de chaleur qui détermine l'éventuelle existence d'une phase à haute température (de l'ordre de 1200K). Le déclenchement des phénomènes d'ébullition en paroi induisent des variations importantes de l'intensité des transferts par rapport à la situation de convection monophasique : une augmentation en ébullition nucléée, une dégradation en ébullition en film en configuration dite annulaire inversée ;
- On considère une puissance volumique importante dégagée sur des parois immergées au fond d'un bassin de taille importante (10m dans chacune des directions) et dont la surface est exposée à l'atmosphère. Après une phase d'échauffement du bassin, le flux de vapeur vers l'atmosphère correspond à la puissance dégagée divisé par la chaleur latente. La partition de l'origine de ce flux, entre une évaporation à la surface libre et une ébullition dans les parties immergées du bassin n'est pas triviale à déterminer, notamment du fait de la variation importante des conditions de saturation avec la profondeur (à une dizaine de mètres de profondeur, la pression étant de l'ordre de  $2 \cdot 10^5$  Pa et la température de saturation est alors d'environ 20 K supérieure à la valeur en surface).

Dans les sections suivantes, ces travaux sont présentés successivement.

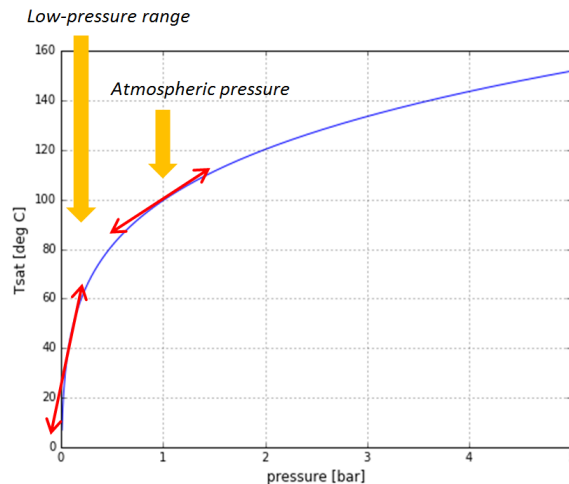


FIGURE 27 – Variation de la température de saturation de l’eau entre 0 et  $5 \cdot 10^5$  Pa. Illustration de l’augmentation de la variation de la température de saturation en fonction de la pression entre une situation à basse pression et une situation à pression atmosphérique.

#### 4.2.1 Évaporation vs ébullition

Les conditions de nucléation dépendent a priori de l’existence de germes en paroi, des conditions de surchauffe en paroi, et de la teneur en gaz dissous. Dans le but de mieux déterminer les conditions d’occurrence de la nucléation dans un bassin au sein duquel la température de saturation varie significativement en fonction de la profondeur, j’ai participé au lancement de l’étude d’un dispositif expérimental à l’UCL, en collaboration avec J.-M. Seynhaeve, M. Duponcheel et Y. Bartosiewicz. L’interprétation des résultats fait l’objet de la thèse de J. Martin à l’IRSN que j’encadre.

**Un dispositif à échelle réduite et à basse pression** Le concept permettant une étude des phénomènes de nucléation en présence d’une variation importante (c’est à dire du même ordre que les écarts de température entre le cœur du bassin et son interface) des conditions de saturation dans un bassin repose sur l’exploitation des propriétés de la courbe de saturation de l’eau (reproduite en figure 27). Le différentiel de pression hydrostatique est linéaire en fonction de la profondeur du bassin tandis que le différentiel de température de saturation dépend non linéairement de la pression absolue. Ainsi, en se plaçant dans le domaine des basses pressions, on obtient une différence de température de saturation importante pour une profondeur modérée.

La figure 28 illustre le dispositif expérimental. La section d’essai de ce dispositif est un bassin d’une hauteur de 40 cm dont la base est en contact avec des éléments chauffants (résistifs) permettant de délivrer une puissance d’1 kW. Le bassin est rempli partiellement d’eau liquide et est relié à un condenseur permettant d’atteindre un régime quasi-stationnaire dans lequel la puissance correspond au flux d’eau liquide se vaporisant dans le bassin (et se condensant dans le condenseur). Une pompe à vide permet d’abaisser la pression dans le ciel gazeux au dessus du liquide à des niveaux de l’ordre de  $2 \cdot 10^3$  Pa ce qui correspond à une température de saturation de l’ordre de 20 °C. À ce niveau de pression, la température de saturation est d’environ 20 °C supplémentaire au fond d’un bassin de 40 cm d’eau liquide, soit une variation en fonction de la profondeur équivalente à celle au sein d’une piscine d’entreposage de combustible. Une des parois latérales (de rugosité de l’ordre de 3  $\mu\text{m}$ ) est instrumentée en thermocouples afin de déterminer les conditions de nucléation sur cette paroi non-chauffée. Le bassin est instrumenté en capteurs de pression dans le ciel et sur sa surface inférieure (permettant de mesurer le niveau liquide) ainsi que de thermocouples et d’une sonde de mesure d’oxygène dissous. Une caméra rapide permet d’observer l’ensemble du bassin.

**Dégazage et vaporisation en surface** D’un point de vue phénoménologique, les essais réalisés mettent en évidence que les lieux de formation de la vapeur varient en fonction des conditions d’essai. À titre d’exemple illustratif, les images du bassin de la figure 29 montrent deux situations correspondant à des conditions proches en ce qui concerne les paramètres de contrôle suivants de l’expérience : puissance de chauffe, pression absolue, niveau liquide du bassin. Dans le cas du dessus, des bulles se forment

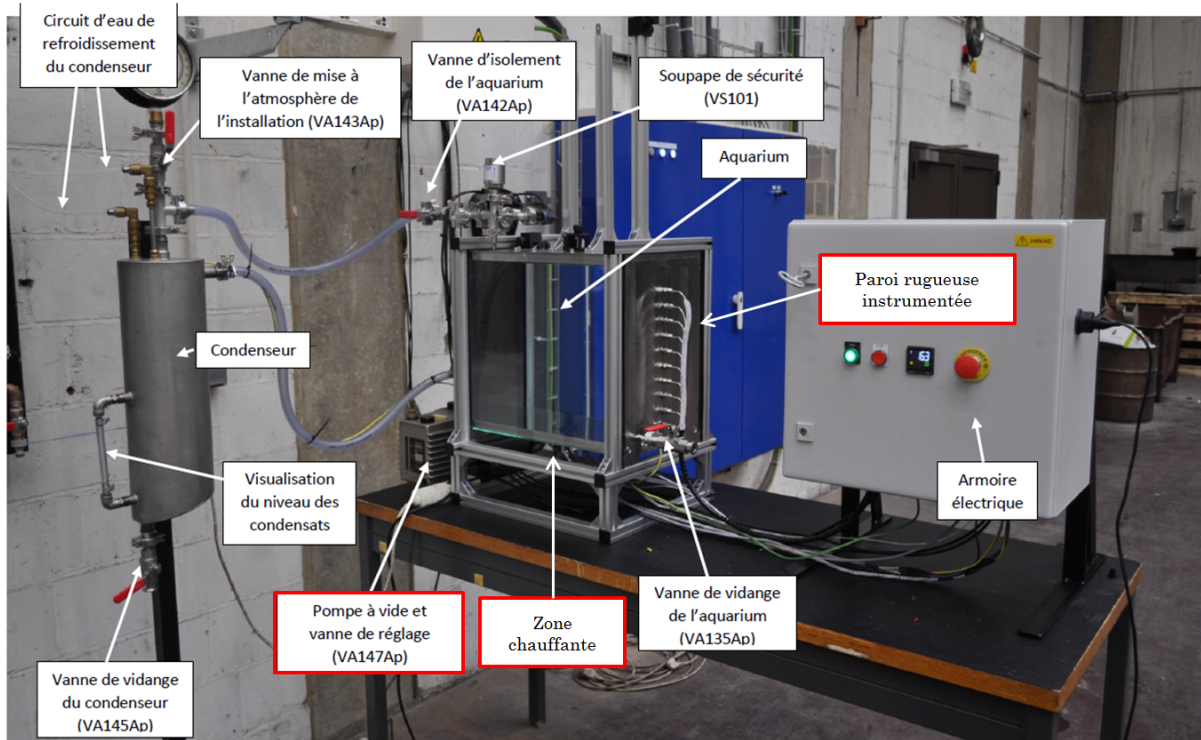


FIGURE 28 – Vue d'ensemble du dispositif expérimental permettant l'étude de la vaporisation de l'eau dans un bassin à basse pression.

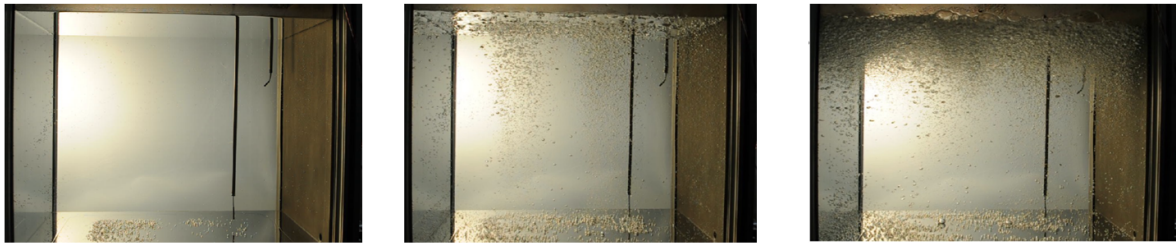
sur la paroi inférieure et sur la paroi latérale et sont présentes de manière importante sur le tiers supérieur du liquide. Dans le cas du dessous, on n'observe aucune bulle sur les parois et seule une couche supérieure relativement fine de liquide est agitée et concentre des bulles de taille relativement plus importante. La différence entre ces conditions d'essai concerne la concentration en oxygène dissous (qui est un bon indicateur de la concentration en gaz dissous issus de l'air au moment du remplissage du bassin notamment) qui est relativement élevée pour le premier cas et basse dans le second.

Les résultats préliminaires d'analyse des tests effectués à ce jour montrent que les variations temporelles des niveaux d'échauffement moyen du bassin et de concentration en oxygène dissous sont fortement corrélées (comme illustré sur les courbes de la figure 30) et sont en effet reliées aux répartitions spatiales des bulles au sein du bassin. Ainsi, les travaux vont se poursuivre afin de relier l'évolution de ces paramètres aux conditions de nucléation dans un bassin. Le couplage entre les transferts de chaleur, de masse et d'espèce est ainsi la clé de la détermination des conditions de la vaporisation au sein d'un bassin.

#### 4.2.2 Déclenchement de l'ébullition sur une paroi s'échauffant

**Des conditions dites transitoires** On s'intéresse ici à l'impact de la rapidité de l'échauffement d'une paroi sur l'intensité des transferts de chaleur entre cette paroi et un écoulement fluide. Dans les cas stationnaires, le flux de chaleur dépend d'un nombre réduit de paramètres de contrôle (géométrie de la paroi chauffée et du canal, intensité de l'écoulement, température à cœur de l'écoulement, température de paroi ou puissance surfacique, niveau de pression absolue). Le niveau de température de paroi est notamment un indicateur du régime d'ébullition (convection liquide en dessous de la température de saturation, ébullition nucléée quelques degrés au dessus de la saturation, ébullition en film pour des niveaux plus élevés). Pour des évolutions progressives des paramètres de contrôle, le transfert correspond à chaque instant à celui en conditions stationnaires pour les valeurs instantanées des paramètres de contrôle, ce qui correspond à une situation qu'on peut qualifier de « quasi-stationnaire ». La limite supérieure de la cinétique d'évolution de ces paramètres pour laquelle une évolution quasi-stationnaire est observée dépend a priori de la cinétique des processus sous-jacents au transfert de chaleur (transport de chaleur au sein de la couche limite, durée du cycle de formation de bulles ...). Pour des évolutions sur des échelles de temps plus petites que celle de ces processus, le transfert est nécessairement affecté

1<sup>st</sup> test, right after a complete drainage and refill of the tank



2<sup>nd</sup> consecutive test

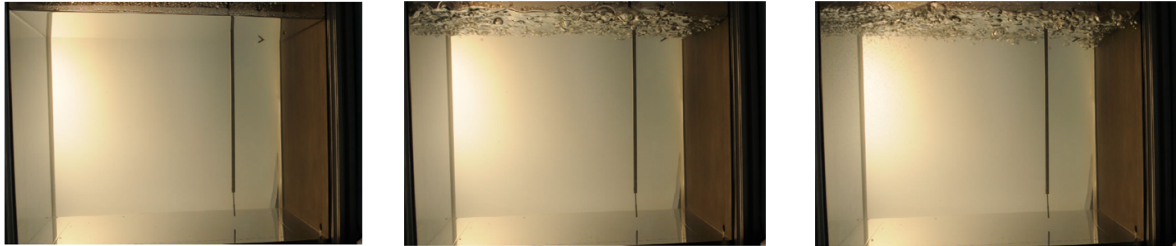
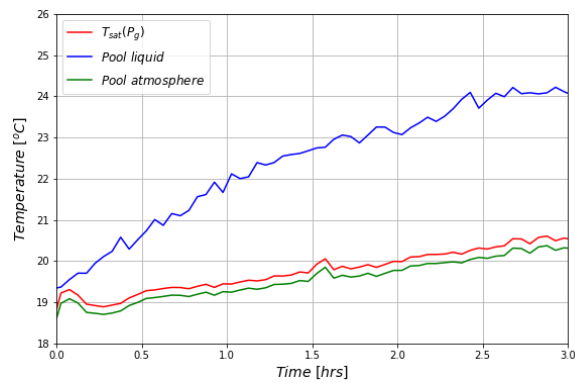
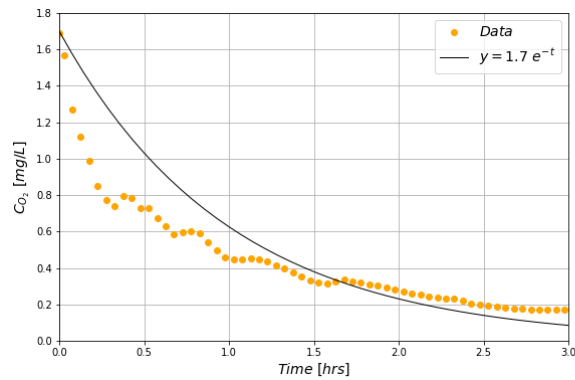


FIGURE 29 – Visualisation de la vaporisation au sein du bassin dans différentes conditions expérimentales. En haut : grand nombre de nucléation en paroi du fait d’une concentration en gaz dissous élevée. En bas, vaporisation concentrée dans une fine couche en surface du bassin du fait d’une concentration en gaz dissous faible.



(a) Températures mesurées au sein du liquide (pool liquid) et du ciel de gaz (pool atmosphere) et température de saturation de l’eau en fonction de la pression du ciel de gaz mesurée ( $T_{sat}(P_g)$ ).



(b) Concentration en oxygène dissous et ajustement par une loi exponentielle.

FIGURE 30 – Évolution temporelle des paramètres au sein du bassin pendant un essai.



par cette évolution. Dans le cas qui nous intéresse, on considère une augmentation de la température de paroi passant d'une valeur propre à de la convection forcée à une valeur propre à de l'ébullition en film en des temps de l'ordre de 0.1 s, ce qui correspond à la durée de quelques cycles de formation de bulles en ébullition nucléée si on l'évalue de l'ordre de 10 ms (cette grandeur restant difficile à évaluer, on peut citer quelques travaux récents, notamment Phillips (2014)). On qualifiera alors ces conditions comme transitoires.

**Un dispositif expérimental dédié** L'étude de la variation de l'intensité des transferts dans des situations d'ébullition convective sous-refroidie en fonction de la cinétique d'échauffement d'une paroi nécessite une instrumentation avancée du dispositif. Outre une caractérisation fine de la thermique, l'observation synchronisée de l'écoulement, et notamment des structures de vapeur se développant sur la paroi, permet une interprétation de la relation entre thermique et changement de phase.

J'ai ainsi initié une collaboration avec C. Colin et J. Sebilleau de l'IMFT qui s'est maintenue durant trois thèses (Visentini (2012); Baudin (2015); Scheiff (2018)). La thèse de R. Visentini a notamment permis de concevoir le dispositif expérimental dont des améliorations notables ont été apportées par la suite. Ses travaux ont également mis en évidence la capacité du dispositif à engendrer et à caractériser des phénomènes d'ébullition fortement transitoires, Visentini et coll. (2014). Les travaux de N. Baudin ont permis de caractériser l'hydrodynamique au sein du canal du dispositif et d'étudier la convection en conditions transitoires, Baudin et coll. (2016a), de montrer que les transitoires de température de paroi obtenus étaient qualitativement similaires aux conditions d'intérêt pour l'étude d'un RIA et de modéliser les transferts en ébullition nucléée et en film en les reliant à des mesures quantitatives des épaisseurs de vapeur le long de la paroi. La thèse de V. Scheiff a permis de réduire significativement les incertitudes d'évaluation de la thermique de la paroi, de contrôler des conditions transitoires d'ébullition en film à puissance non-nulle, de développer des post-traitements avancés de la thermique de la paroi couplée aux observations des structures diphasiques, de caractériser le déclenchement de l'ébullition, Scheiff et coll. (2019), ainsi que l'ébullition nucléée, Scheiff et coll. (2021).

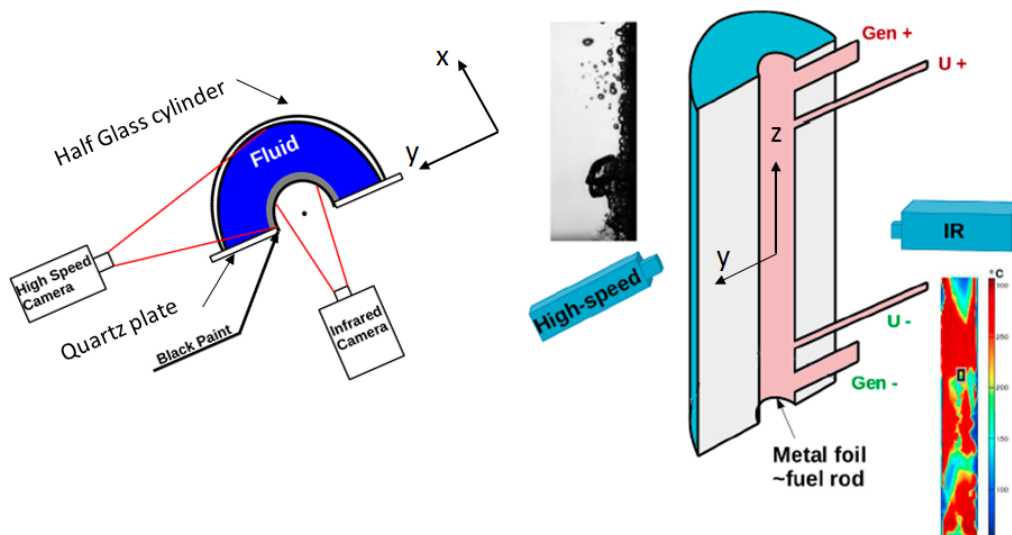


FIGURE 31 – Schémas de principe de la section d'essai.

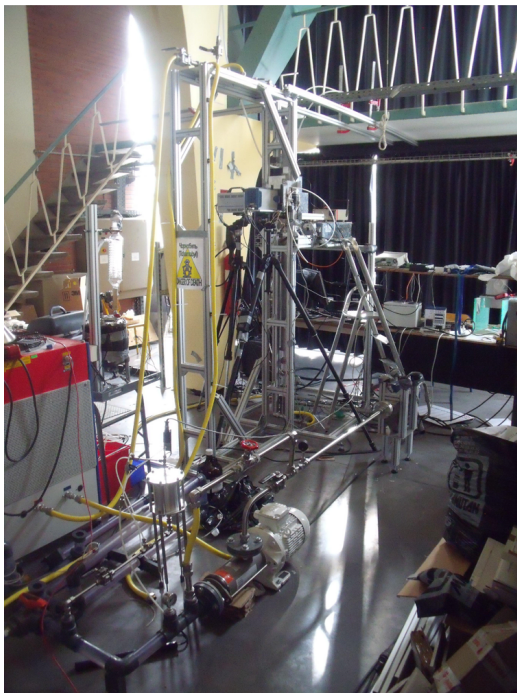
Les concepts principaux de l'expérience, dont le schéma est donné en figure 31, sont les suivants :

- obtenir des données en conditions d'ébullition transitoire avec une expérience de laboratoire et une instrumentation avancée : choix de travailler avec un réfrigérant HFE7000<sup>9</sup> de basse température de saturation (34 °C à pression ambiante) et faible chaleur latente (132 kJ.kg<sup>-1</sup>);
- étudier l'ébullition en condition convective sous-refroidie : la section d'essai est intégrée dans une boucle hydraulique permettant le contrôle du débit et de la température d'entrée et équipée d'un condenseur;

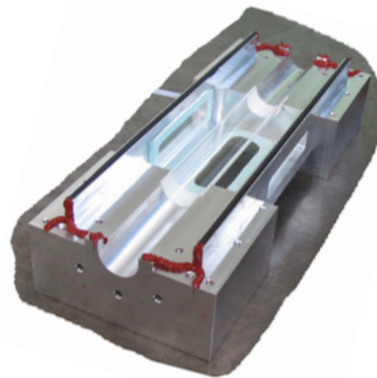
9. nom commercial (3M) du 1-methoxyheptafluoropropane (C3 F7 OCH3).

- mesurer avec une faible incertitude la température de paroi en contact avec le fluide : la paroi chauffante est une fine feuille métallique (épaisseur 50  $\mu\text{m}$ ), une de ces faces est en contact avec le fluide, la face opposée étant accessible à la visée d'une caméra infra-rouge;
- observer le développement des structures diphasiques : l'élément chauffant est courbé pour former l'enveloppe d'un demi-cylindre (de rayon 8.4 mm et de longueur 200 mm), la face externe en contact avec le fluide pouvant être observée de façon latérale par une caméra rapide du fait de la transparence du canal hydraulique (de section semi-annulaire avec un diamètre externe de 34 mm). En outre, la forme cylindrique correspond à la configuration géométrique d'intérêt d'un crayon combustible;
- imposer des cinétiques rapides d'échauffement de la paroi : l'échauffement de la paroi est généré par effet Joule en reliant la feuille métallique à un générateur de puissance<sup>10</sup> contrôlé par un système P.I.D. permettant de suivre des consignes en terme d'évolution temporelle de puissance déposée ou de température moyenne de l'élément chauffant.

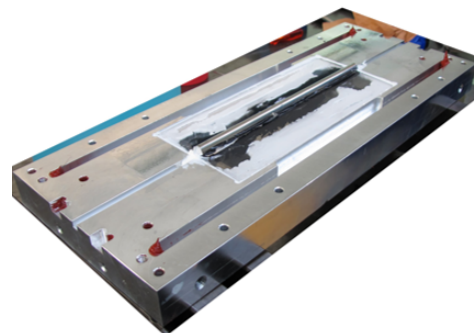
Ainsi, ce dispositif expérimental s'est inspiré des techniques, maintenant répandues, issue des travaux novateurs de [Theofanous et coll. \(2002\)](#) permettant une observation simultanée de la thermique et de la vaporisation tout en les étendant à des conditions convectives. La connaissance de l'ébullition dans ces conditions transitoires étant très réduite, il nous a semblé raisonnable de développer des connaissances académiques des phénoménologies correspondantes en s'écartant des conditions d'intérêt (écoulement d'eau à haute pression) mais tout en maintenant les principales spécificités (écoulement turbulent sous-refroidi  $Re \in [0-60\ 000]$ , géométrie cylindrique de l'élément chauffant avec un diamètre hydraulique équivalent).



(a) Vue d'ensemble de la boucle d'essai.



(b) Paroi externe de la conduite semi-annulaire au niveau de la section d'essai, fenêtres de visualisation.



(c) Paroi interne de la conduite semi-annulaire et demi-cylindre chauffant.

FIGURE 32 – Photographies de l'installation expérimentale de l'IMFT.

10. SORENSEN SGA pour une gamme de tension 0-40 V et d'intensité 0-250 A, soit une puissance maximale de 10 kW.



**Convection transitoire** Dans un premier temps, nous avons caractérisé à l'aide de P.I.V. et de calculs CFD l'écoulement au sein de la conduite de section semi-annulaire. Nous avons établi que dans un secteur angulaire relativement large autour de la zone centrale, l'écoulement était similaire à celui en conduite annulaire et avons vérifié que les corrélations classiques permettent de décrire le transfert de chaleur convectif.

Afin d'étudier des conditions transitoires, on considère les conséquences d'un échauffement rapide de la paroi sur les transferts avant le déclenchement de l'ébullition. On considère des tests pour lesquels un niveau de puissance est instantanément imposé pendant une période de quelques secondes avant d'être remis à zéro. On observe donc successivement une phase d'échauffement, une phase de stabilisation de la température de paroi, une phase de refroidissement, et enfin une seconde stabilisation. Comme illustré sur la figure 33a, le taux de variation temporelle de la température de paroi  $dT/dt$  est linéaire avec la température pendant les phases d'échauffement et de refroidissement, indiquant une variation temporelle exponentielle. Nous avons montré que le coefficient d'échange  $h_{trans}$  s'écarte dans les premiers temps du coefficient quasi-stationnaire (noté  $h_{stat}$ ) comme illustré sur la figure 33b, avant de relaxer vers la valeur finale sur un temps caractéristique d'autant plus court que le nombre de Reynolds est élevé. Nous avons alors analysé, sur la base de travaux analytiques de la littérature, cette variation temporelle et proposé un modèle.

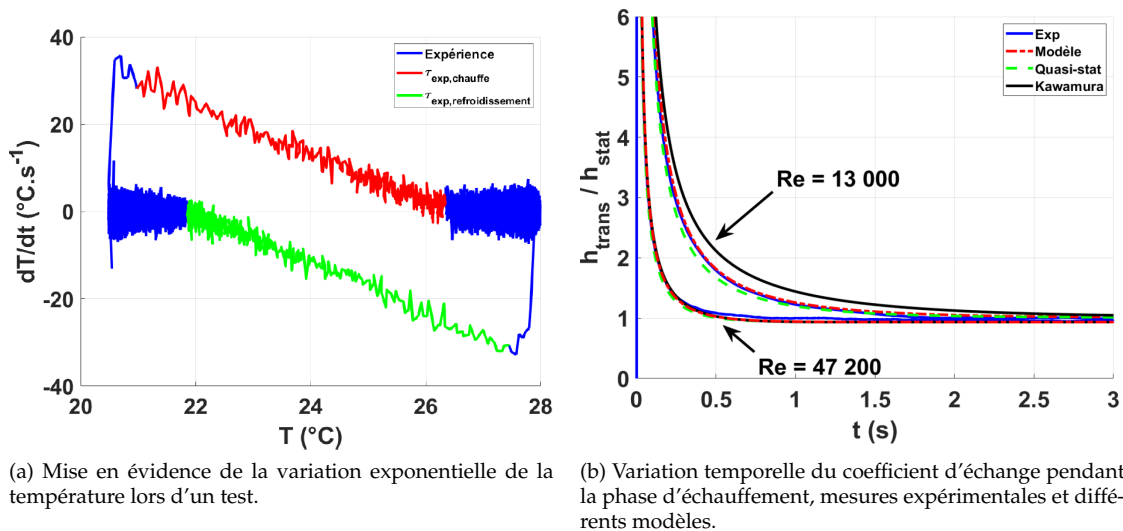


FIGURE 33 – Analyse thermique de la convection transitoire pour un échelon en puissance déposé dans la feuille métallique.

**Déclenchement de l'ébullition** Le traitement d'images de la caméra rapide permet d'observer finement la formation de vapeur sur la paroi notamment au déclenchement de l'ébullition nucléée. Ainsi sur la figure 34, on reproduit le résultat d'un test pour lequel, à  $t=0$ , on impose un niveau de puissance suffisant à mener à de l'ébullition. La séquence d'images, commentée en légende, illustre que le déclenchement est associé à la formation localisée d'une poche de vapeur qui grossit en propageant le déclenchement sur la paroi dans la direction principale de l'écoulement.

L'automatisation du traitement d'images mise en place lors de la thèse de V. Scheiff a permis d'obtenir une mesure spatiale (le long de l'axe vertical) et temporelle de l'épaisseur de la couche de vapeur le long de la paroi : ceci est illustré par la représentation en diagramme de la figure 35.a. Ainsi on identifie le temps d'apparition de la vapeur (ligne blanche). L'évolution spatio-temporelle de la température de paroi mesurée par la caméra IR pour le même test est illustrée sur la figure 35.b, sur laquelle est reproduite cette même ligne blanche. On observe que la température de paroi continue d'augmenter significativement à la formation et au passage de la poche de vapeur. Une chute brutale de température est observée quelques centièmes de seconde plus tard. L'écriture d'un bilan d'énergie au sein de la paroi permet, en considérant l'évolution temporelle de la chaleur spécifique à partir de la mesure de température de paroi locale et en prenant en compte la valeur instantanée de la puissance déposée par effet Joule, d'estimer le flux thermique échangé entre la paroi et le fluide. Son évolution spatio-temporelle est illustrée sur la figure 35.c. Cette image révèle clairement que lors de la chute de température un flux très

important est extrait de la paroi ; sa valeur est dé-corrélée de la valeur de la puissance. Puis le flux se stabilise en moins d'un dixième de seconde vers la valeur correspondant à la puissance imposée, ce qui correspond alors dans ce cas à un régime d'ébullition nucléée stable.

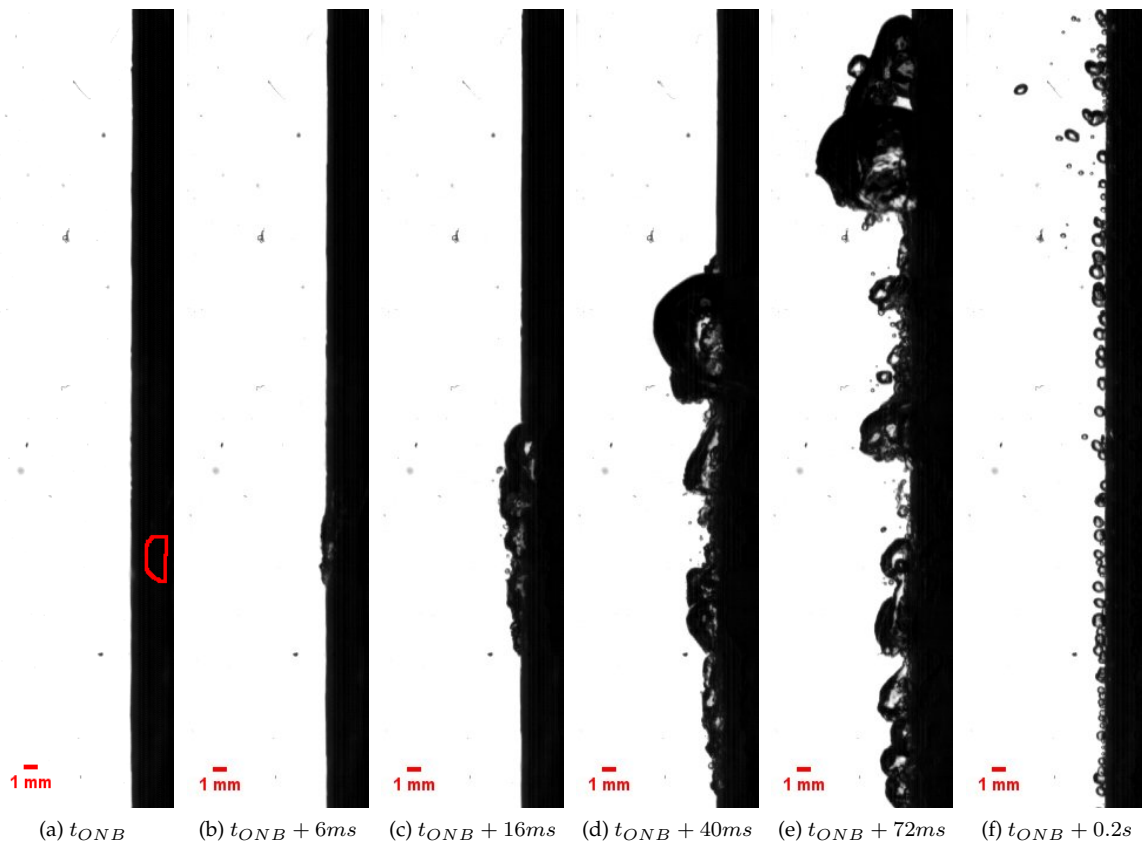
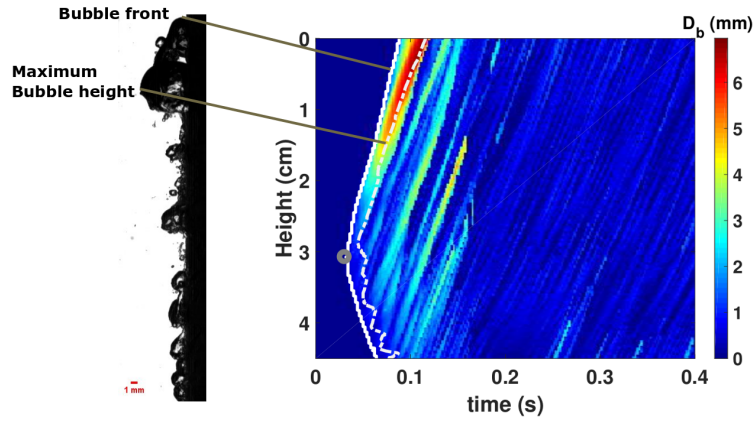
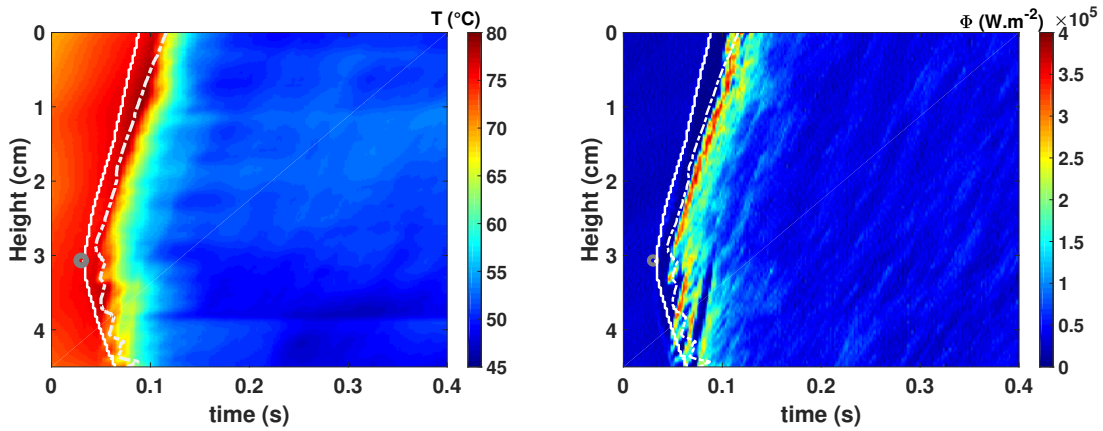


FIGURE 34 – Visualisations du déclenchement de l'ébullition. La première bulle apparaissant sur la paroi (ONB) (a) grossit le long de la paroi, s'étalant plus fortement dans la direction de l'écoulement (b-c), elle se divise alors en plusieurs poches (d) de sorte que rapidement la paroi est couverte de plusieurs poches de vapeur de taille relativement importantes (ODB) (e) qui laissent finalement la place une ébullition avec des bulles beaucoup plus petites correspondant au régime d'ébullition nucléée stable et pleinement développé (f).



(a) Hauteur de l'épaisseur de bulles le long de la paroi en fonction du temps et de la position axiale pendant une phase de transition d'un écoulement non-bouillant à un régime d'ébullition nucléée établie.



(b) Température de paroi en fonction du temps et de la position axiale. (c) Flux de chaleur échangé entre la paroi et le fluide en fonction du temps et de la position axiale.

FIGURE 35 – Analyse synchronisée de l'ébullition et des transferts thermiques pour un test de déclenchement de l'ébullition par un niveau de puissance imposé instantanément et correspondant à un régime d'ébullition nucléée. ( $z = 0$  correspond au point le plus en aval de l'écoulement, le fluide s'écoulant verticalement vers le haut, l'axe étant ici arbitrairement dirigé vers le bas.).

Ce type de résultats et d'analyse sont novateurs. Ils permettent de remettre en question des résultats fondés sur des analyses à partir de mesures plus globales des phénomènes de déclenchement de l'ébullition. On trouvera notamment dans [Scheiff et coll. \(2021\)](#) des analyses de l'ébullition nucléée permettant :

- d'estimer l'impact du niveau de puissance et du débit fluide sur l'épaisseur de bulles en paroi ;
- d'observer l'impact du glissement des bulles dans la direction principale de l'écoulement sur la thermique de paroi ;
- d'étudier l'influence du pilotage de la puissance de chauffe (par une consigne en puissance ou en température de paroi, via un P.I.D. réglé par la mesure instantanée de la résistance de l'élément chauffant) sur l'ébullition nucléée ;
- d'étudier l'impact du taux d'échauffement de la paroi (sur une gamme allant de quelques K/s à plusieurs centaines de K/s) sur la relation température de paroi/flux de chaleur paroi-fluide.

### 4.2.3 Synthèse

L'étude des transferts de chaleur sur des temps courts, motivée par le besoin d'acquisition de connaissances pour les accidents de réactivité nous a mené à concevoir un dispositif expérimental dédié, permettant à la fois un contrôle fin de la puissance déposée dans le fluide et une mesure détaillée en temps et en espace de la dynamique de formation de la vapeur et de la thermique de la paroi. L'analyse de nombreux essais a mis en évidence une phénoménologie spécifique à ces conditions très transitoires. Évidemment, il reste du travail d'analyse de ces données ainsi qu'une tâche visant à re-visiter l'interprétation des essais de la littérature dans ce domaine, essais pour lesquels cette phénoménologie n'avait pas été révélée. Ces travaux sont nécessaires au développement d'une modélisation effective des transferts de chaleur en transitoire. Un sujet de travail post-doctoral a été ainsi défini au sein de l'IRSN mais n'a pas encore pu être financé. Par ailleurs, un projet de thèse en co-tutelle franco-américaine a été proposé pour la rentrée académique 2020<sup>11</sup>. Il visait à associer des travaux sur trois installations expérimentales complémentaires :

- celle de l'IMFT décrite dans les sections précédentes ;
- un dispositif expérimental à l'Université de Pittsburgh permettant d'étudier l'ébullition transitoire en conditions de fluide stagnant mais pour de l'eau en conditions de température et de pression représentatives de celles d'un réacteur ;
- un dispositif développé à l'Idaho National Laboratory permettant l'échauffement rapide d'un crayon combustible postiche immergé dans un écoulement représentatif des conditions d'un réacteur.

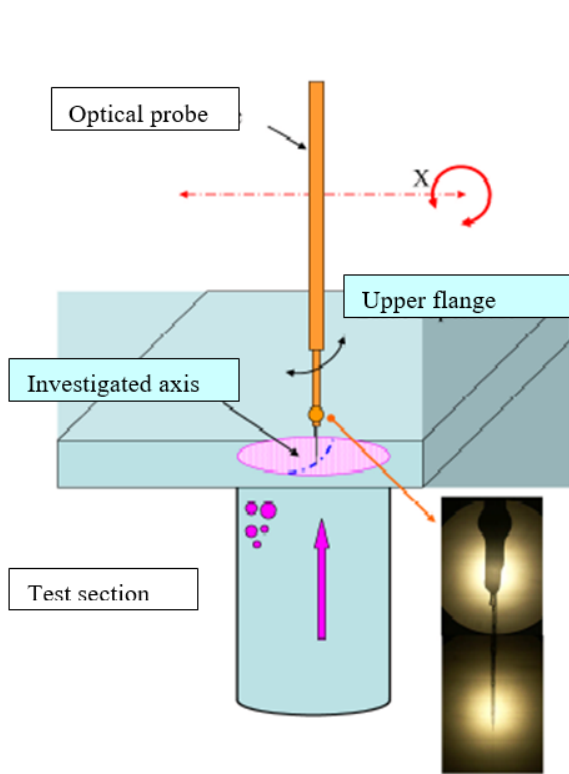
## 4.3 Ébullition nucléée convective

Dans le cadre du projet Neptune et dans le but d'améliorer la connaissance du phénomène de flux critique par caléfaction, j'ai participé à des travaux d'interprétation, de modélisation et de simulation numérique d'écoulements en régime d'ébullition nucléée sous-refroidie dans une conduite verticale, essais réalisés sur la boucle DEBORA du CENG. Le fluide est un réfrigérant s'écoulant dans une conduite cylindrique d'une vingtaine de mm de diamètre. L'instrumentation à cœur de l'écoulement est une bisonde optique dont le signal permet de déterminer en fonction locale instantané indicatrice de phase. Le traitement statistique des mesures permet d'accéder, [Cubizolles \(1996\)](#), au profil radial de :

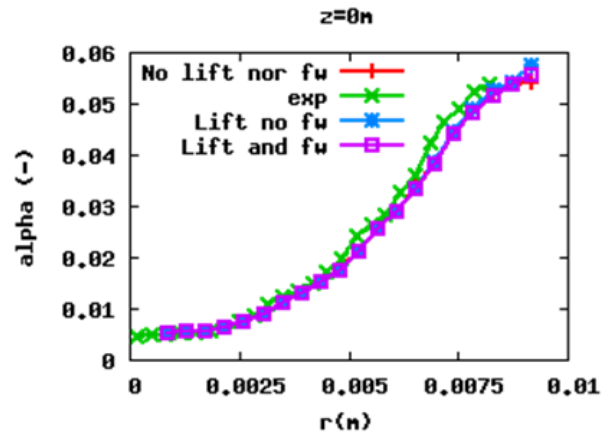
- la fraction volumique de phase ;
- la distribution en taille de bulles ;
- la distribution en vitesse de bulles.

Le principe est illustré sur la figure 36, les essais étant répétés plusieurs fois pour différentes positions radiales de la sonde, les conditions d'écoulement et de chauffage pariétal étant maintenues constantes. Ces données ont notamment permis d'étudier la validité de la modélisation de la polydispersion en taille pour des écoulements bouillants ainsi que celle de la modélisation de la condensation à cœur de l'écoulement, [Ruyer et Seiler-Marie \(2009\)](#); [Ruyer et coll. \(2010\)](#). Sur les graphes 36.b-c, on illustre comment le profil radial de la fraction volumique de vapeur (à deux élévations différentes au sein de la conduite) peut être reproduit numériquement selon les choix de modélisation effectués pour les transferts de quantité de mouvement interfaciaux dans la direction radiale, notamment les forces dites de portance (lift) et de paroi (fw). Cette dernière est une modélisation relativement empirique venant rendre compte d'un phénomène hydrodynamique encore mal caractérisé. On constate que l'accord expérience-calcul n'est

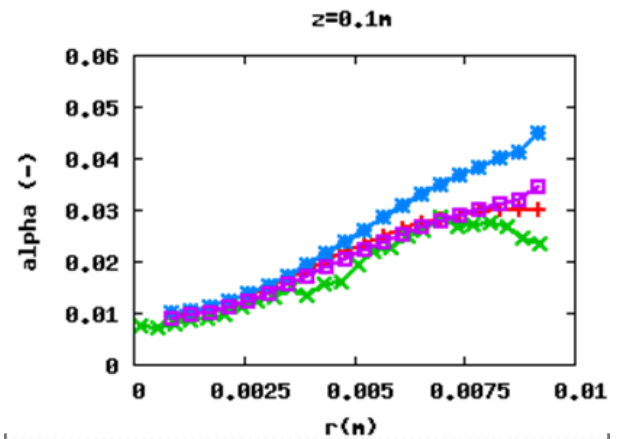
11. et annulé depuis notamment du fait du contexte sanitaire.



(a) Principe de la mesure par sonde optique.



(b) Évolution radiale de la fraction volumique de vapeur; comparaison expérience-simulation numérique.



(c) Évolution radiale de la fraction volumique de vapeur; comparaison expérience-simulation numérique.

FIGURE 36 – Étude de l'ébullition nucléée convective.

pas satisfaisant dans cette région proche paroi. La modélisation a également été appliquée pour des simulations numériques dans des conditions d'écoulement et de géométrie typiques de celles au sein des assemblages combustible d'un cœur de réacteur, notamment pour étudier l'impact des ailettes de mélange des grilles de maintien des crayons, [Mimouni et coll. \(2009, 2011\)](#). Sur la figure 37, on compare entre les deux colonnes d'images l'impact d'une prise en compte de la polydispersion en taille sur la répartition spatiale de la fraction volumique de vapeur au sein du sous-canal entre quatre crayons combustible au niveau d'une grille de mélange. On observe que le cœur de l'écoulement est quasiment liquide en prenant en compte la polydispersion. Ceci affecte également le profil de vitesse liquide également. Ces aspects ont pu être reliés à l'impact de l'aire interfaciale sur l'intensité de la condensation des bulles au cœur de cet écoulement sous-refroidi. L'impact sur la température de paroi est relativement négligeable.

Ces travaux sur la polydispersion dans le cadre des écoulements en ébullition nucléée se poursuivent dans le cadre des travaux d'extension de la base de données de validation de l'outil numérique Neptune\_CFD, [Mimouni et coll. \(2017a\)](#), le modèle proposé restant le modèle retenu par défaut.

#### 4.4 Transition vers l'ébullition en film par caléfaction

Lors de ma thèse, j'ai été amené à m'intéresser à la compréhension de la crise d'ébullition par caléfaction qui est un objectif industriel motivant de nombreux travaux de recherche dans le domaine du nucléaire, notamment le développement de méthodes numériques avancées de simulation des écoulements bouillants. J'ai analysé une partie de l'abondante bibliographie sur la question pour en dégager

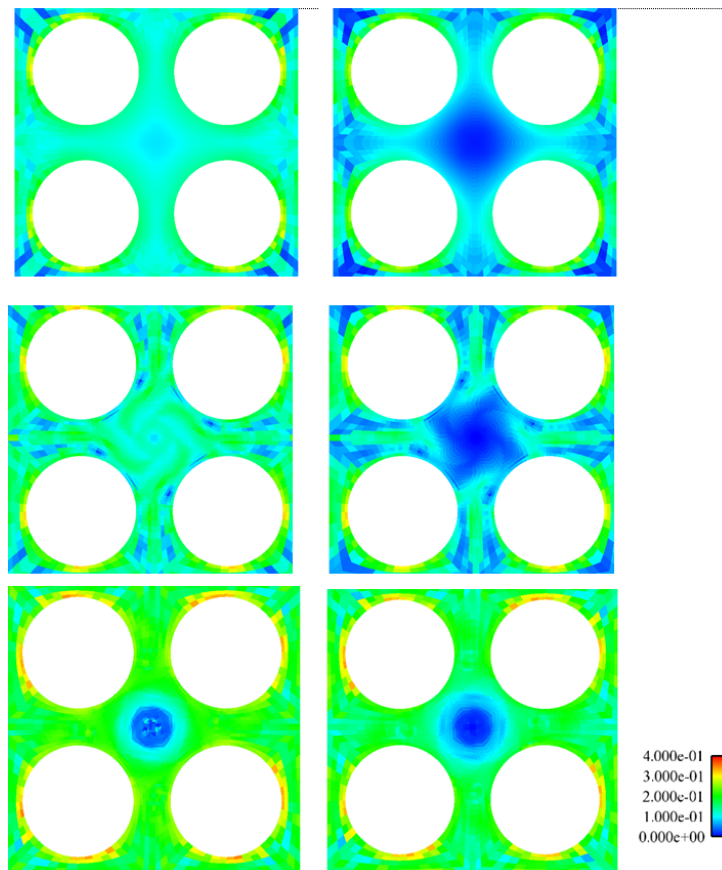


FIGURE 37 – Fraction volumique de vapeur de part et d'autre d'une grille de mélange ( $z=0\text{m}$ ). De bas en haut :  $z=-0.02\text{m}$  (en amont de la grille),  $z=0.05\text{m}$ , et  $Z=0.2\text{m}$ . Colonne de gauche : calcul de référence, colonne de droite : cas polydispersé.



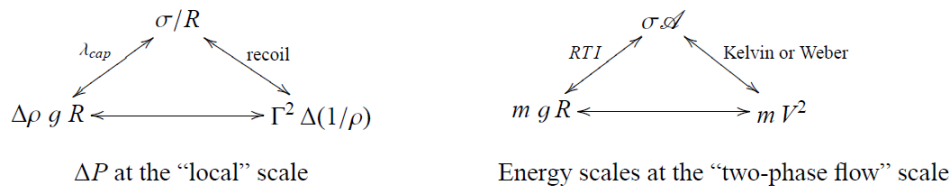


FIGURE 38 – Schéma de principe des échelles en jeu dans l'ébullition nucléée.

une synthèse des différents mécanismes proposé comme étant potentiellement à l'origine du phénomène. L'analyse dimensionnelle historique de Kutateladze permet d'estimer une loi d'échelle pour le flux critique à partir des grandeurs typiques de l'ébullition nucléée. Ces dimensions peuvent tout à la fois être interprétées par, et correspondre à :

- une phénoménologie locale de croissance de tache sèche au pied d'une bulle du fait de la force de recul associée à une évaporation intense, [Nikolayev et coll. \(2001\)](#) ;
- une instabilité dans l'écoulement des bulles transitant de la paroi vers l'écoulement principal, [Zuber \(1958\)](#).

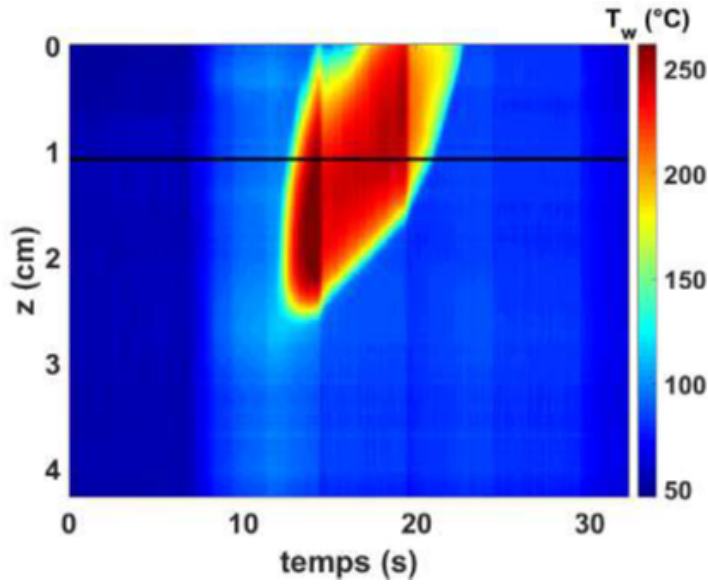
Cette dualité est schématisée sur la figure 38. Ces travaux ont notamment participé à l'orientation d'un programme de travail dont le volet expérimental QLOVICE, [Bestion et coll. \(2009\)](#), considérait le développement d'un dispositif dédié à l'étude de la crise d'ébullition en vase. Le concept reposait notamment sur une observation fine des phénomènes proche paroi en s'inspirant des travaux de [Theofanous et coll. \(2002\)](#) et de [Nishio et Tanaka \(2004\)](#).

#### 4.5 Ébullition en film annulaire inversé

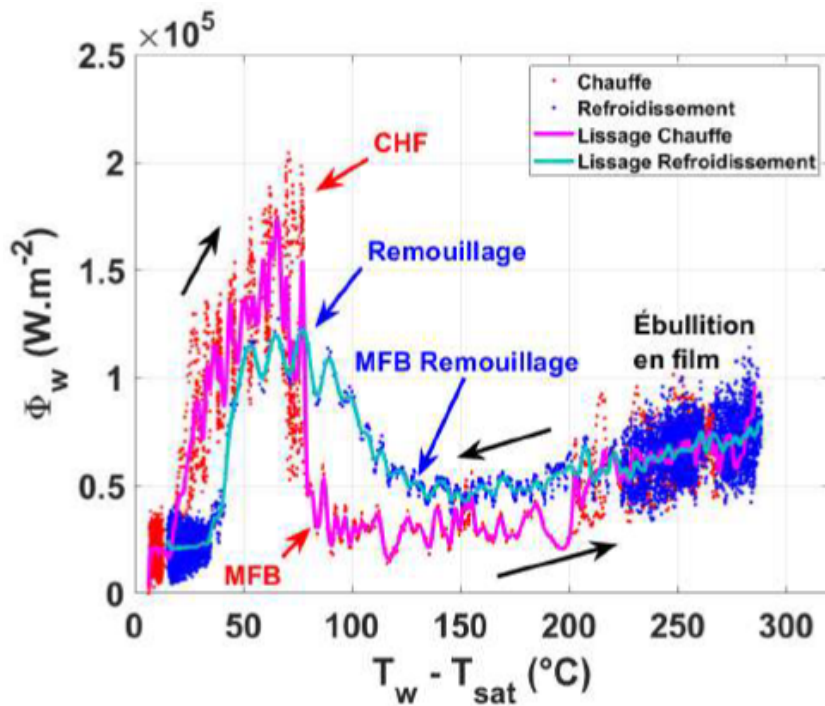
L'étude de l'établissement de l'ébullition en film suite à une variation rapide de la puissance est également l'objectif des travaux menés en partenariat avec l'IMFT. La difficulté de la réalisation de ces expériences est que l'ébullition en film se déclenche pour des flux très élevés correspondant au flux critique, mais que pour ces mêmes flux, les températures atteintes en ébullition en film par la paroi peuvent mener à sa dégradation. La mise au point du P.I.D. sur la température de paroi par V. Scheiff a permis d'obtenir des essais avec des phases d'ébullition en film à puissance non nulle, ce qui est en soit un résultat très satisfaisant. Sur le diagramme de la figure 39.a, on peut observer qu'une zone centimétrique est maintenue en ébullition en film à partir de 12s pendant une dizaine de secondes en aval d'un point vers  $z=2,5\text{cm}$ . Au déclenchement de l'ébullition, l'échauffement est relativement brusque. On observe une lente progression verticale de la zone puis un refroidissement progressif à partir de 20s, temps pour lequel la consigne en température est abaissée. Sur la courbe de la figure 39.b, on représente la trace locale de la relation entre surchauffe pariétale et flux de chaleur paroi-fluide. On observe clairement que la relation n'est pas la même lors de la phase d'échauffement que lors de la phase de refroidissement sauf pour les moments à haute surchauffe (au delà de  $200^\circ\text{C}$ ) : le flux de chaleur à l'établissement de l'ébullition en film est significativement plus faible que lors de la phase précédant le remouillage.

Il avait été observé lors de la thèse de N. Baudin que la topologie de l'écoulement diphasique lors de la phase d'établissement de l'ébullition en film différait de celle pendant la phase de refroidissement, comme illustré sur les photos de la figure 40 : pendant la chauffe, l'épaisseur de vapeur est plus importante, ce qui semble cohérent avec une efficacité moindre des échanges. Pendant la phase de refroidissement, l'interface du film de vapeur présente une structuration plus régulière avec des vagues se propageant régulièrement à une longueur d'ondes que nous avons pu relier à des instabilités de type Kelvin-Helmholtz. Une modélisation de type Bromley a été utilisée pour estimer l'intensité du flux de chaleur paroi-fluide et calculer l'évolution temporelle et axiale de la température de paroi lors de la phase de refroidissement en décrivant l'écoulement au sein du film de vapeur d'épaisseur variable. Le graphe de droite de la figure 40 montre qu'un tel modèle permet de retrouver l'ordre de grandeur de la baisse de température lors de la phase d'ébullition en film.

La modélisation de l'évolution d'un crayon de combustible soumis à un pulse de puissance est réalisée au sein de l'IRSN à l'aide du logiciel SCANAIR, [Georgenthum et coll. \(2014\)](#). Dans cette approche, les transferts de chaleur entre la paroi du crayon et l'écoulement environnant sont décrits à l'aide de corrélations, l'écoulement diphasique étant modélisé par un modèle homogène dans le cas qui nous intéresse. Les différents régimes d'ébullition sont pris en compte. J'ai co-encadré un stage de master (Th. Vinceneux - 2015) visant à améliorer la modélisation de la phase d'ébullition en film. Le modèle de référence retenu pour les configurations convectives à faible titre thermodynamique des cas RIA est



(a) Diagramme spatio-temporel de la température de paroi.



(b) Courbe flux échangé/surchauffe de la paroi.

FIGURE 39 – Résultats d'un essai menant au développement et au maintien d'une ébullition en film

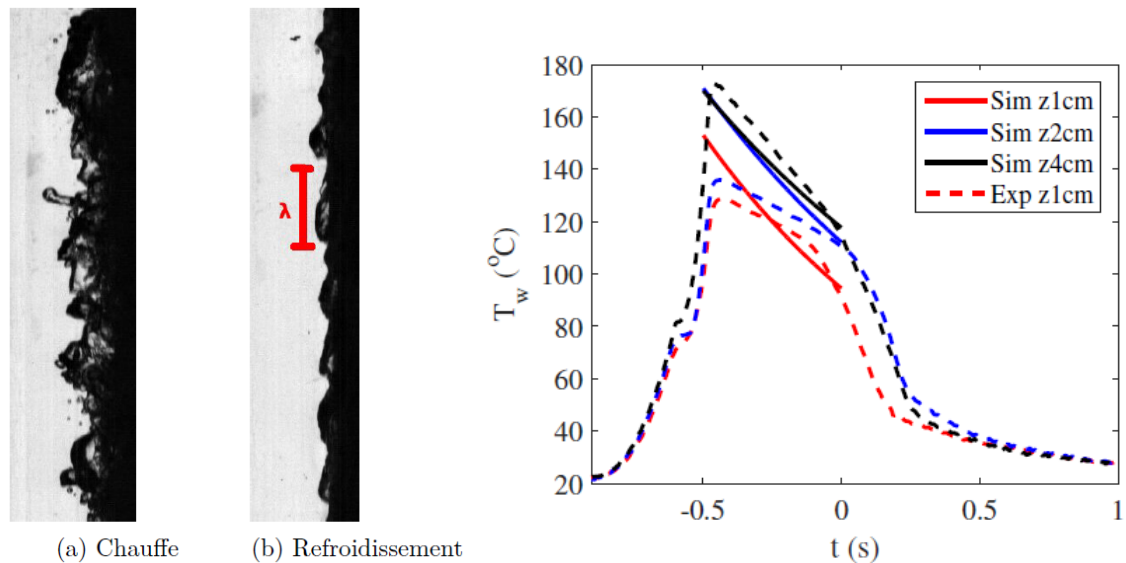


FIGURE 40 – Ébullition en film, essais issus des travaux de N. Baudin. Photographies de gauche : visualisation de la topologie de l'écoulement. Graphe de droite : évolution de la température de paroi à différentes élévations, comparaison mesure en lignes pointillé et modèle en trait plein.

le modèle de Bishop, Sandberg et Tong qui n'est a priori pas valide pour les gammes de paramètres concernés. Nous avons considéré, après étude bibliographique, l'intégration dans le logiciel des tables de [Groeneveld et coll. \(2003\)](#) qui couvrent une large gamme de configurations en regroupant données expérimentales et modélisations. Sur la sélection de cas tests de la base de données de validation du logiciel SCANAIR menant à de l'ébullition en film, nous avons pu constater, [Ruyer et Georgenthum \(2015\)](#), comme illustré sur les graphes de la figure 41, une dégradation des performances du logiciel sur les cas stagnants basse pression (hors gamme de validité des tables de [Groeneveld et coll. \(2003\)](#)) et une amélioration pour les cas convectifs haute pression (plus proches de la configuration accidentelle d'intérêt).

#### 4.6 Transferts de chaleur entre un écoulement à gouttes et une paroi

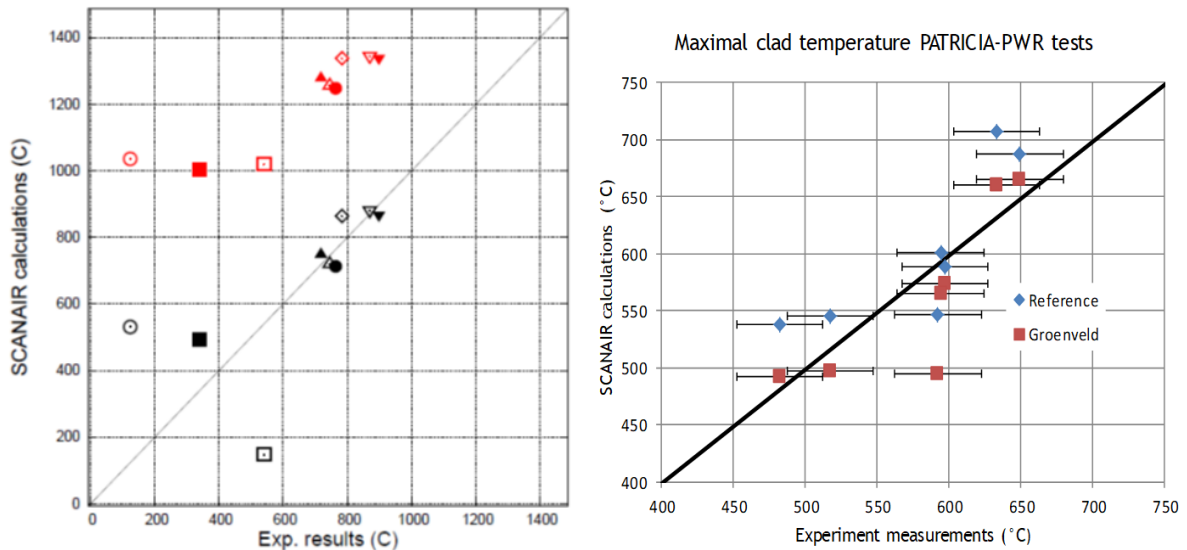
Le régime de transfert de chaleur entre une paroi et un écoulement à gouttes correspond à une configuration dite d'ébullition en film à gouttes dispersées. Le transfert de chaleur paroi-écoulement est la combinaison de contributions élémentaires que sont

- la convection associée à l'écoulement de la phase continue vapeur;
- l'impact des gouttes sur les parois;
- le transfert radiatif entre les trois éléments paroi-vapeur-gouttes.

Au sein de l'écoulement, le déséquilibre de température entre vapeur et gouttes est à l'origine de transferts de chaleur et de masse : la présence de gouttes peut abaisser localement notablement la température de la vapeur.

La démarche de recherche développée sur cette thématique repose sur la description à l'échelle dite de la CFD de ces mécanismes et a fait l'objet, pour la partie thermique, de collaborations avec l'équipe du LEMTA de Nancy. Les aspects dynamiques et convection ont été abordés en section 3.3 de ce document.

**L'impact des gouttes** J'ai été associé à certains développements de [Lelong \(2010\)](#) basés sur la mesure expérimentale des flux de chaleur extraits d'une paroi par un train de gouttes dans le régime de rebond. L'interprétation des données a mis en évidence la relation entre chaleur extraite et temps de résidence des gouttes. Ce temps de résidence a été modélisé par une analogie entre la dynamique du rebond sur la paroi et un système mécanique masse-ressort-amortisseur présenté dans [Gradeck et coll. \(2013\)](#) et illustré sur la figure 42. Cette approche a permis de proposer l'intégration d'une contribution de l'impact de gouttes sur les parois dans le logiciel Neptune\_CFD utilisé pour des évaluations de la configuration d'intérêt, [Seiler et coll. \(2011c\)](#).



(a) Résultats sur la base de données NSRR JMTR, eau stagnante, conditions atmosphériques. (b) Résultats sur la base de données PATRICIA-PWR, conditions typiques des écoulements REP.

FIGURE 41 – Capacité prédictive du pic de température de gaine du logiciel SCANAIR par rapport à la base de données expérimentales; impact de la modélisation du transfert de chaleur en régime d’ébullition en film, formulation standard, symboles bleu ou noir, *versus* table de Groeneveld, symboles rouge.

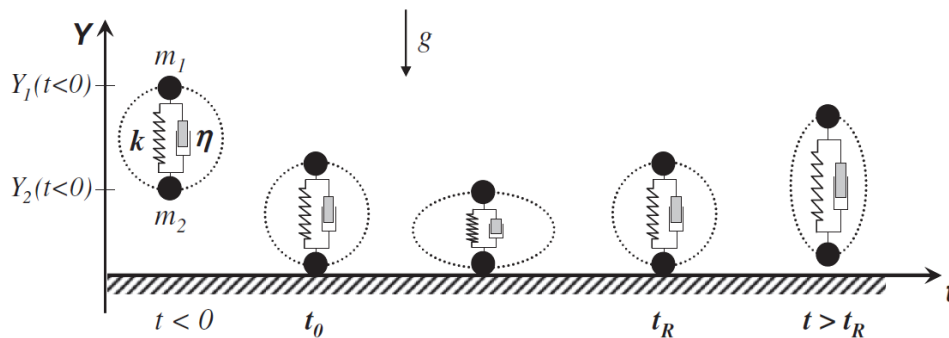


FIGURE 42 – Modélisation de la dynamique de rebond d’une goutte sur une paroi afin d’en déduire son temps de résidence  $t_R$  dans la modélisation de la chaleur extraite, [Gradeck et coll. \(2013\)](#)

**Transferts radiatifs** La thèse de [Gérardin \(2012\)](#) a considéré la part des transferts radiatifs. Dirigée par P. Boulet (LEMETA), je l’ai co-encadrée avec N. Marie. Ces travaux ont concerné :

- la modélisation des propriétés radiatives de la vapeur (modèle de type Ck) et des gouttes (théorie de Mie);
- la résolution de l’équation de transfert radiatif par des méthodes de complexité/précision croissantes : P1, MDA, IDA, [Modest \(2003\)](#).

Pour les conditions d’intérêt, le mélange vapeur et gouttes est absorbant, diffusant de façon anisotrope, émissif, non-gris et non-homogène. Les méthodes numériques IDA et MDA reposent sur une discrétisation des chemins optiques qui impliquent des algorithmes de résolution plus coûteux que les méthodes de type P1, qui se réduisent à la résolution d’EDP. Les transferts radiatifs dans le milieu vapeur-gouttes dépendent des répartitions spatiales des champs de présence et de température et a priori influent également ces derniers. Le milieu diphasique étant potentiellement fortement inhomogène pour l’application visée, une résolution couplée des transferts avec la dynamique de l’écoulement est donc nécessaire. L’approche a été développée au sein du logiciel Neptune\_CFD en partant des méthodes de type P1 codées dans le logiciel cousin Code Saturne. Afin d’aboutir à une évaluation de la contribution radiative suffisamment précise pour un coût numérique raisonnable, plusieurs compromis ont été élaborés au cours des travaux de thèse et notamment :

- une évaluation sur 6 bandes larges des variations des propriétés du milieu non-gris;
- une optimisation de la quadrature angulaire de type T4 pour la résolution spatiale de l’équation

de transfert radiatif validée sur une base étendue de cas test.

Ces travaux ont ainsi permis d'évaluer l'intensité des transferts radiatifs pour différentes configurations d'intérêt, [Gérardin et coll. \(2014\)](#). On représente sur la figure 43, les résultats quantitatifs obtenus sur un écoulement vapeur-gouttes au sein d'un sous-canal dont la température de paroi des crayons varie linéairement (et arbitrairement) avec la hauteur entre 700 et 1100°C sur 30cm pour couvrir un spectre de conditions d'intérêt. Le mode de transfert radiatif reste minoritaire (la convection domine) bien que

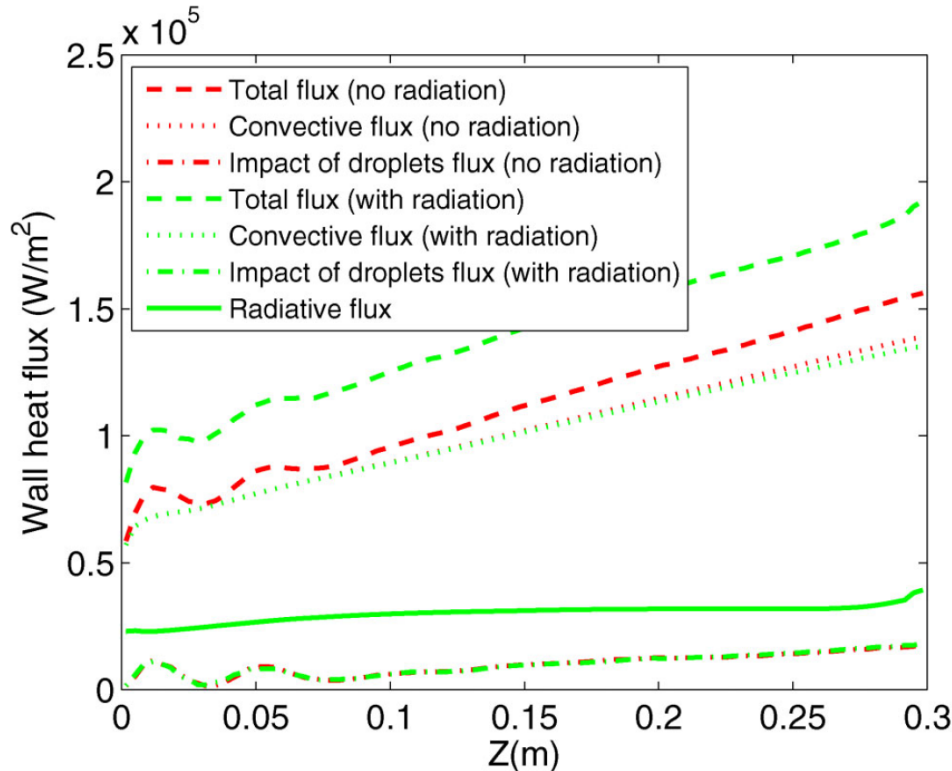


FIGURE 43 – Évolution axiale des différentes contributions du flux de chaleur paroi-écoulement, [Gérardin et coll. \(2014\)](#)

non négligeable. Néanmoins, malgré les compromis, le sur-coût de la prise en compte des transferts radiatifs est notable pour des études de plus grande envergure ce qui limite le champ d'application de la méthode qui n'a pas pu être parallélisée.

En outre ces travaux à l'échelle de la CFD ont été comparés aux évaluations des modélisations utilisées dans les codes de calculs pour la démonstration de sûreté. Dans ces modélisations, on décrit la situation à une échelle plus macroscopique en prenant principalement en compte une évolution axiale au sein du cœur du réacteur, les méthodes les plus avancées en France considérant 3 couronnes radiales. Ces analyses ont notamment permis d'établir les conséquences de différents hypothèses simplificatrices sur la précision du résultat et notamment que :

- pour les géométries d'intérêt, il est justifié de considérer l'évaluation du transfert radiatif à une élévation axiale du sous-canal donné en fonction des seules propriétés de la paroi et du fluide à cette élévation ;
- l'erreur sur l'évaluation quantitative est principalement portée par l'écart entre (i) les propriétés radiatives évaluées à partir des propriétés du milieu moyennées à cette élévation par rapport à (ii) la moyenne des propriétés radiatives à cette même élévation. Cette erreur, pouvant mener à une sous-estimation d'un facteur 0.5, est donc portée par la forte non-homogénéité de la présence de gouttes et, dans une moindre mesure du champ de température vapeur au sein du canal.

Actuellement, l'équipe R&D d'EDF Chatou, en charge du développement du logiciel Neptune\_CFD, s'intéresse à la reprise de ces travaux.

**Analyse d'une configuration avec crayons déformés.** La combinaison de l'ensemble des modélisations développées pour ce régime à gouttes dispersées a fait l'objet d'études numériques dédiées à l'étude de la thermique dans une configuration d'intérêt idéalisée correspondant à une déformation



des crayons combustible. La géométrie simplifiée à l'échelle de trois sous-canaux est similaire à celle présentée pour la dynamique des gouttes en section 3.3 et le cas d'étude correspond à un flux de chaleur en paroi imposé constant et uniforme entre tous les canaux. À convergence, l'estimation CFD permet de déterminer la température de paroi illustrée sur la figure 44. L'efficacité du transfert de chaleur n'est pas homogène entre les canaux : en aval de la zone du canal partiellement bouchée par les déformations des crayons, la température de paroi est plus élevée qu'à une même élévation dans les autres canaux. L'analyse de l'écoulement montre que les débits des écoulements vapeur et gouttes, après avoir été dévié par les déformations plus en amont, restent inhomogènes sur une longueur relativement notable en aval, ce qui explique ce comportement thermique.

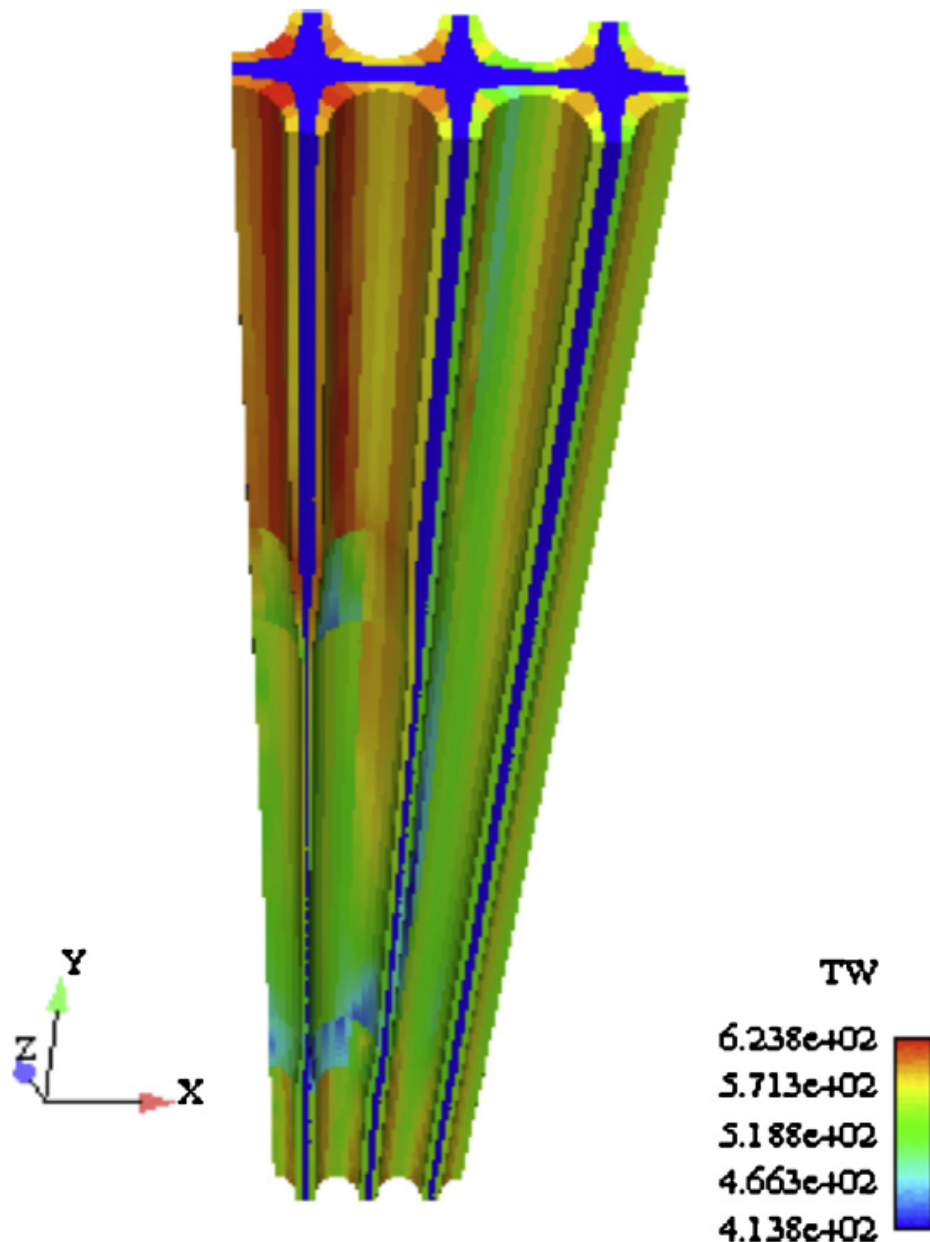


FIGURE 44 – Évolution des températures de paroi de trois sous-canaux parallèles, [Ruyer et coll. \(2013b\)](#), le canal de gauche présentant un bouchage tel qu'idéalisé dans la géométrie de la figure 7.

Ces travaux sont le fruit de la combinaison de plusieurs modélisations dans une approche CFD. La démarche scientifique telle que pensée au lancement de cette activité comporte une phase de validation par confrontation à des travaux complémentaires, de nature expérimentale, et combinant effectivement ces différents phénomènes. Ils ont été poursuivis au sein de l'IRSN et je continue à y contribuer par consultation interposée. On notera notamment les travaux autour des expériences COLIBRI et MAS-



CARA au LEMTA, [Oliveira et coll. \(2020a,b\)](#), et l'expérience COAL, [Repetto et coll. \(2015b\)](#).

## 4.7 Vaporisation rapide

La formation de vapeur est un phénomène impliquant un transfert de masse entre phases, de chaleur entre phases et interface et la génération de quantité de mouvement par l'expansion du fluide qui en résulte. On s'intéresse ici aux spécificités d'une vaporisation induite par un transfert thermique intense de sorte que la croissance de la poche de vapeur soit contrainte par la dynamique du fluide environnant : l'hypothèse d'une expansion isobare n'est plus valide et la cinétique de relaxation mécanique du système n'étant plus négligeable devant celle de la formation de vapeur, on peut observer des déséquilibres mécaniques transitoires (pics de pression, mise en mouvement rapide de fluide). Ces phénomènes correspondent à une part de la problématique accidentelle des RIA et de l'interaction combustible réfrigérant. Dans le domaine de l'étude du RIA, des expériences réalisées en conditions initiales ambiantes (température et pression) ont mis en évidence le phénomène. Mais l'instrumentation de ces essais réalisés au sein de réacteurs de recherche rend difficile l'analyse fine en vue de renseigner des modélisations. Ainsi l'extrapolation des résultats obtenus à des conditions d'intérêt est incertaine. J'ai lancé une collaboration avec Ph. Haberschill, R. Rullière et M. Clausse du laboratoire CETHIL dans le cadre de deux thèses successives, [Abbate \(2018\)](#) et J. Muller (soutenance prévue à l'automne 2021). L'approche retenue a été de reproduire une vaporisation rapide expérimentalement en laboratoire au sein d'un dispositif instrumenté notamment afin d'étudier l'impact des conditions thermodynamiques sur l'intensité des phénomènes.

**Conception générale de l'expérience** Les conditions d'intérêt en température et pression (a priori autour de 300°C et 15,5 MPa) sont trop contraignantes pour une expérimentation en laboratoire. Le choix de travailler avec du CO<sub>2</sub> à la place de l'eau permet, pour atteindre des conditions similaires à celle en eau en terme de pression réduite et de titre thermodynamique, de travailler à des températures basses (légèrement négatives) et des pressions de l'ordre de quelques MPa. On bénéficie en outre d'une chaleur latente plus faible ce qui permet d'abaisser les contraintes sur les niveaux de puissance pour générer une vaporisation violente.

L'apport d'énergie vers le fluide repose sur l'effet Joule sur un élément immergé dans le fluide, la rapidité du transfert étant liée à la géométrie de l'élément (grande surface d'échange) et à celle du dépôt de puissance (décharge d'une batterie de condensateurs). La quantité d'énergie est dimensionnée par la chaleur latente à fournir pour vaporiser le fluide présent autour de l'élément immergé.

La section d'essai fluide, représentée sur la figure 45, est constituée d'un tube contenant à son extrémité basse l'élément chauffant. La géométrie tubulaire permet d'avoir une phénoménologie simple dans la direction principale notamment pour les phénomènes de relaxation de pression. Il est vertical pour permettre à la vapeur générée de s'échapper sous l'effet de la flottabilité. L'extrémité haute est connectée à une cuve jouant principalement le rôle de vase d'expansion.

L'instrumentation comprend principalement des capteurs permettant de contrôler l'état initial du fluide dans la section et des capteurs dédiés à l'essai en tant que tel afin de déterminer :

- la puissance déposée au sein de l'élément chauffant ainsi que la variation temporelle de sa résistivité (afin de remonter à sa température);
- l'évolution temporelle et spatiale de la pression au sein du tube liquide et de la cuve (ciel gazeux).

**Phénoménologie d'un essai** On présente différentes prises de vue d'un essai sur la figure 46 qui illustrent la phénoménologie. Sur le graphe supérieur de la figure 47, on représente le pulse de puissance déposé dans l'élément chauffant : lors de cet essai, la majorité de l'énergie est déposée en 10ms. L'élément chauffant qui fait face au hublot le plus bas se couvre de petites bulles dès les premières ms de l'essai. Dans les premiers instants (non discernable sur les vues présentées), les bulles ont un mouvement alternativement ascendant/descendant, puis la phase d'ébullition relativement massive dure quelques dixièmes de seconde. On observe le détachement et la remontée de bulles dans la section tubulaire.

Sur le graphe du bas de la figure 47 sont représentées les évolutions de la pression au sein du tube de la section d'essai. On distingue mal la différence entre les signaux des deux capteurs  $P_1$  et  $P_2$  : l'analyse du décalage temporel a permis de l'associer à de la propagation acoustique dans le liquide. Une série de pics de l'ordre de  $10^5$  Pa d'amplitude avec une période de l'ordre de 0.01s et s'amortissant en 0,05s correspond à la phase de déclenchement de l'ébullition. Une série de tests dédiés à l'observation fine des événements sur les premières ms a permis de clairement corréler le début de l'apparition d'une très fine couche de vapeur sur l'élément chauffant à l'augmentation rapide de pression du premier pic. Ceci

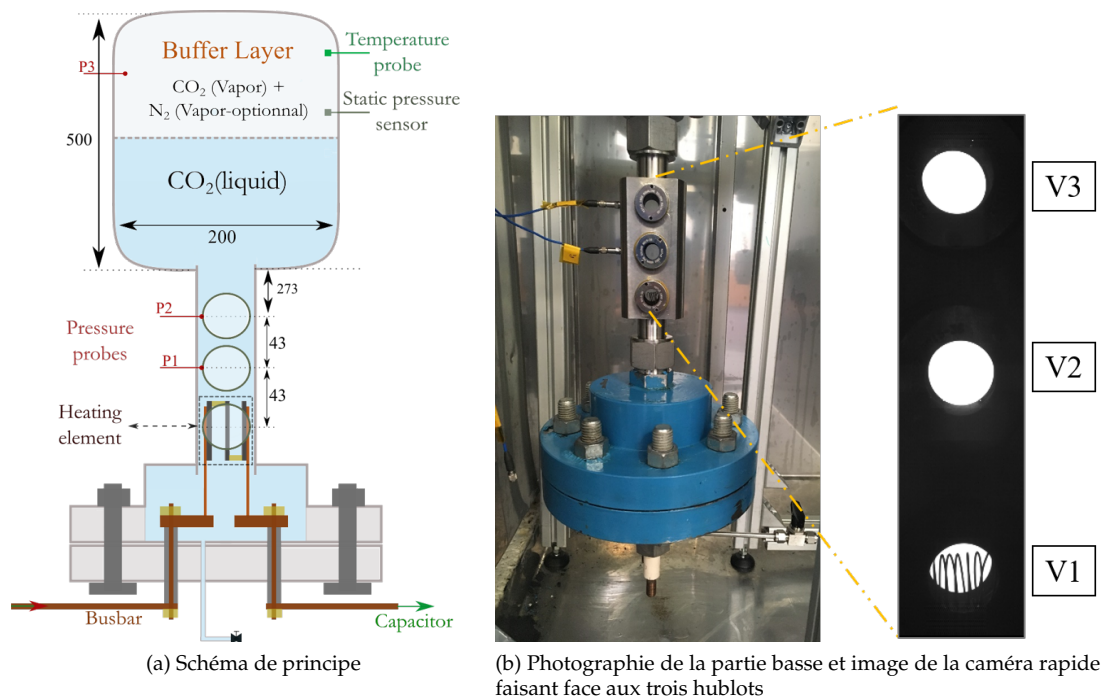


FIGURE 45 – Section fluide du dispositif d'essai pour l'étude de la vaporisation rapide par transfert de chaleur.

suggère que le changement de phase intense des premiers instants est associé à une compression localisée du fluide, suivi d'une relaxation mécanique par propagation acoustique. La pression mesurée par le capteur  $P_3$  situé dans le ciel de gaz au sein de la cuve a une évolution très différente. Le signal augmente tout d'abord mais de manière retardée par rapport aux signaux au sein du liquide. Ce retard correspond à la durée de la propagation acoustique de la source que constitue l'élément chauffant jusqu'au capteur. L'augmentation est bien moindre (500 Pa environ) et le maximum est atteint en quelques centièmes de seconde. Le niveau reste relativement constant avec des oscillations régulières de période de l'ordre de 0.04s. La décroissance du signal jusqu'à retrouver son niveau initial se fait sur un temps de l'ordre de la seconde (non représenté ici).

Les travaux d'interprétation des différentes caractéristiques de ces signaux reposent sur des principes simples. Ainsi, par exemple :

- le va et vient ascendant/descendant a pu être associé au gradient de pression vertical dans le tube du fait de la propagation acoustique ;
- le niveau du maximal de pression au sein du ciel de gaz a été associé à la compression du ciel de gaz du fait de la formation de vapeur dans la partie basse du dispositif (et de la faible compressibilité du liquide) ;
- le volume de vapeur généré ainsi estimé a pu être estimé comme une fraction relativement importante du volume correspondant à la transformation isobare de l'énergie déposée en chaleur latente ;
- le temps de décroissance de la pression dans le ciel de gaz est cohérent avec un temps théorique de condensation, [Legendre et coll. \(1998\)](#), estimé à partir des tailles et vitesses des bulles déduites de l'observation à la caméra rapide.

Mais la phénoménologie la plus pertinente à interpréter par rapport à la motivation de l'expérience correspond à l'intensité du pic de pression associé au déclenchement de l'ébullition.

**Modélisation du premier pic de pression** La phénoménologie décrite précédemment est conforme a priori avec la compréhension actuelle de l'interaction combustible réfrigérant dans le contexte de l'étude de la sûreté nucléaire. L'intensité du pic de pression est a priori associée à la croissance rapide de la poche de vapeur sur l'élément chaud, croissance limitée par la contrainte exercée par le liquide environnant. La résolution de cette dynamique est l'objet du logiciel de simulation numérique CIGALON dont je pilote le développement. Ce logiciel est une approche relativement simplifiée de description des différents phénomènes (éjection de matériaux, transferts thermiques entre solide, liquide et mélange gazeux,

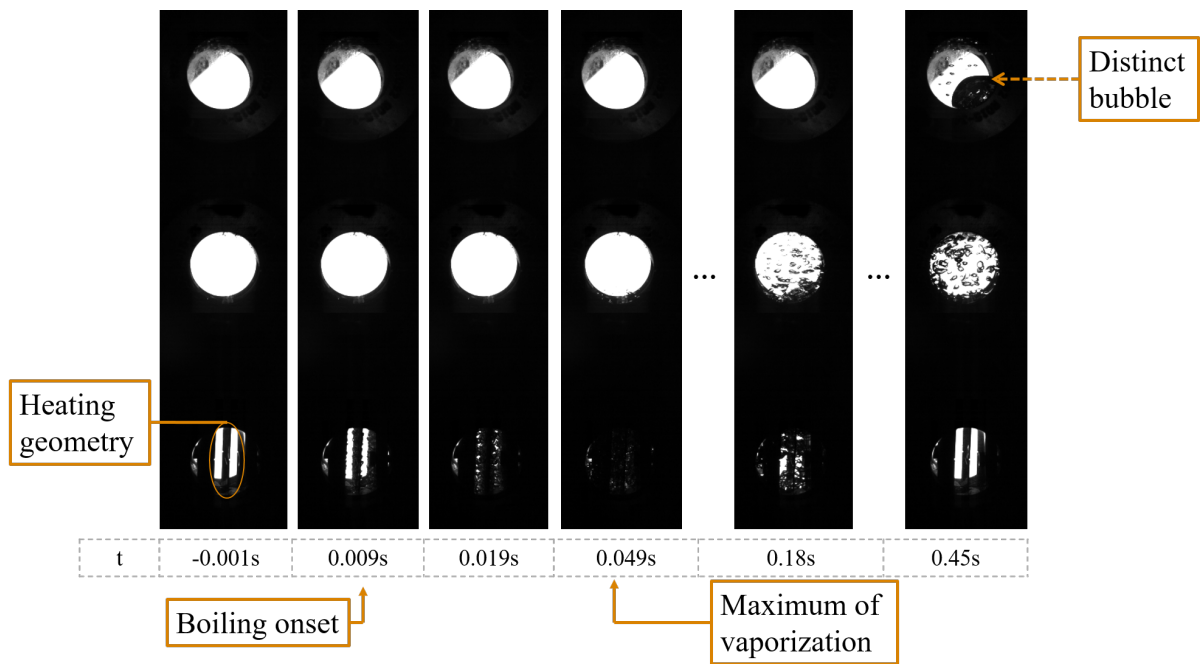


FIGURE 46 – Enregistrement de la caméra rapide pour un essai avec des conditions initiales de 2.86 MPa et  $-6.2^{\circ}\text{C}$  (conditions de saturation) effectué avec des plaques de tungstène et pour un dépôt de 55J.

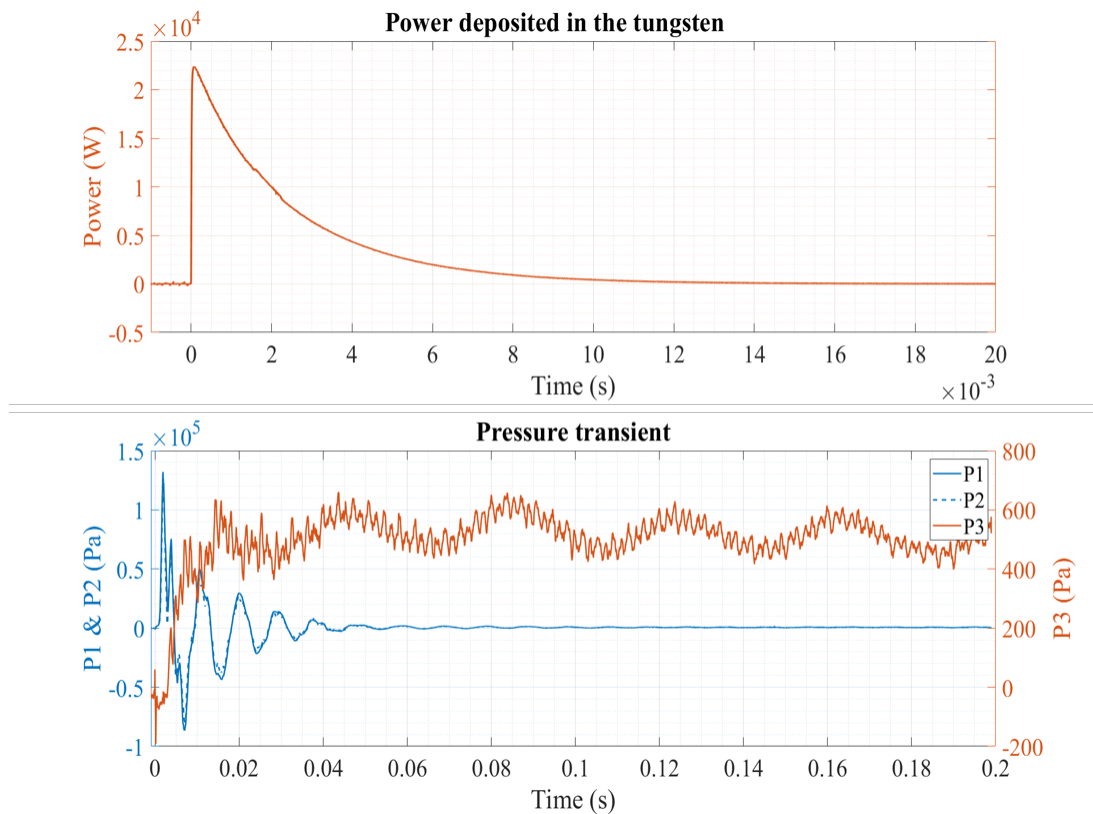


FIGURE 47 – Transitoires de puissance électrique au sein de l’élément chauffant et de pression au sein de la section d’essai, même conditions d’essai que sur la figure 46

dynamique d’expansion du fluide en interaction dans un plus grand ensemble fluide, ...). Les travaux décrits par la suite de ce paragraphe vont un cran plus loin dans la simplification en cherchant un modèle minimal et le plus analytique possible permettant de décrire la phase de pressurisation associée à un changement de phase rapide.

J'ai initié ces travaux pour établir une équation relativement simplifiée pour l'intensité du pic de pression dans le contexte d'une étude préliminaire de sûreté d'un projet de dispositif expérimental, Ruyer (2019a). Les travaux suivants, en cours, concernent une amélioration de ces développements dans le cadre de l'interprétation des essais de la thèse de J. Muller.

Nous considérons la configuration suivante, schématisée sur la figure 48 : une poche de vapeur couvre un élément lui apportant de la chaleur (pour l'expérience, une plaque de tungstène). Cette masse de vapeur est supposée avoir une pression et une température homogènes en son sein ( $P(t)$ ,  $T_v$ ), la température étant arbitrairement fixée constante. Le liquide environnant a pour état de température et de pression ( $P_0$ ,  $T_0$ ).

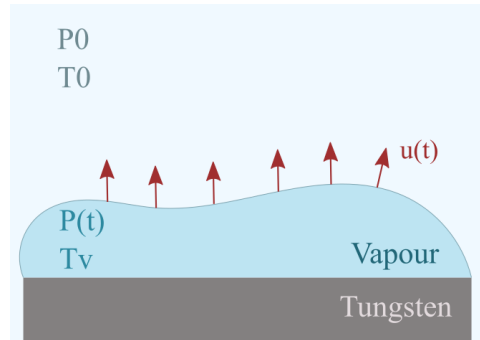


FIGURE 48 – Géométrie de base pour le calcul théorique

La géométrie de la poche de vapeur est considérée de manière simplifiée comme ayant une frontière avec le liquide de surface constante  $S$ . L'évolution temporelle du volume  $V$  de vapeur est liée à la dynamique de vaporisation et de pression selon l'équation

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dm_{vap} v(P, T)}{dt} = \frac{\partial v}{\partial P|_T} \frac{dP}{dt} m_{vap}(t) + \frac{dm_{vap}}{dt} v(P) \quad (37)$$

où la masse de vapeur  $m_{vap}$  et le volume massique  $v$  varient en fonction du temps, ce dernier uniquement du fait de la variation de pression (du fait de l'hypothèse sur la température de vapeur constante).

Par ailleurs, un différentiel de pression entre la poche de vapeur et le liquide environnant génère un déséquilibre mécanique. L'expansion du volume de vapeur est pilotée par l'évolution temporelle du gradient de pression à sa surface. Ainsi, tant que l'évolution de pression dans le liquide peut être modélisée par la propagation acoustique de l'évolution de pression au sein de la vapeur, la vitesse de son interface  $u_{\partial vap}$  varie comme  $u_{\partial vap} = \frac{P(t) - P_0}{\rho c}$  où  $\rho$  et  $c$  sont respectivement la masse volumique et la célérité des ondes de pression dans le liquide environnant. Ainsi, la croissance de ce volume de vapeur est donnée par

$$\frac{dV}{dt} = S u_{\partial vap} \quad (38)$$

Par égalisation des deux expressions (37) et (38) nous pouvons écrire l'équation suivante :

$$\underbrace{-\frac{\partial v}{\partial P} m_{vap}(t) \frac{dP}{dt}}_{(1)} = \underbrace{\frac{dm_{vap}}{dt} v(P)}_{(2)} - \underbrace{S \frac{P(t) - P_0}{\rho c}}_{(3)} \quad (39)$$

Le terme (1) est la tendance de l'évolution de la pression dans la poche de vapeur (on note que  $-\frac{\partial v}{\partial P} m_{vap}(t) > 0$ ). Cette dernière est le bilan entre la contribution de la génération de vapeur (2) qui, à volume constant, tend à augmenter la pression, et l'expansion de la poche de vapeur (3) qui, à masse de vapeur constante, tend à diminuer la pression.

Le pic de pression correspond alors à l'égalité de ces deux contributions (soit  $dP/dt = 0$ ) et une échelle naturelle pour cette augmentation de pression est alors

$$\bar{P} = \sqrt{\frac{\rho c}{S} \tilde{r} T_v \frac{dm_{vap}}{dt}} \quad (40)$$

(en utilisant ici un modèle simplifié pour le volume massique du gaz  $\tilde{r} = ZR/M$  avec le facteur de compressibilité  $Z$ ).

En considérant l'échelle  $P_0$  pour la pression, et des échelles pour la cinétique de vaporisation  $\dot{m}_0$  (l'intensité du transfert de chaleur) et pour la masse de vapeur (la quantité d'énergie convertie en chaleur latente), l'équation (39) peut s'écrire en terme de variables normalisées :

$$\dot{P}^* = -N_1 \frac{1}{m_v^*} (P^*)^2 (P^* - 1) + \frac{\dot{m}_v^*}{m_v^*} P^* \quad (41)$$

L'unique paramètre sans dimension  $N_1$  détermine ainsi l'évolution de la pression et s'écrit :

$$N_1 = \frac{S}{\rho c \tilde{r} T \dot{m}_0} P_0^2 \quad (42)$$

Ce nombre correspond au ratio entre

- la cinétique de croissance d'une poche de vapeur isobare  $\dot{V}_{isob}$  pilotée par une vaporisation :  $\dot{V}_{isob} = \dot{m}_0 v(P_0) = \dot{m}_0 \frac{\tilde{r} T}{P_0}$
- la cinétique de croissance d'une poche de vapeur par un différentiel de pression de l'ordre de la pression ambiante  $P_0$  entre la poche et le liquide environnant  $\dot{V}_{\Delta P} = \frac{S P_0}{\rho c}$

Si la cinétique de croissance par différentiel de pression est la plus faible ( $\dot{V}_{\Delta P} \ll \dot{V}_{isob}$ , soit  $N_1 \ll 1$ ), alors elle impose une limitation à la croissance isobare de la poche de vapeur : la pression au sein de la poche augmente du fait de la vaporisation qui se réalise à volume contraint. Cette augmentation de pression est ainsi un mécanisme à même de générer les pics de pression observés lors de vaporisation induites par un transfert très intense de chaleur vers le fluide. Dans le cas contraire, le volume de la masse de vapeur s'équilibre en pression instantanément avec son environnement à  $P_0$ .

La résolution de cette équation pour les conditions de l'essai décrit dans les sections précédentes est illustrée sur la figure 49 la comparaison entre la prédiction du modèle et les résultats expérimentaux (pression P1). Le modèle permet de reproduire une allure équivalente à l'enveloppe de la pression mesurée. Les oscillations étant associées aux aller-retour des ondes acoustiques dans le dispositif, il reste logique de ne pas les reproduire avec le modèle. La poursuite de ce travail est naturellement de vérifier que cette cohérence entre modèle et mesure reste vraie pour un ensemble de conditions expérimentales, notamment en comparant la prédiction du modèle à la matrice d'essais pour laquelle on a fait varier les conditions de pression, de température et d'énergie déposée dans l'élément chauffant.

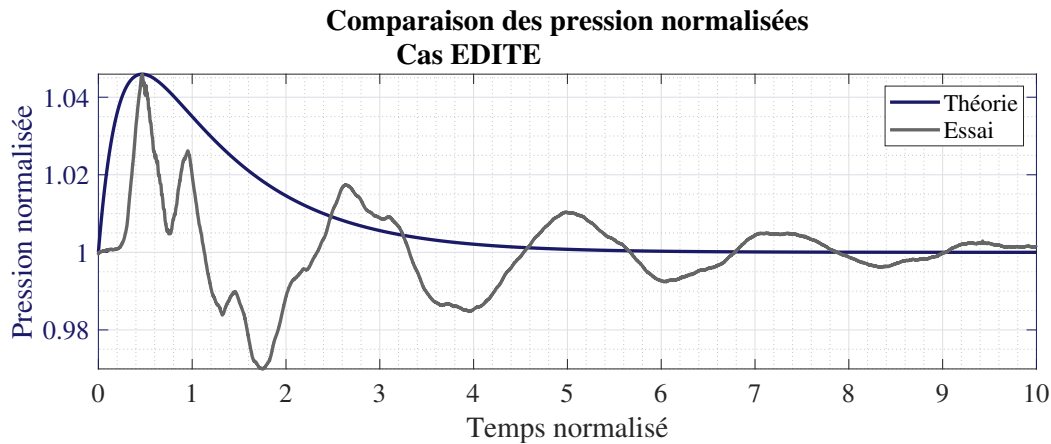


FIGURE 49 – Comparaison de la pression normalisée issue de l'essai (noir) et de son calcul théorique (bleu)



## 5 Synthèse et perspectives des travaux de recherche

Mais votre appel, au fond des soirs, me désespère,  
Car j'ai de grands départs inassouvis en moi.

Vaisseaux, nous vous aurons aimés en pure perte, Opus 118 n° 4  
*L'Horizon Chimérique*  
Jean de La Ville de Miremont

Pour faire la synthèse des travaux évoqués précédemment, je tiens à me limiter à quelques aspects génériques. Les travaux que j'ai été amené à réaliser ou à encadrer couvrent des situations diverses (de la basse à la haute pression, du stagnant au fortement convectif, du liquide sous-refroidi à la vapeur surchauffée, du régime établi au transitoire rapide...) et les moyens d'étude mis en œuvre sont relativement variés (de l'étude d'un système d'équations décrivant la source d'entropie dans la zone interfaciale à l'interprétation d'essais en réacteur de recherche, de la conception de dispositifs expérimentaux au développement d'outils de simulation numérique). Le domaine de recherche reste néanmoins borné à celui de la mécanique et de l'énergétique avec une dominante sur la thématique du changement de phase liquide-vapeur. Je considère ainsi que les activités de recherche à vocation finalisée définies au sein de l'unité de recherche en sûreté nucléaire de l'IRSN à laquelle je suis rattaché m'ont offert pendant une quinzaine d'années l'occasion d'aborder un vaste réseau de connaissances et de développer un large panel de compétences. Elles m'ont amené à monter des collaborations, souvent maintenues sur des projets allant au delà d'une unique thèse, avec des équipes de recherche dans différents domaines et différentes institutions. La contrepartie est évidemment la nécessité de « savoir passer à autre chose » et de conserver une certaine frustration, commune à tous travaux de recherche il me semble, à ne pas toujours pouvoir poursuivre les nombreuses perspectives moins finalisées qu'ont pu dégager les activités auxquelles j'ai contribué. Au delà de l'accompagnement technique de ces activités, le plus souvent réalisé en collaboration avec des chercheurs spécialisés dans le domaine concerné et dont la maîtrise était plus pointue, j'ai pour beaucoup travaillé à leur orientation en tentant de trouver un équilibre entre l'intérêt scientifique et la nécessité d'apporter des réponses aux questions relatives aux problématiques de sûreté. C'est une gageure.

Pour beaucoup des thématiques évoquées précédemment j'ai orienté les travaux autour de l'acquisition de connaissances par la réalisation d'expériences de laboratoire. Approcher des configurations d'intérêt tout en intégrant des contraintes de budget, de contraintes d'exploitation et de précision dans les mesures implique de réaliser des compromis dans la similitude entre conditions de l'expérience et conditions de l'application industrielle. Les travaux de réflexion sur l'orientation de la conception des dispositifs expérimentaux ont abouti à des dispositifs complexes à réaliser; les thèses dédiées à leur mise au point ont eu comme résultat principal une validation qualitative de la capacité à reproduire la phénoménologie sur une maquette de laboratoire instrumentée. Les travaux suivants ont alors permis d'exploiter le dispositif et d'en tirer pleinement profit du point de vue de l'acquisition de connaissances.

Je laisse au lecteur le soin de découvrir dans les sections précédentes certains détails sur les perspectives scientifiques dégagées par les travaux réalisés. La sélection suivante de directions possibles de futurs travaux de recherche en est un extrait.

Concernant la modélisation des transferts de masse et de chaleur en présence d'incondensables, l'approche suivie a permis d'identifier des améliorations au sein de logiciels dédiés à l'étude de transitoires accidentels. Des études actuelles de comparaison avec des données expérimentales permettent d'apprécier l'impact de ces améliorations. Des travaux similaires et généralisant l'approche à la présence de gaz dissous dans le liquide ont été lancés et serviront à terme à l'interprétation des travaux expérimentaux sur la vaporisation décrits en section 4.2.1. Ils seront à intégrer dans une approche CFD (nécessaire pour traiter les phénomènes de convection dans le bassin) avec modélisation de la surface libre.

Les travaux expérimentaux sur l'ébullition convective transitoire menés en collaboration avec l'IMFT ont permis de collecter de nombreuses données dont l'exploitation partielle a déjà été éclairante. Néanmoins, il reste à poursuivre leur interprétation. Les enseignements tirés de l'analyse de cette expérience doivent surtout être confrontés à d'autres configurations et, outre la base de données expérimentales de travaux passés (dont l'interprétation initiale avait motivé ces développements), notamment les programmes outre-Atlantique (MIT, Université de Pittsburgh, INL). Enfin, les essais du programme CIP permettront de mesurer l'impact de cette ébullition transitoire sur le comportement d'un crayon combustible en situation accidentelle : l'interprétation de ces essais sera à ce titre un

Les transferts de chaleur entre un écoulement de vapeur et de gouttes et une paroi ont motivés plusieurs travaux pour permettre à terme leur simulation à l'aide d'une approche de type CFD. Aujourd-



d'hui, ces travaux sont en partie repris tandis que des nouvelles données expérimentales (notamment les expériences COLIBRI et MASCARA) sont acquises. La perspective de confrontation calculs-expérience permettra d'évaluer la suffisance des modélisations proposées par le passé notamment. Mais l'approche CFD n'est pas l'approche viable pour évaluer la situation accidentelle et il convient également de développer une méthodologie dite de "changement d'échelle" permettant de déduire des travaux CFD une modélisation effective pour les outils d'évaluation. Un travail post-doctoral a été défini sur ce sujet. Enfin, il reste également une forte incertitude concernant la caractérisation de l'écoulement de gouttes pour l'application finale. Les réflexions en cours sont donc également de développer une approche expérimentale permettant de mesurer les propriétés d'un tel écoulement en aval d'un front de trempe en conditions d'intérêt.

L'analyse des écoulements de vidange granulaire a permis d'identifier les mécanismes et modèles principaux. L'impact du frottement pariétal sur les parois du silo, spécificité des géométries élancées considérées, illustre une thématique de recherche potentielle qui gagnerait à être traitée de manière conjointe par des approches expérimentale, numérique avec représentation explicite des grains et des contacts, et enfin numérique avec une modélisation du milieu granulaire comme un milieu continu. un projet ANR avait été bâti en ce sens. Une seconde thématique plus générique concerne dans notre cas particulier la dilatation en sortie de silo de l'écoulement granulaire. Il s'agit d'étendre l'approche de modélisation continue en faisant varier la fraction volumique de grains en fonction du nombre inertiel, ainsi que proposé par les modèles de rhéologie de type  $\mu$ -I.

Les travaux expérimentaux sur la vaporisation explosive ont fourni données et visualisations d'un phénomène impliquant de manière très couplée les trois transferts du changement de phase (masse, quantité de mouvement et chaleur). L'approche CIGALON est une modélisation simplifiée ne permettant pas de décrire l'impact de l'acoustique sur l'évolution de pression. Un sujet de thèse ([en ligne](#)) a été construit en partenariat avec EDF sur la confrontation des résultats expérimentaux avec une approche de simulation de type volumes finis modélisant les écoulements compressibles pour un fluide homogène diphasique. Enfin, l'interprétation des essais du programme CIP permettra d'étudier la phénoménologie dans des conditions haute pression et haute température pour lesquelles aucune donnée n'est actuellement disponible.

Par ailleurs mes activités vont se poursuivre dans le domaine de l'accompagnement et l'animation d'activités internationales, notamment pour l'utilisation de la CFD dans les études de sûreté (rédaction en cours d'un document sur les capacités et limitations des outils de type CFD pour les études de sûreté, rédaction d'un guide des bonnes pratiques, accompagnement dans l'organisation de benchmarks et de conférences, communications...).

Au sein de l'équipe du laboratoire, plusieurs sous-groupes thématiques co-existent et je suis le référent pour la thématique thermo-hydraulique (5 permanents et 2 doctorants actuellement). Je réalise un suivi des activités correspondantes en soutien à la cheffe de laboratoire et je compte ainsi développer à la fois l'animation scientifique mais aussi les échanges (d'information et techniques) avec les autres personnes du service travaillant sur cette même thématique.

Enfin, une perspective d'évolution de carrière au sein de l'IRSN correspond à ma candidature à la filière dite « expert »<sup>12</sup>. Suivre cette filière permet de rejoindre un collège de chercheurs spécialisés dans les différents domaines d'activité de l'Institut et dont la fonction d'animation et de conseil est utile au développement des activités scientifiques.

D'une manière plus générale, je reste très attaché à trouver un certain équilibre entre mes différents types d'activités au sein de l'Institut, à savoir

- les activités de recherche à proprement parler qui sont centrées sur un objectif d'acquisition de connaissances ou de développement d'outils (expérimentaux comme numériques)
- les activités d'études (applications d'outils à des fins d'interprétation d'essais ou de dimensionnement de dispositifs d'essais)
- l'animation de groupes de travail à l'échelle des laboratoires de l'IRSN Cadarache comme à l'échelle internationale
- les activités de support à l'expertise (synthèse et transmission de connaissances issues de la R&D, analyse détaillée de dossiers d'évaluation des exploitants d'installation nucléaire, échanges lors de l'instruction technique, prise de position vis à vis de l'autorité de sûreté)

J'observe avec l'expérience qu'elles s'enrichissent les unes des autres, mais réalisant également qu'elles peuvent chacune prendre le pas sur les autres.

<sup>12</sup>. Cette filière correspond à une composante alternative à l'évolution des responsabilités au sein de la pyramide hiérarchique de l'Institut.

## 6 Liste des activités et publications

### 6.1 Identité

Né le 22 novembre 1979 à Versailles (78).

Fonction exercée : Ingénieur-chercheur

Identifiant ORCID [0000-0001-6221-9460](https://orcid.org/0000-0001-6221-9460)

Affiliation :

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire  
Pôle de sûreté des installations et des systèmes nucléaires  
Service de Maîtrise des Incidents et des Accidents  
Laboratoire de Statistiques et des Méthodes Avancées  
Centre d'Études de Cadarache

Unité de recherche :

IRSN / Direction de la Sûreté Nucléaire ([Évaluation HCERES](#))

### 6.2 Formation

- 1997 : Baccalauréat scientifique au Lycée Hoche - Versailles, mention assez-bien
- 1997-1999 : Classes préparatoires PCSI puis PC au Lycée Hoche
- 1999-2002 : Diplôme d'ingénieur de l'École Centrale de Lyon, option Mécanique des fluides, filière environnement
- 2001-2002 : Diplôme de DEA de mécanique des fluides de l'école doctorale MEGA-Lyon, spécialité mécanique des fluides, mention assez-bien
- 2002-2006 : Thèse de doctorat de l'école doctorale de l'École Polytechnique, spécialité mécanique : Modèle de champ de phase pour l'étude de l'ébullition dirigée par L. Truskinovsky et soutenue le 17 juillet 2006, mention très honorable avec félicitations du jury

### 6.3 Expérience professionnelle

- 2002 : Stage de DEA au CEA-DEN/DER/SSTH au centre de Grenoble
- 2002-2006 : Thèse réalisée au CEA-DEN/DER/SSTH, centre de Grenoble
- 2006-2008 : Post-doctorat à l'IRSN, centre de Cadarache
- 2008-présent : CDI d'ingénieur-chercheur à l'IRSN, centre de Cadarache

### 6.4 Montage et tutorat de thèses

#### Thèses soutenues

- Baalbaki D., Simulation and modeling of turbulent non isothermal vapor-droplet dispersed flow, thèse de doctorat de l'Université Perpignan Via Domitia, spécialité « sciences de l'ingénieur », 15 décembre 2011, dirigée par F. Bataille et co-encadrée par A. Toutant.
- Gérardin J., Évaluation du transfert radiatif dans le cœur d'un Réacteur à Eau Pressurisée (REP) lors de la phase de renoyage d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP), Université de Lorraine, spécialité « mécanique énergétique », 28 septembre 2012, dirigée par P. Boulet et co-encadrée par N. Seiler Marie.
- Visentini R., Étude expérimentale des transferts thermiques en ébullition transitoire, Université de Toulouse, spécialité « énergétique et transferts », 26 octobre 2012, dirigée par C. Colin.
- Baudin N., Étude expérimentale et modélisation de l'ébullition transitoire, Université de Toulouse, spécialité « énergétique et transferts », 26 octobre 2015, co-dirigée par C. Colin et J. Sebilliau.
- Zhou Y., Éjection de gaz et de grains suite à la rupture d'un crayon de combustible nucléaire : modélisation de la dynamique, Université d'Aix-Marseille, 2 novembre 2016, dirigée par P. Aussillous et co-encadrée par P.-Y. Lagrée.
- Abbate A., Étude expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide, Université de Lyon, 8 janvier 2018, dirigée par Ph. Haberschill et co-encadrée par R. Rullière.
- Scheiff V., Étude expérimentale et modélisation du transfert de chaleur de l'ébullition transitoire, Université de Toulouse, spécialité « énergétique et transferts », 13 décembre 2018, co-dirigée par C. Colin et J. Sebilliau.

- Zou Z., Étude de l'éjection de grains hors d'un cylindre pressurisé Université d'Aix-Marseille, 16 octobre 2019, dirigée par P. Aussillous et co-encadrée par P.-Y. Lagrée.

#### Thèses en cours

- Muller J., Étude d'un choc thermique au sein d'un fluide, Université de Lyon, co-dirigée par M. Clause et R. Rullière.
- Martin J., Étude expérimentale et modélisation de l'autovaporisation en vase, Université Catholique de Louvain, dirigée par Y. Bartosiewicz et co-encadrée par M. Duponcheel.

#### Thèses en projet

- Modélisation et simulation numérique d'un choc thermique au sein d'un fluide, Thèse en collaboration avec EDF R&D Saclay, laboratoire IMSIA, école doctorale de l'Université Paris Saclay, direction Ph. Lafon.
- Ébullition transitoire lors d'un RIA : étude expérimentale depuis des conditions analytiques à des conditions réacteur, cotutelle Universités de Toulouse et de Pittsburgh, direction C. Colin et H. Ban.

## 6.5 Participation au suivi ou à des jurys de thèse

#### Membre de jury

- Wunsch D., Theoretical and numerical study of collision and coalescence -Statistical modeling approaches in gas-droplet turbulent flows, thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 16 décembre 2009.
- Lelong F., Étude du refroidissement d'une paroi chaude sous l'effet de l'impact d'un train de gouttes mono-dispersées, thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, 4 octobre 2010.
- Bois G., Transferts de masse et d'énergie aux interfaces liquide/vapeur avec changement de phase : proposition de modélisation aux grandes échelles des interfaces, thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, 4 février 2011.
- Le Belguet A., Étude de l'ébullition en film du sodium autour d'une sphère à haute température, Université de Grenoble, 29 novembre 2013.
- Audard F., Modélisation eulérienne de la vidange d'un silo et de l'expansion du panache, Université de Toulouse, 20 décembre 2016.
- De Lorenzo M., Modélisation et simulation numérique des écoulements diphasiques métastables, Université Paris-Saclay, 28 mai 2018.
- Pena-Carrillo J.-D., Étude expérimentale du transfert paroi/fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire, Université de Lorraine, Nancy, 10 décembre 2018.
- Labit J.-M., Modélisation multiphysique des transitoires d'insertion de réactivité et méthodologie de validation appliquée au réacteur CABRI, Université de Grenoble Alpes, Saint-Paul Lez Durance, 15 octobre 2020.

#### Participation au suivi

- A. Foissac, Modélisation des interactions entre gouttes en environnement hostile, Université Pierre et Marie Curie, 2011.
- J.-M. Labit, Contribution à la démarche de validation expérimentale des OCS multiphysiques sur les transitoires de puissance dans le réacteur CABRI, Université de Grenoble Alpes, 2020.

## 6.6 Encadrement de post-doctorants

- A. El Amokrane (2014-2015) CNRS tutorat Adrien Toutant, financement ANR DENOPI
- M. El Houssami (2016-2017) CNRS tutorat Adrien Toutant, financement ANR DENOPI

## 6.7 Stages

#### Encadrement de stages

- Pesenti A., été 2005, CEA Grenoble
- Lelong F., 04-10/2007, IRSN

- Cognet R., 04-10/2008, IRSN
- Deffayet F., 06-08/2009, IRSN
- Biton B., 04-10/2010, IRSN
- Tan F. 04-09/2012, IRSN
- Nattes P.-H. 04-09/2014 IRSN
- Vinceneux Th., 04-09/2015 IRSN
- Ben Lakhal I., 03-08/2016, IRSN
- Muller J., 03-09/2018, IRSN

#### **Membre jury stage**

- Foissac A. Génie Atomique Promotion 2007/2008 EDF R&D CHATOU Modélisation et simulation de la condensation en paroi dans le code NEPTUNE\_CFD par une approche diphasique Avril 2008 à Septembre 2008
- Lenoir B., Génie Atomique 2011-2012 à l'INSTN Saclay. Étude du renoyage d'un cœur dégradé, caractérisation des lits de débris. Stage IRSN-PSN-SEREX-LE2M été 2012.

### **6.8 Activités d'évaluation, comité de lecture**

#### **Journaux**

- Nuclear Engineering and Design,
- Applied Thermal Engineering,
- International Journal of Multiphase Flow,
- Experimental Thermal and Fluid Science,
- Mécanique et Industrie,
- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, Journal of Power and Energy,
- International Journal of Heat and Mass Transfer.

#### **Conférences**

- M&C - International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering, 2017,
- 15th International Heat Transfer Conference, IHTC15, 2014,
- NURETH16 International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, 2015
- TopFuel, Reactor fuel performance, 2018,
- NURETH18 International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, 2019
- ATH2020, Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics, cancelled,
- CFD4NRS8, Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor Safety - OECD/NEA Workshop, 2020.

**Évaluation de projet** Programme de subvention à la découverte du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie au Canada.

### **6.9 Représentation**

#### **Comité pour la Sûreté des Installations Nucléaires de l'Agence pour l'Énergie Nucléaire de l'Organisation pour la Coopération et le Développement Économique (OECD/NEA/CSNI)**

- Représentant IRSN et France au sein du groupe de travail sur l'analyse et la gestion des accidents, [Herranz et coll. \(2020\)](#), ([présentation sur le site de l'OCDE](#))
- Membre du bureau du WGAMA (mandat 2020-2023),
- Co-animateur du sous-groupe de travail CFD-TG du WGAMA.

#### **Projet quadri-partite, EDF-CEA-Framatome-IRSN NEPTUNE, Nouvel Environnement Partagé de Thermohydraulique pour le Nucléaire**

- co-représentant IRSN pour le suivi du développement du logiciel Neptune\_CFD,
- co-représentant IRSN au comité de pilotage du projet NEPTUNE.

**Présidence de session de conférence**

- 8th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, Jeju, Korea, 26 -31/05 2013,
- Séminaire franco-japonais NRA-JAEA-IRSN, 11-13/11 2019,
- Virtual CFD4NRS-8 : Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor Safety - OECD/NEA Workshop, 25-27 nov. 2020.

**Comité scientifique de conférences**

- Virtual CFD4NRS-8 : Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor Safety - OECD/NEA Workshop, 25-27 nov. 2020,
- Dispersed Two-Phase Flow 2020, reporté.

**6.10 Publications - communications****Thèse**

P. RUYER : *Modèle de champ de phase pour l'étude de l'ébullition*. Thèse de doctorat, École Polytechnique, 2006.

**Publications dans les revues à comité de lecture**

- E. KREPPER, P. RUYER, M. BEYER, D. LUCAS, H.-M. PRASSER et N. SEILER : CFD simulation of poly-dispersed bubbly two phase flow around an obstacle. *Science and Technology of Nuclear Installations*, (320738):12, 2008. doi: [10.1155/2009/320738](https://doi.org/10.1155/2009/320738).
- P. RUYER et N. SEILER-MARIE : Advanced model for polydispersion in size in boiling flows - Modélisation avancée de la polydispersion en taille des écoulements bouillants. *La Houille Blanche*, 4:65–71, 2009. doi: [10.1051/lhb/2009046](https://doi.org/10.1051/lhb/2009046).
- Ch. MOREL, P. RUYER, N. SEILER-MARIE et J. M. LAVIÉVILLE : Comparison of several models for multi-size bubbly flows on an adiabatic experiment. *International Journal of Multiphase Flow*, 36(1):25–39, 2010.
- E. KREPPER, Ch. MOREL, B. NICENO et P. RUYER : CFD modeling of adiabatic bubbly flow. *Multiphase Science and Technology*, 23(2-4):129–164, 2011. ISSN 0276-1459.
- S. MIMOUNI, J. LAVIÉVILLE, N. SEILER et P. RUYER : Combined evaluation of second order turbulence model and polydispersion model for two-phase boiling flow and application to fuel assembly analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 241(11):4523–4536, 2011.
- J. GÉRARDIN, N. SEILER, P. RUYER, L. TROVALET et P. BOULET : P1 approximation, MDA and IDA for the simulation of radiative transfer in a 3D geometry for an absorbing scattering medium. *J. Quant. Spec. Rad. Transfer*, 113:140–149, 2012.
- A. FOISSAC, J. MALET, S. MIMOUNI, P. RUYER, F. FEUILLEBOIS et O. SIMONIN : Eulerian simulation of interacting PWR sprays including droplet collisions. *Nuclear Technology*, 181(1):133–143, 2013.
- J. GÉRARDIN, N. SEILER, P. RUYER et P. BOULET : Radiative transfer during the reflooding step of a LOCA. *J. Quant. Spec. Rad. Transfer*, (128):43–51, 2013.
- D. BAALBAKI, A. TOUTANT, P. RUYER et F. BATAILLE : CFD model for lift force in a wall-bounded flow. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 5:251–264, décembre 2013.
- M. GRADECK, N. SEILER, P. RUYER et D. MAILLET : Heat transfer for Leidenfrost drops bouncing onto a hot surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 47:14–25, 2013.
- P. RUYER, N. SEILER, B. BITON, F. LELONG, F. SECONDI, D. BAALBAKI et M. GRADECK : Two-phase flow across a partially damaged core during the reflood phase of a LOCA. *Nuclear Engineering and Design*, 264:187 – 194, 2013. ISSN 0029-5493. doi: [10.1016/j.nucengdes.2013.02.026](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.026).
- J. GÉRARDIN, P. BOULET et P. RUYER : Taking into account accurately the radiative heat transfer for the simulation of core reflooding. *Nuclear Science and Engineering*, 178:103–118, 2014.

- R. VISENTINI, C. COLIN et P. RUYER : Experimental investigation of heat transfer in transient boiling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 55(Supplement C):95 – 105, 2014. ISSN 0894-1777. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089417771400065X>. doi: [10.1016/j.expthermflusci.2014.02.026](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.02.026).
- Y. ZHOU, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Discharge flow of a bidisperse granular media from a silo : discrete particle simulations. *Phys. Rev. E*, 92:062204, 2015. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.92.062204>. doi: [10.1103/PhysRevE.92.062204](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062204).
- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : Turbulent flow and transient convection in a semi-annular duct. *International Journal of Thermal Sciences*, 108(Supplement C):40 – 51, 2016. ISSN 1290-0729. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072916304641>. doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.017](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.017).
- Y. ZHOU, P.Y. LAGRÉE, S. POPINET, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Experiments on, and discrete and continuum simulations of, the discharge of granular media from silos with a lateral orifice. *Journal of Fluid Mechanics*, 829:459–485, 2017. doi: [10.1017/jfm.2017.543](https://doi.org/10.1017/jfm.2017.543).
- V. SCHEIFF, N. BAUDIN, P. RUYER, J. SEBILLEAU et C. COLIN : Transient flow boiling in a semi-annular duct : From the onset of nucleate boiling to the fully developed nucleate boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138:699–712, 2019. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.069](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.069).
- Y. ZHOU, P.-Y. LAGRÉE, S. POPINET, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Gas-assisted discharge flow of granular media from silos. *Phys. Rev. Fluids*, 4:124305, Dec 2019. doi: [10.1103/PhysRevFluids.4.124305](https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.124305).
- Z. ZOU, P. RUYER, P.-Y. LAGRÉE et P. AUSSILLOUS : Discharge of a silo through a lateral orifice : role of the bottom inclination versus friction. *Phys. Rev. E*, 102:052902, Nov 2020. doi: [10.1103/PhysRevE.102.052902](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.052902).
- V. SCHEIFF, F. BERGAME, J. SEBILLEAU, P. RUYER et C. COLIN : Experimental study of steady and transient subcooled flow boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164:120548, 2021. ISSN 0017-9310. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120548](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120548).

## Communications avec actes dans des congrès internationaux

- D. JAMET et P. RUYER : A quasi-compressible model dedicated to the direct numerical simulation of liquid-vapor flows with phase-change. In *5th international conference on multiphase flow, Yokohama, Japan*, numéro 169, June 2004.
- P. RUYER, N. SEILER, M. BEYER et F.-P. WEISS : A bubble size distribution model for the numerical simulation of bubbly flows. In *ICMF International Conference on Multiphase Flow, Leipzig, Allemagne, 09-13/07, 2007*.
- S. MIMOUNI, P. RUYER, N. SEILER et J. M. LAVIEVILLE : Combined evaluation of second order turbulence model and polydispersion model for two-phase boiling flow and applications to fuel assembly analysis. In *NURETH13, 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Kanazawa, Japan, 27.09 - 02.10, 2009*.
- F. LELONG, M. GRADECK, N. SEILER, P. RUYER, G. CASTANET et P. DUNAND : Dynamic behaviour of liquid droplets bouncing onto a hot slab. In *International Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS EUROPE), Bmo, Czech Republic, 06.09 - 08.09, 2010*.
- P. RUYER, K. KESHK, F. DEFFAYET, Ch. MOREL, J. POUVREAU et F. FRANÇOIS : Numerical simulation of condensation in bubbly flow. In *CFD4NRS-3, Washington, USA, 14 -16/09, 2010*.
- N. SEILER, P. RUYER et B. BITON : Thermal-hydraulic sub-channel analysis in ballooned regions of a damaged core during the reflood phase of a LOCA, paper n° 140. In *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14) Toronto, Canada 25-29.09 2011 Nur (2011)*.
- N. SEILER, P. RUYER, F. LELONG, F. SECONDI et M. GRADECK : CFD simulations of ballooned regions of a damaged core during the reflood phase of a LOCA , paper n° 139. In *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14) Toronto, Canada 25-29.09 2011 Nur (2011)*.



- A. FOISSAC, J. MALET, S. MIMOUNI, P. RUYER, F. FEUILLEBOIS et O. SIMONIN : Eulerian simulation of interacting PWR sprays : Influence of droplet collisions, paper n° 111. In *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14) Toronto, Canada 25-29.09 2011* Nur (2011).
- R. VISENTINI, C. COLIN et P. RUYER : Experimental investigation on heat transfer in transient boiling. In *ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference, paper HT201258245, 8-12 juillet 2012, Puerto Rico, USA, 2012a.*
- R. VISENTINI, C. COLIN et P. RUYER : Experimental investigation on heat transfer in transient boiling. In *ECI 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer 2012, Lausanne (June 3-7, 2012), 2012b.*
- J. GÉRARDIN, N. SEILER, P. RUYER et P. BOULET : Radiative transfer during the reflooding step of a LOCA. In *EUROTHERM SEMINAR n° . 95 Computational Thermal Radiation in Participating Media IV, 18-20/04, Nancy, France, 2012.*
- P. RUYER, J. GÉRARDIN et P. BOULET : CFD study of mist flow wall heat transfer downstream the quench front during the reflood stage of a LOCA, paper #023. In *The 15h International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics NURETH-15 , Pisa, Italy, 12-17/05* Nur (2013).
- R. VISENTINI, P. RUYER et C. COLIN : Experimental study of heat transfer during transition toward film boiling. toward a better understanding of the clad to coolant heat transfer during a RIA, paper #024. In *The 15h International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics NURETH-15 , Pisa, Italy, 12-17/05* Nur (2013).
- R. VISENTINI, P. RUYER et C. COLIN : Experimental study of transient boiling, paper # 120. In *8th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, Jeju, Korea, 26 -31/05, 2013b.*
- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : Heat transfer characterization during transient boiling, paper ihtc158637. In *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC15, Kyoto, Japan, 10-15/08, 2014.*
- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : Experimental study of transient nucleate boiling. In *9th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, 26-30/04, Boulder, Colorado, 2015a.*
- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : Transient convective boiling : analysis of experimental results. In *NURETH-16 International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Hyatt Regency Chicago, 30.08-04.09, 2015b.*
- Y. ZHOU, P.-Y. LAGRÉE, S. POPINET, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Discharge flow of granular media from silos with lateral orifice : experiments, discrete, and continuous simulations. In *XXIV ICTAM, 2126/08, Montréal, Canada, 2016.*
- P. RUYER : Clad to coolant heat transfer during RIA in PWR conditions. In *Top Fuel 2016, 11-16/09, Boise, Idaho, U.S.A., 2016.*
- V. SCHEIFF, N. BAUDIN, P. RUYER, J. SEBILLEAU et C. COLIN : Experimental study of nucleate boiling during transient heating. In *Proceedings of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 12-15/06, Iguazu Falls, Brazil* ExH (2017).
- A. ABBATE, R. RULLIERE, Ph. HABERSCHILL et P. RUYER : Experimental study of a solid/liquid thermal interaction. In *Proceedings of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 12-15/06, Iguazu Falls, Brazil* ExH (2017).
- A. ABBATE, R. RULLIERE, Ph. HABERSCHILL et P. RUYER : Experimental study of RIA related fuel-coolant interaction. In *NURETH-17, 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Xian, China, September 3-8, 2017* Nur (2017).
- J. MARTIN, T. KAMIN et P. RUYER : Analysis of the Fukushima-Daiichi unit-4 spent fuel pool loss-of-cooling accident by means of the TETHYS code : Highlight of major thermal-hydraulic modeling issues. In *NURETH-17, 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Xian, China, September 3-8, 2017* Nur (2017).

- P. AUSSILLOUS, Y. ZHOU, P. RUYER et P.-Y. LAGRÉE : Discharge flow of granular media from silos with a lateral orifice and injection of air. In *Powders and Grains 2017 - 8th International Conference on Micromechanics on Granular Media*, volume 140, page 03052, 2017. doi: [10.1051/epjconf/201714003052](https://doi.org/10.1051/epjconf/201714003052). URL [10.1051/epjconf/201714003052](https://www.epjconf.org/epjconf/201714003052).
- V. SCHEIFF, P. RUYER, J. SEBILLEAU et C. COLIN : Experimental study of nucleate and film boiling during transient heating. In *The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer 12-15/03, Nagasaki, Japan*, 2018.
- P. RUYER, Y. ZHOU, A. ABBATE, Z. ZOU, P. AUSSILLOUS, R. RULLIÈRE et Ph. HABERSCHILL : Evaluation of the consequences of fuel dispersion and interaction with coolant following a cladding failure induced by a RIA- paper a0081. In *TopFuel 2018, Praha, Czech Republic, 30 sept. - 04 oct.*, 2018. URL <https://www.euronuclear.org/archiv/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0081-fullpaper.pdf>.
- J. MULLER, R. RULLIÈRE, P. RUYER et M. CLAUSSE : Experimental Study of Solid/Liquid Thermal Shock in Carbon Dioxide. In *Proceedings of the 5th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'20), Virtual Conference – October, 2020*, 2020. doi: [10.11159/icmfht20.114](https://doi.org/10.11159/icmfht20.114). URL [https://avestia.com/MHMT2020\\_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT\\_114.pdf](https://avestia.com/MHMT2020_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT_114.pdf).
- P. RUYER, J. ROY, C. VIRON et C. HEIB : Using CFD in the frame of safety studies – Some IRSN experiences. In *Virtual CFD4NRS-8 : Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor Safety - OECD/NEA Workshop, 25-27 nov.*, 2020.

## Communications avec actes dans des congrès nationaux

- P. RUYER et D. JAMET : Un modèle quasi-compressible dédié à la simulation numérique directe des écoulements liquide-vapeur avec changement de phase. In *Congrès Français de Thermique, SFT 2004, Presqu'île de Giens, 25-28 mai*, 2004.
- D. JAMET, C. FOUILLET, P. RUYER et J. KLINGER : Méthodes à interfaces diffuses pour la modélisation des écoulements polyphasiques. In *177ème Session du comité scientifique et technique de la Société Hydrotechnique de France, Progrès récents des méthodologies de modélisation des écoulements diphasiques, Lyon, France, 24-26 novembre*, 2004.
- P. RUYER, L. TRUSKINOVSKY et D. JAMET : Un modèle de champ de phase pour l'ébullition. In *La mécanique des fluides numérique, séminaire CEA-GAMNI, 29-30 janvier, Institut Henri Poincaré Paris*, 2007.
- N. SEILER, P. RUYER et G. REPETTO : Simulations CFD d'écoulements bouillants avec prise en compte de la distribution en taille des bulles à l'aide d'une méthode des moments. In *Société Française de Thermique, Toulouse, France, 03-06/06/2008*, 2008. URL [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/actes/congres\\_2008/387.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/actes/congres_2008/387.pdf).
- J. GÉRARDIN, A. HASSINI, P. BOULET, N. SEILER, P. RUYER et G. REPETTO : évaluation des échanges radiatifs dans un assemblage d'un réacteur nucléaire lors de la phase de renoyage d'un aprp. In *Congrès français de thermique SFT 2010, Le Touquet, France, 25-28/05*, numéro 41, 2010. URL [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres\\_2010/communications/41.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2010/communications/41.pdf).
- M. GRADECK, F. LELONG, N. SEILER, P. RUYER et D. MAILLET : Modélisation du flux de chaleur à l'impact d'une goutte en situation de Leidenfrost. In *Congrès français de thermique SFT, Perpignan, 24-27/05*, numéro 267, 2011. URL [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres\\_2011/Communications/267.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2011/Communications/267.pdf).
- J. GÉRARDIN, P. BOULET, P. RUYER et N. SEILER : Évaluation du transfert radiatif dans un cœur de réacteur à eau pressurisée (REP) lors de la phase de renoyage d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). In *Congrès français de thermique SFT 2013, Gérardmer, France, 28-31/05*, 2013. URL [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres\\_2013/articles/6136.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2013/articles/6136.pdf).

- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : étude expérimentale de la convection transitoire et établie dans une conduite semi-annulaire chauffée. *In 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France, 26-30/08, 2013.*
- V. SCHEIFF, N. BAUDIN, P. RUYER, J. SEBILLEAU et C. COLIN : Ébullition nucléée lors d'un transitoire de température. *In Actes du congrès français de thermique SFT, 2016.* URL [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres\\_2016/resumes\\_toulouse/152.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2016/resumes_toulouse/152.pdf).

## Communications sans actes dans des congrès internationaux

- P. RUYER, N. SEILER, M. BEYER et F.-P. WEISS : Application of the moment density method in CFD code to model bubble size distribution. *In European TwoPhase Flow Group Meeting, IMFT Toulouse, 22-24/05, 2007.*
- R. VISENTINI, C. COLIN et P. RUYER : Experimental investigation on heat transfer in transient boiling. *In 50th European Two-Phase Flows Group Meeting, Udine, Italy, 16-18/05, 2012.*
- Y. ZHOU, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Models for grains and gas ejection dynamics following the rupture of a nuclear fuel rod. *In 10th Annual European Rheology Conference 14-17/05, Nantes, France, 2015a.*
- Y. ZHOU, P. AUSSILLOUS et P. RUYER : Models for grains and gas ejection dynamics from a silo. *In 68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics Volume 60, Number 21, 22-24/11, Boston, Massachusetts, 2015b.*
- N. BAUDIN, C. COLIN, J. SÉBILLEAU et P. RUYER : Experiments and models for transient boiling. *In Proceedings of the ICMF 2016 International Conference on Multiphase Flow, Italy, 22 - 27/05 ICM (2016).*
- Y. ZHOU, P. AUSSILLOUS et P. RUYER : The effect of air pressure gradients on the discharge of granular materials from a silo. *In Proceedings of the ICMF 2016 International Conference on Multiphase Flow, Italy, 22 - 27/05 ICM (2016).*
- P. RUYER : Intense heat and mass transfers : the simulation of some accidental conditions. *In Workshop on Compressible Multiphase Flows : derivation, closure laws, thermodynamics, Strasbourg, 23-25 mai, 2018.*
- Z. ZOU, P. AUSSILLOUS, P. RUYER et P.-Y. LAGRÉE : Experiments, continuous and discrete simulations of the role of an inclined bottom on the lateral discharge flow of granular media from silos - paper # 2018850. *In 13th World Congress on Computational Mechanics / 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics 23 -27 juillet 2018, N.Y. USA, 2018a.*
- Z. ZOU, P. AUSSILLOUS, P. RUYER et P.-Y. LAGRÉE : Studies of the role of an inclined bottom and of gas flow on the discharge flow of granular media from silos. *In EFMC12 - 12th European Fluid Mechanics Conference 9-13 September 2018, Vienna, Austria, 2018b.*
- P. AUSSILLOUS, Z. ZOU, Y. ZHOU, S. LAIDAOU, P.-Y. LAGRÉE, P. RUYER et B. DALLOZ : Unsteady discharge rate of granular materials out of a pressurized tank. *In Workshop on Powders and Granular Materials Challenges and Future Trends, 6-7 June 2019, Montpellier (France), 2019a.* URL <https://pgm2019.sciencesconf.org/>.
- Z. ZOU, P. AUSSILLOUS, P. RUYER et P.-Y. LAGRÉE : Unsteady discharge rate of granular materials out of a pressurized tank. *In Workshop on Powders and Granular Materials Challenges and Future Trends, 6-7 June 2019, Montpellier (France), 2019.* URL <https://pgm2019.sciencesconf.org/>.
- P. AUSSILLOUS, Z. ZOU, Y. ZHOU, S. LAIDAOU, P.-Y. LAGRÉE, P. RUYER et B. DALLOZ : Discharge flow of a granular media from a silo : Confinement effect in a quasi 2D silo. *In Traffic and granular flow 2019, Pamplona (Spain), July 2nd-5th, 2019, 2019b.* URL <https://www.unav.edu/en/web/traffic-and-granular-flow>.

## Communications sans actes dans des congrès nationaux

- P. RUYER : Simulation numérique directe de l'ébullition en paroi par une méthode à interface diffuse. La mécanique des fluides numérique, séminaire CEA-GAMNI, 24-25 janvier, Institut Henri Poincaré Paris, 2005.
- P. RUYER et N. SEILER : Modélisation avancée de la polydispersion en taille des écoulements bouillants. *In Écoulements diphasiques bouillants Séminaire international SHF-AIRH : Two-phase convective boiling flow modelling, Grenoble, 8-9 septembre, 2008.*
- A. CHÂTELAIN, M. GUINGO, Ph. MONTARNAL, N. MECHITOUA et P. RUYER : Approche CFD diphasique pour la thermohydraulique locale des assemblages combustibles avec NEPTUNE\_CFD. *In Journée SFEN Réunion Technique "Thermohydraulique des assemblages combustibles des réacteurs à eau légère", 7 /11, 2013.*
- P. RUYER : Modélisation des transferts de chaleur paroi/écoulement à gouttes pour l'étude du refroidissement d'un cœur de réacteur nucléaire en condition accidentelle. *In Séminaire SHF Écoulements diphasiques dispersés, 4-5/04, Chatou, France, 2013.*
- Z. ZOU, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Discharge rate of gas and granular media out of a reservoir. *In Dispersed Two-Phase Flows 2018, 224th session of Scientific and Technical Committee of SHF 17-19 September, 2018, ENSEEIHT, Toulouse, 2018.*
- P. RUYER et T. GLANTZ : Travaux en lien avec le GDR. *In Journées du GDR n° 2042 Transinter - Transferts et Interfaces - 16-18/12, Aussois, France, 2019.* URL [http://gdr2042-transinter.univ-lorraine.fr/files/2020/01/191216\\_GDR\\_transinter\\_Ruyer.pdf](http://gdr2042-transinter.univ-lorraine.fr/files/2020/01/191216_GDR_transinter_Ruyer.pdf).

## Notes techniques

- P. RUYER : Contribution à la validation du logiciel de simulation de l'explosion de vapeur MC3D. Rapport technique DEN/DTP/SMTH/LDTA n° 2002.65, rapport de DEA, école doctorale MEGA-rapport de fin d'études École centrale de Lyon, décembre 2002, CEA, 2002.
- P. RUYER : Simulation numérique NEPTUNE\_CFD de l'expérience TOPFLOW avec obstacle eau-air : Bilan de l'étude. Rapport technique Note IRSN DPAM\SEMCA-2007-234, IRSN, 2007.
- P. RUYER : Modélisation de la polydispersion en taille : méthode des moments appliquée aux écoulements adiabatiques à bulles. Rapport technique SEMCA-2008-047, IRSN, 2008.
- N. SEILER et P. RUYER : Modèle de polydispersion étendu aux écoulements bouillants. Rapport technique Note IRSN DPAM\SEMCA-2008-048, IRSN, 2008a.
- P. RUYER et N. SEILER : Refroidissement des assemblages ballonnés lors de la phase de renoyage d'un APRP : État de l'art des connaissances et programme de R&D en thermohydraulique locale. Rapport technique DPAM-SEMCA-2008-234, IRSN, 2008.
- R. COGNET, N. SEILER et P. RUYER : Effet d'une grille de mélange sur la topologie d'un écoulement diphasique à bulles. Rapport technique RT-SEMCA-2008-303 Nept\_2008\_L1.2/3, IRSN, 2008.
- P. RUYER : Transfert thermique gaine-réfrigérant lors d'un R.I.A. connaissances actuelles et perspectives. Rapport technique DPAM-SEMCA-2009-454, IRSN, 2009.
- N. SEILER et P. RUYER : Programme de recherche en thermohydraulique locale. Plan de travail concernant les activités en thermohydraulique avancée à l'échelle de la CFD au SEMCA/LEIDC. Rapport technique DPAM/SEMCA 2008-058, IRSN, 2008b.
- B. BITON et P. RUYER : Simulation d'écoulements vapeur et gouttes en aval d'un front de trempe. Étude comparative des approches à différentes échelles (CFD et Système). Rapport technique DPAM-SEMCA-2010-313, IRSN, 2010.
- P. RUYER : Fuel coolant interaction : sketch of an evaluation method for energy release during CIP tests. Rapport technique DPAM-SEMCA-2011-326, RT CWL 2012-126, IRSN, 2011.

- P. RUYER : Interaction combustible réfrigérant suite à une rupture de gaine lors d'un accident d'insertion de réactivité. État de l'art des connaissances. Rapport technique PSN/SEMIA/2012-00394, IRSN, 2012.
- F. TAN et P. RUYER : Écoulement et éjection d'une collection granulaire polydisperse : une étude numérique. Rapport technique PSN-RES/SEMIA 2013-00041, IRSN, 2013.
- P. RUYER : Plan de développement du logiciel CIGALON. Rapport technique NT PSN-RES/SEMIA 2013-00221, IRSN, 2013.
- P. RUYER et V. GEORGENTHUM : Thermal-hydraulic during a RIA transient : State of the art review - Assessment of SCANAIR capabilities. Rapport technique PSN-RES SEMIA-2015-00496, IRSN, 2015.
- P. RUYER : Évaluation du logiciel CIGALON V5.1 sur une base de cas tests. Rapport technique NT PSN-RES/SEMIA 2016-00076, IRSN, 2016.
- P. RUYER : Simulation d'une interaction combustible-sodium à l'aide du logiciel CIGALON : état des lieux. Rapport technique PSN/SEMIA/LIMAR-2017-00080, IRSN, 2017.
- P. RUYER : Feuille de route pour la modélisation thermo-hydraulique lors d'un ria. Rapport technique PSN-RES/SEMIA/SEMIA-2019-0240, IRSN, 2019a.
- P. RUYER : Modélisations de l'interface entre un liquide et un mélange de sa vapeur et d'incondensables. Rapport technique PSN-RES/SEMIA/2019-0106, IRSN, 2019b.
- P. RUYER : Estimation enveloppe du pic de pression suite à une interaction combustible-réfrigérant dans le dispositif Cabri-LOCA. Rapport technique 2019-00677, IRSN, 2019c.
- F. ARREGHINI, V. GEORGENTHUM et P. RUYER : CIPQ first interpretation of the test results. Rapport technique n° IRSN/2020-00354, n° CWL 2020-166, n° BDD-ST SEMIA-2020-099, IRSN, 2020.
- O. MARCHAND, Ch. MANENC, S. MIROTTA, P. RUYER, F. ARREGHINI et V. GEORGENTHUM : CIP : Interprétation de l'essai CIP-Q et avancement du programme d'essais. Jalon J12 du COP IRSN 2019-2023. Rapport technique n° IRSN/2020-00861, IRSN, 2020.

## **Contribution à l'expertise technique de dossiers instruits par l'IRSN**

- P. RUYER : Transfert thermique gaine-réfrigérant pour l'étude thermohydraulique de l'accident BORAX dans le cœur RJH. Rapport technique DPAM-SEMCA-2011-084, IRSN, 2011.
- IRSN : *Conséquences d'un accident d'insertion de réactivité en présence de crayons défectueux - questionnaire d'instruction - PSN/RES/SEMIA/2012-00190*, 2012.
- IRSN : *Réacteur RJH BORAX - Synthèse pour l'avis et contribution du SEMIA - Note interne PSN-RES/SEMIA/2014-00264*, 2014a.
- IRSN : *Analyse de la modélisation du pic de pression dans le dossier EDF ENCNTC110254 rév. A ou B - courrier IRSN PSN-RES/SEMIA-2014-00248*, 2014b.
- IRSN : *Compte-rendu de la réunion du 05 septembre 2016 - GP "Critères de tenue du combustible" - réunion technique sur le livrable L12-a. PSN-RES/SEMIA/2016-00367*, 2016.
- IRSN : *REP-EDF - Conséquences des ruptures de crayons défectueux lors d'un accident d'insertion de réactivité (RIA) - Avis/IRSN n° 2014-00121*, 2014c.
- IRSN : *REP-EDF - Conséquences des ruptures de crayons défectueux lors d'un accident d'insertion de réactivité (RIA)- FT/AV/PSN/2014-00067 Fiche technique établie en support à l'avis IRSN/2014-00121 du 21 mars 2014*, 2014d.
- IRSN : *Nouvelle méthodologie CathSBI : Questionnaire n° 2 - Partie Combustible - Courrier n° PSN-RES/SEMIA/2014-00465*, 2014e.
- IRSN : Critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression. Réunion du Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires du 15 juin 2017. Rapport technique 2017-00008, IRSN, 2017a.



IRSN : Critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression. Rapport technique Avis 2017-00168, IRSN, 2017b. URL [www.irsn.fr/FR/expertise/avis/2017/Documents/mai/AvisIRSN201700168.pdf](http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/2017/Documents/mai/AvisIRSN201700168.pdf).

GRUPE PERMANENT D'EXPERTS POUR LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES : Avis et recommandations relatif aux critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression. Réunion tenue à Montrouge le 15 juin 2017. Rapport technique, ASN, 2017. URL [www.asn.fr/content/download/165220/1682169/version/2/file/avis%20et%20recommandations%20GPR%2015062017.pdf](http://www.asn.fr/content/download/165220/1682169/version/2/file/avis%20et%20recommandations%20GPR%2015062017.pdf).

IRSN : Contribution du SEMIA au rapport GP Mise en service de l'EPR FA3. - Suites du GP Piscine BK EPR Note interne - PSN-RES/SEMIA/2018-00117, 2018.

IRSN : Contribution - CEA/Saclay - INB n° 101 : ORPHEE - Suites du réexamen de sûreté de 2010 - Réponses à l'engagement E75 du CEA - Modétisation de l'accident BORAX avec le code CATHARE 2 - Note interne SEMIA/2019-00033, 2019a.

IRSN : CEA/Saclay - Réacteur ORPHÉE- INB n° 101 - Suites du réexamen de sûreté de 2009 - Modélisation de l'accident BORAX - Fiche technique établie en support à l'avis IRSN/2019-00135 du 19 juin 2019 - FT/AV/PSN/2019-00079, 2019b.

IRSN : EPR FA3 - Avis "Mise en service". - Contribution du SEMIA - Note interne PSN-RES/SEMIA/2019-00199, 2019c.

PÔLE SÛRETÉ NUCLÉAIRE : Projet EPR de Flamanville, Analyse des éléments transmis par EDF à la suite de la réunion du GPR « Examen du rapport de sûreté EPR de Flamanville » des 4 et 5 juillet 2018; Rapport établi en support à l'avis IRSN/2020-00037 du 13 mars 2020. Rapport technique d'expertise n° IRSN/2020-00249, IRSN, 2020.

## Contribution à des ouvrages collectifs

G. REPETTO, N. SEILER, V. GUILLARD et P. RUYER : *Rapport scientifique et technique 2007, Les accidents dans les installations nucléaires*, chapitre R&D en thermohydraulique à l'échelle locale en soutien à l'étude de l'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). IRSN, 2007. URL [https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/aktis-lettre-dossiers-thematiques/RST/RST-2007/Documents/RST2007\\_Chap2\\_2-8\\_R-D-thermohydraulique.pdf](https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/aktis-lettre-dossiers-thematiques/RST/RST-2007/Documents/RST2007_Chap2_2-8_R-D-thermohydraulique.pdf).

NEA : Reactivity Initiated Accident (RIA) Fuel Codes Benchmark Phase II Volume 1 : Simplified Cases Results, Summary and Analysis. Rapport technique NEA/CSNI/R(2016)6/VOL1, Nuclear Energy Agency, 2016. URL <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2016/csni-r2016-6-vol1.pdf>.

NEA : *Nuclear fuel behaviour under Reactivity-initiated Accident (RIA) conditions, State-of-the-art Report-updated*. Numéro NEA/CSNI/R(2020)X - to be published. NEA, 2020.

## Livrables de projets européens

N. SEILER et P. RUYER : Evaluation of contribution from the radiative heat in dispersed flow configuration during the reflooding phase of LOCA. NURISP NUClear Reactor Integrated Simulation Project Collaborative Project (Large - scale Integrating Project) Seventh Framework Programme EURATOM D2.4.3.21a, European Commission, 2010.

N. SEILER, P. RUYER et J. GÉRARDIN : Final report on CFD modelling of phenomena governing vapor droplets flow in ballooned core regions during the LOCA. NURISP NUClear Reactor Integrated Simulation Project Collaborative Project (Large - scale Integrating Project) Seventh Framework Programme EURATOM D2.4.3.21b, European Commission, 2011.

P. RUYER : Final report on the comparison of general trends on the coolability of the ballooned regions obtained at the CFD scale with the DRACCAR/CESAR results. NURESAFE NUClear REactor SAFETY Simulation Platform Collaborative Project (Large - scale Integrating Project) Seventh Framework Programme EURATOM D31.22.20, IRSN PSN-RES/SEMIA/2016-00010, European Commission, 2015.



## Références

- Proceedings of NURETH-14, The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Toronto, Canada 25-29.09 2011, 2011.*
- Proceedings of NURETH-15, The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Pisa, Italy, 12-17/05, 2013.*
- ICMF 2016 International Conference on Multiphase Flow, Italy, 22 - 27/05, 2016.*
- 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 12-15/06, Iguazu Falls, Brazil, 2017.*
- Proceedings of NURETH-17, 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Xian, China, September 3–8, 2017, 2017.*
- A. ABBATE : *Étude expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide*. Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2018.
- A. ABBATE, R. RULLIERE, Ph. HABERSCHILL et P. RUYER : Experimental study of a solid/liquid thermal interaction. In *Proceedings of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 12-15/06, Iguazu Falls, Brazil ExH (2017)*.
- A. ABBATE, R. RULLIERE, Ph. HABERSCHILL et P. RUYER : Experimental study of RIA related fuel-coolant interaction. In *NURETH-17, 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Xian, China, September 3–8, 2017 Nur (2017)*.
- L. AMARSID : *Rhéologie des écoulements granulaires immergés dans un fluide visqueux*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2015. url : <http://www.theses.fr/2015MONT182>.
- F. ARREGHINI, V. GEORGENTHUM et P. RUYER : CIPQ first interpretation of the test results. Rapport technique n° IRSN/2020-00354, n° CWL 2020-166, n° BDD-ST SEMIA-2020-099, IRSN, 2020.
- ASN-IRSN : *Qualification des outils de calcul scientifique utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire – 1re barrière. Guide de l'ASN - INB - n° 28, 2017*. url : <https://www.asn.fr/content/download/118129/1028436/version/2/file/Guide%2028%20QOCS.pdf>.
- P. AUSSILLOUS, Y. ZHOU, P. RUYER et P.-Y. LAGRÉE : Discharge flow of granular media from silos with a lateral orifice and injection of air. In *Powders and Grains 2017 - 8th International Conference on Micromechanics on Granular Media*, volume 140, page 03052, 2017. url : [10.1051/epjconf/201714003052](https://doi.org/10.1051/epjconf/201714003052). doi: [10.1051/epjconf/201714003052](https://doi.org/10.1051/epjconf/201714003052).
- P. AUSSILLOUS, Z. ZOU, Y. ZHOU, S. LAIDAOU, P.-Y. LAGRÉE, P. RUYER et B. DALLOZ : Discharge flow of a granular media from a silo : Confinement effect in a quasi 2D silo. In *Traffic and granular flow 2019, Pamplona (Spain), July 2nd-5th, 2019, 2019a*. url : <https://www.unav.edu/en/web/traffic-and-granular-flow>.
- P. AUSSILLOUS, Z. ZOU, Y. ZHOU, S. LAIDAOU, P.-Y. LAGRÉE, P. RUYER et B. DALLOZ : Unsteady discharge rate of granular materials out of a pressurized tank. In *Workshop on Powders and Granular Materials Challenges and Future Trends, 6-7 June 2019, Montpellier (France), 2019b*. url : <https://pgm2019.sciencesconf.org/>.
- T.R. AUTON : The lift force on a spherical body in a rotational flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 183:199–218, 1987.
- D. BAALBAKI : *Simulation and modeling of turbulent non isothermal vapor-droplet dispersed flow*. Thèse de doctorat, Université de Perpignan Via Domitia - UPVD, 2011.
- D. BAALBAKI, A. TOUTANT, P. RUYER et F. BATAILLE : CFD model for lift force in a wall-bounded flow. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 5:251–264, décembre 2013.
- N. BAUDIN : *Étude expérimentale et modélisation de l'ébullition transitoire*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2015.

- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : étude expérimentale de la convection transitoire et établie dans une conduite semi-annulaire chauffée. *In 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France, 26-30/08, 2013.*
- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : Heat transfer characterization during transient boiling, paper ihtc158637. *In Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC15, Kyoto, Japan, 10-15/08, 2014.*
- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : Experimental study of transient nucleate boiling. *In 9th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, 26-30/04, Boulder, Colorado, 2015a.*
- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : Transient convective boiling : analysis of experimental results. *In NURETH-16 International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Hyatt Regency Chicago, 30.08-04.09, 2015b.*
- N. BAUDIN, C. COLIN, P. RUYER et J. SEBILLEAU : Turbulent flow and transient convection in a semi-annular duct. *International Journal of Thermal Sciences*, 108(Supplement C):40 – 51, 2016a. ISSN 1290-0729. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072916304641>. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.017.
- N. BAUDIN, C. COLIN, J. SÉBILLEAU et P. RUYER : Experiments and models for transient boiling. *In Proceedings of the ICMF 2016 International Conference on Multiphase Flow, Italy, 22 - 27/05 ICM (2016).*
- D. BEDEAUX et S. KJELSTRUP : Irreversible thermodynamics - a tool to describe phase transitions far from global equilibrium. *Chemical Engineering Science*, 59:109–118, 2004.
- S. BENZONI-GAVAGE, L. CHUPIN, D. JAMET et J. VOVELLE : On a phase field model for solid-liquid phase transitions. *Discrete & Continuous Dynamical Systems - A*, 32(1078-0947\_2012\_6\_1997):1997, 2012. ISSN 1078-0947. url : <http://aimsciences.org//article/id/26be25b9-d7bd-4fbb-8ce3-ca775410611d>. doi: 10.3934/dcds.2012.32.1997.
- D. BESTION : The physical closure laws in the {CATHARE} code. *Nuclear Engineering and Design*, 124 (3):229 – 245, 1990. ISSN 0029-5493. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029-549390902948>. doi: 10.1016/0029-5493(90)90294-8.
- D. BESTION, H. ANGLART, D. CARAGHIAUR, P. PÉTURAUD, B. SMITH, M. ANDREANI, B. NICENO, E. KREPPER, D. LUCAS, F. MORETTI, M. C. GALASSI, J. MACEK, L. VYSKOCIL, B. KONCAR et G. HAZI : Review of Available Data for Validation of Nuresim Two-Phase CFD Software Applied to CHF Investigations. *Science and Technology of Nuclear Installations*, page 214512, 2009. doi: 10.1155/2009/214512.
- W. A. BEVERLOO, H. A. LENIGER et J. Van de VELDE : The flow of granular solids through orifices. *Chem. Eng. Sci.*, 15:260–269, 1961.
- B. BIARD, V. CHEVALIER, C. GAILLARD, V. GEORGENTHUM, Q. GRANDO, J. GUILLOT, L. LEBRETON, Ch. MANENC, S. MIROTTA et N. MONCHALIN : Reactivity Initiated Accident transient testing on irradiated fuel rods in PWR conditions : The CABRI International Program. *Annals of Nuclear Energy*, 141:107253, 2020. ISSN 0306-4549. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107253>.
- B. BITON et P. RUYER : Simulation d'écoulements vapeur et gouttes en aval d'un front de trempe. Étude comparative des approches à différentes échelles (CFD et Système). Rapport technique DPAM-SEMCA-2010-313, IRSN, 2010.
- S. BOUTIN et S. GRAFF : A new LOCA safety demonstration in France. *In Conference Top Fuel 2015, Zürich, Switzerland, septembre 2015.*
- F. CAUPIN et É HERBERT : Cavitation in water : a review. *Comptes Rendus Physique*, 7(9):1000 – 1017, 2006. ISSN 1631-0705. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070506002283>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2006.10.015>.
- L. CHAILAN, L. BOSLAND, L. CARÉNINI, J. CHAMBAREL, F. COUSIN, P. CHATELARD, P. DRAI, G. KIOSEYIAN, S. PHOUDIAH et V. TOPIN : Overview of ASTEC integral code status and perspectives. *In The 9TH European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR2019) Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic, March 18-20, 2019, page 096, 2019.* url : <https://ftp.ermsar2019.com/ERMSAR%202019%20-%20Final%20Papers/96.%20Chailan%20L.pdf>.

- H. CHANG : The myth of the boiling point. *Science Progress (1933- )*, 91(3):219–240, 2008. ISSN 00368504, 20477163. url : <http://www.jstor.org/stable/43423228>.
- A. CHÂTELAIN, M. GUINGO, Ph. MONTARNAL, N. MECHITOUA et P. RUYER : Approche CFD diphasique pour la thermohydraulique locale des assemblages combustibles avec NEPTUNE\_CFD. In *Journée SFEN Réunion Technique "Thermohydraulique des assemblages combustibles des réacteurs à eau légère"*, 7 /11, 2013.
- D.H. CHO, R.O. IVINS et R.W. WRIGHT : Rate-limited model of molten fuel/coolant interactions : model development and preliminary calculations. Rapport technique ANL-7919, Argonne National Lab., 1972.
- R. COGNET, N. SEILER et P. RUYER : Effet d'une grille de mélange sur la topologie d'un écoulement diphasique à bulles. Rapport technique RT-SEMCA-2008-303 Nept\_2008\_L1.2/3, IRSN, 2008.
- CS contrat CA 22002331 : Évolution de la version 5.2 CIGALON Travaux 2017 lot 2. Rapport technique NT PSN-RES/SEMIA 2018-00131, IRSN, 2018.
- G. CUBIZOLLES : *Étude stéréologique de la topologie des écoulements diphasiques à haute pression*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 1996.
- S.R. de GROOT et P. MAZUR : *Non-equilibrium thermodynamics*. Dover, 1984.
- J.A.H. DE JONG : Vertical air-controlled particle flow from a bunker through circular orifices. *Powder Technol.*, 3(1):279 – 286, 1969. ISSN 0032-5910. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032591069800951>. doi: 10.1016/0032-5910(69)80095-1.
- E. DEUTSCH : *Dispersion de particules dans une turbulence homogène isotrope stationnaire calculée par simulation numérique directe des grandes échelles*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 1992. url : <http://www.theses.fr/1992ECDL0020>.
- A. du CLUZEAU, G. BOIS et A. TOUTANT : Modelling of the laminar dispersion force in bubbly flows from direct numerical simulations. *Physics of Fluids*, 32(1):012106, 2020. doi: 10.1063/1.5132607.
- M. L. DUFOUR : Sur l'ébullition des liquides. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, tome 52 - janvier-juin 1861:986 – 989, 1861a.
- M. L. DUFOUR : Sur l'ébullition des liquides. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, tome 53 - juin-décembre 1861:846 – 849, 1861b.
- S. ERGUN : Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48(2):89–94, 1952.
- S.A. FAIRBAIRN et B.D.G. PIGGOTT : Flow and heat transfer in PWR rod bundles in the presence of blockage due to clad ballooning – Experimental report part 2. Rapport technique TPRD/B/0511/N84, Central Electricity Generating Board, 1984.
- A. FOISSAC, J. MALET, S. MIMOUNI, P. RUYER, F. FEUILLEBOIS et O. SIMONIN : Eulerian simulation of interacting PWR sprays : Influence of droplet collisions, paper n° 111. In *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14) Toronto, Canada 25-29.09 2011* Nur (2011).
- A. FOISSAC, J. MALET, S. MIMOUNI, P. RUYER, F. FEUILLEBOIS et O. SIMONIN : Eulerian simulation of interacting PWR sprays including droplet collisions. *Nuclear Technology*, 181(1):133–143, 2013.
- V. GEORGENTHUM, A. MOAL et O. MARCHAND : SCANAIR a transient fuel performance code Part two : Assessment of modelling capabilities. *Nuclear Engineering and Design*, 280:172 – 180, 2014. ISSN 0029-5493. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.04.030>.
- J. GÉRARDIN : *Évaluation du transfert radiatif dans le cœur d'un Réacteur à Eau Pressurisée (REP) lors de la phase de renoyage d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP)*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- J. GÉRARDIN, P. BOULET et P. RUYER : Taking into account accurately the radiative heat transfer for the simulation of core reflooding. *Nuclear Science and Engineering*, 178:103–118, 2014.

- J. GÉRARDIN, P. BOULET, P. RUYER et N. SEILER : Évaluation du transfert radiatif dans un cœur de réacteur à eau pressurisée (REP) lors de la phase de renoyage d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). In *Congrès français de thermique SFT 2013, Gérardmer, France, 28-31/05, 2013a*. url : [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres\\_2013/articles/6136.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2013/articles/6136.pdf).
- J. GÉRARDIN, A. HASSINI, P. BOULET, N. SEILER, P. RUYER et G. REPETTO : évaluation des échanges radiatifs dans un assemblage d'un réacteur nucléaire lors de la phase de renoyage d'un aprp. In *Congrès français de thermique SFT 2010, Le Touquet, France, 25-28/05, numéro 41, 2010*. url : [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres\\_2010/communications/41.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2010/communications/41.pdf).
- J. GÉRARDIN, N. SEILER, P. RUYER et P. BOULET : Radiative transfer during the reflooding step of a LOCA. In *EUROTHERM SEMINAR n° . 95 Computational Thermal Radiation in Participating Media IV, 18-20/04, Nancy, France, 2012a*.
- J. GÉRARDIN, N. SEILER, P. RUYER et P. BOULET : Radiative transfer during the reflooding step of a LOCA. *J. Quant. Spec. Rad. Transfer*, (128):43–51, 2013b.
- J. GÉRARDIN, N. SEILER, P. RUYER, L. TROVALET et P. BOULET : P1 approximation, MDA and IDA for the simulation of radiative transfer in a 3D geometry for an absorbing scattering medium. *J. Quant. Spec. Rad. Transfer*, 113:140–149, 2012b.
- J.W. GIBBS et H.L. CHATELIER : *Équilibre des systèmes chimiques*. Bibliothèque de la Revue générale des sciences. G. Carré & C. Naud, 1899.
- M. GRADECK, F. LELONG, N. SEILER, P. RUYER et D. MAILLET : Modélisation du flux de chaleur à l'impact d'une goutte en situation de Leidenfrost. In *Congrès français de thermique SFT, Perpignan, 24-27/05, numéro 267, 2011*. url : [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres\\_2011/Communications/267.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2011/Communications/267.pdf).
- M. GRADECK, N. SEILER, P. RUYER et D. MAILLET : Heat transfer for Leidenfrost drops bouncing onto a hot surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 47:14–25, 2013.
- C. GRANDJEAN : Coolability of blocked regions in a rod bundle after ballooning under LOCA conditions Main findings from a review of past experimental programmes. *Nuclear Eng. Design*, 237:1872–1886, 2007.
- D.C. GROENEVELD, L.K.H. LEUNG, A.Z. VASIĆ, Y.J. GUO et S.C. CHENG : A look-up table for fully developed film-boiling heat transfer. *Nuclear Engineering and Design*, 225(1):83 – 97, 2003. ISSN 0029-5493. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549303001493>. doi: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(03\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(03)00149-3).
- GRUPE PERMANENT D'EXPERTS POUR LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES : Avis et recommandations relatif aux critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression. Réunion tenue à Montrouge le 15 juin 2017. Rapport technique, ASN, 2017. url : [www.asn.fr/content/download/165220/1682169/version/2/file/avis%20et%20recommandations%20GPR%2015062017.pdf](http://www.asn.fr/content/download/165220/1682169/version/2/file/avis%20et%20recommandations%20GPR%2015062017.pdf).
- A. GUEIFI, D. BESTION, M. BOUCKER, P. BOUDIER, Ph. FILLION, M. GRANDOTTO, J.-M. HÉRARD, É. HERVIEU et P. PÉTURAUD : NEPTUNE : A new software platform for advanced nuclear thermal hydraulics. *Nucl. Sci. Eng.*, 156:281–324, 2007.
- A. GUEIFI, M. BOUCKER, J.M. HÉRARD, P. PÉTURAUD, D. BESTION, P. BOUDIER, P. FILLION, M. GRANDOTTO et E. HERVIEU : A new multi-scale platform for advanced nuclear thermal-hydraulics status and prospects of the NEPTUNE project. In *11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11) October 2-6, France, 2005*.
- Z. GUO et P. LIN : A thermodynamically consistent phase-field model for two-phase flows with thermocapillary effects. *Journal of Fluid Mechanics*, 766:226–271, 2015. doi: [10.1017/jfm.2014.696](https://doi.org/10.1017/jfm.2014.696).
- L. HAAR, J. S. GALLAGHER et G. S. KELL : *NBS/NRC Steam Tables*. Hemisphere, Washington, and McGraw-Hill, New-York, 1984.



- G.H.L. HAGEN : Über den Druck und die Bewegung des trocknen Sandes. *Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, pages 35–42, 1852.
- L.E. HERRANZ, D. JACQUEMAIN, T. NITHEANANDAN, N. SANDBERG, F. BARRÉ, S. BECHTA, K.-Y. CHOI, F. D'AURIA, R. LEE et H. NAKAMURA : The working group on the analysis and management of accidents (WGAMA) : A historical review of major contributions. *Progress in Nuclear Energy*, 127: 103432, 2020. ISSN 0149-1970. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103432>.
- Y.Y. HSU : On the size range of active nucleation cavities on a heating surface. *Journal of heat transfer Transactions of the ASME*, pages 207–216, 1962.
- A.R. IMRE, U.K. DEITERS, T. KRASKA et I. TISELJ : The pseudocritical regions for supercritical water. *Nucl. Eng. Des.*, 252:179–183, 2012.
- IRSN : *Conséquences d'un accident d'insertion de réactivité en présence de crayons défectueux - questionnaire d'instruction - PSN/RES/SEMIA/2012-00190*, 2012.
- IRSN : *Analyse de la modélisation du pic de pression dans le dossier EDF ENCNTC110254 rév. A ou B - courrier IRSN PSN-RES/SEMIA-2014-00248*, 2014a.
- IRSN : *Nouvelle méthodologie CathSBI : Questionnaire n° 2 - Partie Combustible - Courrier n° PSN-RES/SEMIA/2014-00465*, 2014b.
- IRSN : *Réacteur RJH BORAX - Synthèse pour l'avis et contribution du SEMIA - Note interne PSN-RES/SEMIA/2014-00264*, 2014c.
- IRSN : *REP-EDF - Conséquences des ruptures de crayons défectueux lors d'un accident d'insertion de réactivité (RIA) - Avis/IRSN n° 2014-00121*, 2014d.
- IRSN : *REP-EDF - Conséquences des ruptures de crayons défectueux lors d'un accident d'insertion de réactivité (RIA)- FT/AV/PSN/2014-00067 Fiche technique établie en support à l'avis IRSN/2014-00121 du 21 mars 2014*, 2014e.
- IRSN : L'installation Pearl, 2015. url : <https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/outils-scientifiques/installations-moyens-experimentaux/installation-Pearl/Pages/installation-Pearl.aspx>.
- IRSN : *Compte-rendu de la réunion du 05 septembre 2016 - GP "Critères de tenue du combustible" - réunion technique sur le livrable L12-a. PSN-RES/SEMIA/2016-00367*, 2016.
- IRSN : Critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression. Rapport technique Avis 2017-00168, IRSN, 2017a. url : [www.irsn.fr/FR/expertise/avis/2017/Documents/mai/AvisIRSN201700168.pdf](http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/2017/Documents/mai/AvisIRSN201700168.pdf).
- IRSN : Critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression. Réunion du Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires du 15 juin 2017. Rapport technique 2017-00008, IRSN, 2017b.
- IRSN : *Contribution du SEMIA au rapport GP Mise en service de l'EPR FA3. - Suites du GP Piscine BK EPR Note interne - PSN-RES/SEMIA/2018-00117*, 2018.
- IRSN : *CEA/Saclay - Réacteur ORPHÉE- INB n° 101 - Suites du réexamen de sûreté de 2009 - Modélisation de l'accident BORAX - Fiche technique établie en support à l'avis IRSN/2019-00135 du 19 juin 2019 - FT/AV/PSN/2019-00079*, 2019a.
- IRSN : *Contribution - CEA/Sactay - INB n° 101 : ORPHEE - Suites du réexamen de sûreté de 2010 - Réponses à l'engagement E75 du CEA - Modétisation de l'accident BORAX avec le code CATHARE 2 - Note interne SEMIA/2019-00033*, 2019b.
- IRSN : *EPR FA3 - Avis "Mise en service". - Contribution du SEMIA - Note interne PSN-RES/SEMIA/2019-00199*, 2019c.
- M. ISHII et N. ZUBER : Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows. *AIChE J.*, 25(5):843–855, 1979.

- D. JAMET, C. FOUILLET, P. RUYER et J. KLINGER : Méthodes à interfaces diffuses pour la modélisation des écoulements polyphasiques. In *177ème Session du comité scientifique et technique de la Société Hydrotechnique de France, Progrès récents des méthodologies de modélisation des écoulements diphasiques*, Lyon, France, 24-26 novembre, 2004.
- D. JAMET et P. RUYER : A quasi-compressible model dedicated to the direct numerical simulation of liquid-vapor flows with phase-change. In *5th international conference on multiphase flow*, Yokohama, Japan, numéro 169, June 2004.
- D. JAMET, D. TORRES et J.U. BRACKBILL : On the theory and computation of surface tension : the elimination of parasitic currents through energy conservation in the second-gradient method. *J. Comp. Physics*, 182:262–276, 2002.
- A. JANDA, I. ZURIGUEL et D. MAZA : Flow rate of particles through apertures obtained from self-similar density and velocity profiles. *Phys. Rev. Lett.*, 108:248001, 2012. url : [10.1103/PhysRevLett.108.248001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.248001). doi: [10.1103/PhysRevLett.108.248001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.248001).
- P. JOP, Y. FORTERRE et O. POULIQUEN : Crucial role of sidewalls in granular surface flows : consequences for the rheology. *J. Fluid Mech.*, 541:167–192, 2005.
- P. JOP, Y. FORTERRE et O. POULIQUEN : A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, 441:727–730, 2006. doi: [10.1038/nature04801](https://doi.org/10.1038/nature04801).
- S. KARTHIKA, T. K. RADHAKRISHNAN et P. KALAICHELVI : A review of classical and nonclassical nucleation theories. *Crystal Growth & Design*, 16(11):6663–6681, 2016. doi: [10.1021/acs.cgd.6b00794](https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6b00794).
- E. KREPPER, Ch. MOREL, B. NICENO et P. RUYER : CFD modeling of adiabatic bubbly flow. *Multiphase Science and Technology*, 23(2-4):129–164, 2011. ISSN 0276-1459.
- E. KREPPER, P. RUYER, M. BEYER, D. LUCAS, H.-M. PRASSER et N. SEILER : CFD simulation of poly-dispersed bubbly two phase flow around an obstacle. *Science and Technology of Nuclear Installations*, (320738):12, 2008. doi: [10.1155/2009/320738](https://doi.org/10.1155/2009/320738).
- J. D. KULICK, J. R. FESSLER et J. K. EATON : Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 277:109–134, 1994. doi: [10.1017/S0022112094002703](https://doi.org/10.1017/S0022112094002703).
- P.-Y. LAGRÉE, L. STARON et S. POPINET : The granular column collapse as a continuum : validity of a two-dimensional navier–stokes model with a  $\mu(I)$ -rheology. *J. Fluid Mech.*, 686:378–408, 2011.
- D. LEGENDRE, J. BORÉE et J. MAGNAUDET : Thermal and dynamic evolution of a spherical bubble moving steadily in a superheated or subcooled liquid. *Physics of Fluids*, 10(6):1256–1272, 1998. doi: [10.1063/1.869654](https://doi.org/10.1063/1.869654).
- F. LELONG : *Expérimentation, modélisation et simulation de l'impact de gouttes d'eau sur le gainage gonflé des assemblages d'un coeur de REP en situation d'ARP*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. url : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748645>.
- F. LELONG, M. GRADECK, N. SEILER, P. RUYER, G. CASTANET et P. DUNAND : Dynamic behaviour of liquid droplets bouncing onto a hot slab. In *International Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS EUROPE)*, Bmo, Czech Republic, 06.09 - 08.09, 2010.
- H. LEMONNIER, D. JAMET et O. LEBAIGUE : *Validation of advanced computational methods for multiphase flow*. Begell House, 2005.
- LMGC90. LMG90 webpage. url : [https://git-xen.lmgc.univ-montp2.fr/lmgc90/lmgc90\\_user/-/wikis/home](https://git-xen.lmgc.univ-montp2.fr/lmgc90/lmgc90_user/-/wikis/home).
- O. MARCHAND, Ch. MANENC, S. MIROTTA, P. RUYER, F. ARREGHINI et V. GEORGENTHUM : CIP : Interprétation de l'essai CIP-Q et avancement du programme d'essais. Jalon J12 du COP IRSN 2019-2023. Rapport technique n° IRSN/2020-00861, IRSN, 2020.
- A. MARTIN : *Écoulement confiné d'un matériau granulaire en interaction avec un gaz : application à la relocalisation du combustible nucléaire*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2010. url : <http://www.theses.fr/2010MON20005>.



- J. MARTIN : Specification of a new modeling of the heat and mass transfers at the large interface between a liquid and a steam/non-condensable gas mixture within Neptune\_CFD code. Rapport Technique SEMIA 2018-00270, IRSN, 2018.
- J. MARTIN, G. BRILLANT, N. DURIEZ, N. TRÉGOURÈS et Ch. MARQUIÉ : The IRSN DENOPI Project : A Research Program on Spent-Fuel-Pool Loss-Of-Cooling and Loss-Of-Coolant Accidents. In *NURETH-17, 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Xian, China, September 3–8, 2017*, page 2282, 2017a.
- J. MARTIN, T. KAMIN et P. RUYER : Analysis of the Fukushima-Daiichi unit-4 spent fuel pool loss-of-cooling accident by means of the TETHYS code : Highlight of major thermal-hydraulic modeling issues. In *NURETH-17, 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Xian, China, September 3–8, 2017* Nur (2017).
- G. D. R. MIDI : On dense granular flows. *Eur. Phys. J. E*, 14:341–365, 2004.
- S. MIMOUNI, W. BENGUIGUI, S FLEAU, A. FOISSAC, M. GUINGO, M. HASSANALY, J. LAVIEVILLE, J. MALET, N. MÉCHITOUA, N. MÉRIGOUX et S. VINCENT : Dispersed Two-Phase Flow Modelling for Nuclear Safety in the NEPTUNE\_CFD Code. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2017, 2017a. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/3238545>.
- S. MIMOUNI, M. GUINGO, Lavieville J. et N. MÉRIGOUX : Combined evaluation of bubble dynamics, polydispersion model and turbulence modeling for adiabatic two-phase flow. *Nuclear Engineering and Design*, 321:57 – 68, 2017b. ISSN 0029-5493. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549317301619>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.03.041>. Multi-scale multi-physics analysis of reactor transients in the NURES SAFE project.
- S. MIMOUNI, J. LAVIÉVILLE, N. SEILER et P. RUYER : Combined evaluation of second order turbulence model and polydispersion model for two-phase boiling flow and application to fuel assembly analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 241(11):4523–4536, 2011.
- S. MIMOUNI, P. RUYER, N. SEILER et J. M. LAVIÉVILLE : Combined evaluation of second order turbulence model and polydispersion model for two-phase boiling flow and applications to fuel assembly analysis. In *NURETH13, 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Kanazawa, Japan, 27.09 - 02.10, 2009*.
- MIST. MIST webpage. url : <https://hal-irsn.archives-ouvertes.fr/MIST>.
- A. MOAL, V. GEORGENTHUM et O. MARCHAND : SCANAIR : A transient fuel performance code : Part One : General modelling description. *Nuclear Engineering and Design*, 280:150 – 171, 2014. ISSN 0029-5493. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.055>.
- M. F. MODEST : *Radiative heat transfer 2nd edition*. Academic Press, 2003.
- Ch. MOREL, P. RUYER, N. SEILER-MARIE et J. M. LAVIÉVILLE : Comparison of several models for multi-size bubbly flows on an adiabatic experiment. *International Journal of Multiphase Flow*, 36(1):25–39, 2010.
- Ch. MOREL, W. YAO et D. BESTION : Three dimensional modeling of boiling flow for the NEPTUNE code. In *The 10<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003*.
- J. MULLER, R. RULLIÈRE, P. RUYER et M. CLAUSSE : Experimental Study of Solid/Liquid Thermal Shock in Carbon Dioxide. In *Proceedings of the 5th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'20), Virtual Conference – October, 2020, 2020*. url : [https://avestia.com/MHMT2020\\_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT\\_114.pdf](https://avestia.com/MHMT2020_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT_114.pdf). doi: 10.11159/icmfht20.114.
- NEA : Reactivity Initiated Accident (RIA) Fuel Codes Benchmark Phase II Volume 1 : Simplified Cases Results, Summary and Analysis. Rapport technique NEA/CSNI/R(2016)6/VOL1, Nuclear Energy Agency, 2016. url : <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2016/csni-r2016-6-vol1.pdf>.
- NEA : *Nuclear fuel behaviour under Reactivity-initiated Accident (RIA) conditions, State-of-the-art Report-updated*. Numéro NEA/CSNI/R(2020)X - to be published. NEA, 2020.

- D. A. NIELD et A. BEJAN : *Convection in Porous Media*. Springer, 2006.
- V. S. NIKOLAYEV, D. A. BEYSENS, G.-L. LAGIER et J. HEGSETH : Growth of a dry spot under a vapor bubble at high heat flux and high pressure. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 44:3499–3511, 2001.
- S. NISHIO et H. TANAKA : Visualization of boiling structures in high heat-flux pool-boiling. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 47:4559–4568, 2004.
- S. NUKIYAMA : The maximum and minimum values of the heat  $Q$  transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure (english translation of the original paper published in Journal Japan Soc. Mech. Engrs vol. 37, 367-374 (1934)). *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 9:1419–1433, 1966.
- A.V.S. OLIVEIRA, J.D. PEÑA CARRILLO, A. LABERGUE, T. GLANTZ et M. GRADECK : Experimental study of dispersed flow film boiling at sub-channel scale in loca conditions : Influence of the steam flow rate and residual power. *Applied Thermal Engineering*, 172:115143, 2020a. ISSN 1359-4311. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119374502>. doi : <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115143>.
- A.V.S. OLIVEIRA, J.D. PEÑA CARRILLO, A. LABERGUE, T. GLANTZ et M. GRADECK : Mechanistic modeling of the thermal-hydraulics in polydispersed flow film boiling in loca conditions. *Nuclear Engineering and Design*, 357:110388, 2020b. ISSN 0029-5493. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549319304194>. doi : <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110388>.
- A.V.S. OLIVEIRA, D. STEMMELLEN, S. LECLERC, T. GLANTZ, A. LABERGUE, G. REPETTO et M. GRADECK : Velocity field and flow redistribution in a ballooned 7x7 fuel bundle measured by magnetic resonance velocimetry. *Nuclear Engineering and Design*, 369:110828, 2020c. ISSN 0029-5493. doi : <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110828>.
- L. S. PAN, J. LOU, H. Y. LI et C. W. KANG : A diffuse interface model for two-phase flows with phase transition. *Physics of Fluids*, 31(9):092112, 2019. doi : [10.1063/1.5113922](https://doi.org/10.1063/1.5113922).
- B. A. PHILLIPS : *Experimental Investigation of Subcooled Flow Boiling Using Synchronized High Speed Video, Infrared Thermography, and Particle Image Velocimetry*. Thèse de doctorat, Nuclear Science and Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, 2014. url : <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/92060>.
- S. POPINET : Basilisk C reference manual, 2013-2016. url : <http://basilisk.fr/Tutorial>.
- S. POPINET : A quadtree-adaptive multigrid solver for the Serre–Green–Naghdi equations. *J. Comput. Phys.*, 302:336–358, 2015.
- M. J. PRINCE et H. W. BLANCH : Bubble coalescence and break-up in air-sparged bubble columns. *AIChE J.*, 36(10):1485–1499, 1990.
- PÔLE SÛRETÉ NUCLÉAIRE : *Projet EPR de Flamanville, Analyse des éléments transmis par EDF à la suite de la réunion du GPR « Examen du rapport de sûreté EPR de Flamanville » des 4 et 5 juillet 2018 ; Rapport établi en support à l’avis IRSN/2020-00037 du 13 mars 2020. Rapport technique d’expertise n° IRSN/2020-00249, IRSN, 2020.*
- G. REPETTO, C. DOMINGUEZ, B. DURVILLE, M.-C. BAIETTO, C. C. CAMPELLO et M. GRADECK : The R&D PERFROI project on Thermal mechanical and thermal hydraulics behaviors of a fuel rod assembly during a Loss Of Coolant Accident. In Inc. AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, éditeur : *International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16)*, Chicago, United States, août 2015a.
- G. REPETTO, Ch. MARQUIÉ, B. BRUYÈRE et T. GLANTZ : Core coolability in loss of coolant accident : The COAL experiments. In Inc. AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, éditeur : *International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16)*, Chicago, United States, août 2015b.
- G. REPETTO, N. SEILER, V. GUILLARD et P. RUYER : *Rapport scientifique et technique 2007, Les accidents dans les installations nucléaires*, chapitre R&D en thermohydraulique à l’échelle locale en soutien à l’étude de l’accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). IRSN, 2007. url : [https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/aktis-lettre-dossiers-thematiques/RST/RST-2007/Documents/RST2007\\_Chap2\\_2-8\\_R-D-thermohydraulique.pdf](https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/aktis-lettre-dossiers-thematiques/RST/RST-2007/Documents/RST2007_Chap2_2-8_R-D-thermohydraulique.pdf).

- P. RUYER : Contribution à la validation du logiciel de simulation de l'explosion de vapeur MC3D. Rapport technique DEN/DTP/SMTH/LDTA n° 2002.65, rapport de DEA, école doctorale MEGA-rapport de fin d'études École centrale de Lyon, décembre 2002, CEA, 2002.
- P. RUYER : Simulation numérique directe de l'ébullition en paroi par une méthode à interface diffuse. La mécanique des fluides numérique, séminaire CEA-GAMNI, 24-25 janvier, Institut Henri Poincaré Paris, 2005.
- P. RUYER : Simulation numérique NEPTUNE\_CFD de l'expérience TOPFLOW avec obstacle eau-air : Bilan de l'étude. Rapport technique Note IRSN DPAM\SEMCA-2007-234, IRSN, 2007.
- P. RUYER : Modélisation de la polydispersion en taille : méthode des moments appliquée aux écoulements adiabatiques à bulles. Rapport technique SEMCA-2008-047, IRSN, 2008.
- P. RUYER : Transfert thermique gaine-réfrigérant lors d'un R.I.A. connaissances actuelles et perspectives. Rapport technique DPAM-SEMCA-2009-454, IRSN, 2009.
- P. RUYER : Fuel coolant interaction : sketch of an evaluation method for energy release during CIP tests. Rapport technique DPAM-SEMCA-2011-326, RT CWL 2012-126, IRSN, 2011a.
- P. RUYER : Transfert thermique gaine-réfrigérant pour l'étude thermohydraulique de l'accident BORAX dans le cœur RJH. Rapport technique DPAM-SEMCA-2011-084, IRSN, 2011b.
- P. RUYER : Interaction combustible réfrigérant suite à une rupture de gaine lors d'un accident d'insertion de réactivité. État de l'art des connaissances. Rapport technique PSN/SEMIA/2012-00394, IRSN, 2012.
- P. RUYER : Modélisation des transferts de chaleur paroi/écoulement à gouttes pour l'étude du refroidissement d'un cœur de réacteur nucléaire en condition accidentelle. In *Séminaire SHF Écoulements diphasiques dispersés, 4-5/04, Chatou, France*, 2013a.
- P. RUYER : Plan de développement du logiciel CIGALON. Rapport technique NT PSN-RES/SEMIA 2013-00221, IRSN, 2013b.
- P. RUYER : Final report on the comparison of general trends on the coolability of the ballooned regions obtained at the CFD scale with the DRACCAR/CESAR results. NURESAFE Nuclear REactor SAFETY Simulation Platform Collaborative Project (Large - scale Integrating Project) Seventh Framework Programme EURATOM D31.22.20, IRSN PSN-RES/SEMIA/2016-00010, European Commission, 2015.
- P. RUYER : Clad to coolant heat transfer during RIA in PWR conditions. In *Top Fuel 2016, 11-16/09, Boise, Idaho, U.S.A.*, 2016a.
- P. RUYER : Évaluation du logiciel CIGALON V5.1 sur une base de cas tests. Rapport technique NT PSN-RES/SEMIA 2016-00076, IRSN, 2016b.
- P. RUYER : Simulation d'une interaction combustible-sodium à l'aide du logiciel CIGALON : état des lieux. Rapport technique PSN/SEMIA/LIMAR-2017-00080, IRSN, 2017.
- P. RUYER : Intense heat and mass transfers : the simulation of some accidental conditions. In *Workshop on Compressible Multiphase Flows : derivation, closure laws, thermodynamics, Strasbourg, 23-25 mai*, 2018.
- P. RUYER : Estimation enveloppe du pic de pression suite à une interaction combustible-réfrigérant dans le dispositif Cabri-LOCA. Rapport technique 2019-00677, IRSN, 2019a.
- P. RUYER : Feuille de route pour la modélisation thermo-hydraulique lors d'un ria. Rapport technique PSN-RES/SEMIA/SEMIA-2019-0240, IRSN, 2019b.
- P. RUYER : Modélisations de l'interface entre un liquide et un mélange de sa vapeur et d'incondensables. Rapport technique PSN-RES/SEMIA/2019-0106, IRSN, 2019c.
- P. RUYER et V. GEORGENTHUM : Thermal-hydraulic during a RIA transient : State of the art review - Assessment of SCANAIR capabilities. Rapport technique PSN-RES SEMIA-2015-00496, IRSN, 2015.
- P. RUYER, J. GÉRARDIN et P. BOULET : CFD study of mist flow wall heat transfer downstream the quench front during the reflood stage of a LOCA, paper #023. In *The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics NURETH-15, Pisa, Italy, 12-17/05* Nur (2013).

- P. RUYER et T. GLANTZ : Travaux en lien avec le GDR. In *Journées du GDR n° 2042 Transinter - Transferts et Interfaces - 16-18/12, Aussois, France, 2019*. url : [http://gdr2042-transinter.univ-lorraine.fr/files/2020/01/191216\\_GDR\\_transinter\\_Ruyer.pdf](http://gdr2042-transinter.univ-lorraine.fr/files/2020/01/191216_GDR_transinter_Ruyer.pdf).
- P. RUYER et D. JAMET : Un modèle quasi-compressible dédié à la simulation numérique directe des écoulements liquide-vapeur avec changement de phase. In *Congrès Français de Thermique, SFT 2004, Presqu'île de Giens, 25-28 mai, 2004*.
- P. RUYER, K. KESHK, F. DEFFAYET, Ch. MOREL, J. POUVREAU et F. FRANÇOIS : Numerical simulation of condensation in bubbly flow. In *CFD4NRS-3, Washington, USA, 14 -16/09, 2010*.
- P. RUYER, J. ROY, C. VIRON et C. HEIB : Using CFD in the frame of safety studies – Some IRSN experiences. In *Virtual CFD4NRS-8 : Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor Safety - OECD/NEA Workshop, 25-27 nov., 2020*.
- P. RUYER et N. SEILER : Modélisation avancée de la polydispersion en taille des écoulements bouillants. In *Écoulements diphasiques bouillants Séminaire international SHF-AIRH : Two-phase convective boiling flow modelling, Grenoble, 8-9 septembre, 2008a*.
- P. RUYER et N. SEILER : Refroidissement des assemblages ballonnés lors de la phase de renoyage d'un APRP : État de l'art des connaissances et programme de R&D en thermohydraulique locale. Rapport technique DPAM-SEMCA-2008-234, IRSN, 2008b.
- P. RUYER, N. SEILER, M. BEYER et F.-P. WEISS : Application of the moment density method in CFD code to model bubble size distribution. In *European TwoPhase Flow Group Meeting, IMFT Toulouse, 22-24/05, 2007a*.
- P. RUYER, N. SEILER, M. BEYER et F.-P. WEISS : A bubble size distribution model for the numerical simulation of bubbly flows. In *ICMF International Conference on Multiphase Flow, Leipzig, Allemagne, 09-13/07, 2007b*.
- P. RUYER, N. SEILER, B. BITON, F. LELONG, F. SECONDI, D. BAALBAKI et M. GRADECK : Two-phase flow across a partially damaged core during the reflood phase of a LOCA. *Nuclear Engineering and Design*, 264:187 – 194, 2013b. ISSN 0029-5493. doi: [10.1016/j.nucengdes.2013.02.026](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.026).
- P. RUYER et N. SEILER-MARIE : Advanced model for polydispersion in size in boiling flows - Modélisation avancée de la polydispersion en taille des écoulements bouillants. *La Houille Blanche*, 4:65–71, 2009. doi: [10.1051/lhb/2009046](https://doi.org/10.1051/lhb/2009046).
- P. RUYER, L. TRUSKINOVSKY et D. JAMET : Un modèle de champ de phase pour l'ébullition. In *La mécanique des fluides numérique, séminaire CEA-GAMNI, 29-30 janvier, Institut Henri Poincaré Paris, 2007c*.
- P. RUYER, Y. ZHOU, A. ABBATE, Z. ZOU, P. AUSSILLOUS, R. RULLIÈRE et Ph. HABERSCHILL : Evaluation of the consequences of fuel dispersion and interaction with coolant following a cladding failure induced by a RIA- paper a0081. In *TopFuel 2018, Praha, Czech Republic, 30 sept. - 04 oct., 2018*. url : <https://www.euronuclear.org/archiv/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0081-fullpaper.pdf>.
- P.G. SAFFMAN : The lift on a small sphere in a slow shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 224:385–400, 1965.
- V. SCHEIFF : *Étude expérimentale et modélisation du transfert de chaleur de l'ébullition transitoire*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2018. url : [https://oatao.univ-toulouse.fr/23981/1/Scheiff\\_Valentin.pdf](https://oatao.univ-toulouse.fr/23981/1/Scheiff_Valentin.pdf).
- V. SCHEIFF, N. BAUDIN, P. RUYER, J. SEBILLEAU et C. COLIN : Ébullition nucléée lors d'un transitoire de température. In *Actes du congrès français de thermique SFT, 2016*. url : [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres\\_2016/resumes\\_toulouse/152.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2016/resumes_toulouse/152.pdf).
- V. SCHEIFF, N. BAUDIN, P. RUYER, J. SEBILLEAU et C. COLIN : Experimental study of nucleate boiling during transient heating. In *Proceedings of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 12-15/06, Iguazu Falls, Brazil ExH (2017)*.



- V. SCHEIFF, N. BAUDIN, P. RUYER, J. SEBILLEAU et C. COLIN : Transient flow boiling in a semi-annular duct : From the onset of nucleate boiling to the fully developed nucleate boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138:699–712, 2019. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.069](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.069).
- V. SCHEIFF, F. BERGAME, J. SEBILLEAU, P. RUYER et C. COLIN : Experimental study of steady and transient subcooled flow boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164:120548, 2021. ISSN 0017-9310. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120548](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120548).
- V. SCHEIFF, P. RUYER, J. SEBILLEAU et C. COLIN : Experimental study of nucleate and film boiling during transient heating. In *The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer 12-15/03, Nagasaki, Japan*, 2018.
- N. SEILER et P. RUYER : Modèle de polydispersion étendu aux écoulements bouillants. Rapport technique Note IRSN DPAM\SEMCA-2008-048, IRSN, 2008a.
- N. SEILER et P. RUYER : Programme de recherche en thermohydraulique locale. Plan de travail concernant les activités en thermohydraulique avancée à l'échelle de la CFD au SEMCA/LEIDC. Rapport technique DPAM/SEMCA 2008-058, IRSN, 2008b.
- N. SEILER et P. RUYER : Evaluation of contribution from the radiative heat in dispersed flow configuration during the reflooding phase of LOCA. NURISP Nuclear Reactor Integrated Simulation Project Collaborative Project (Large - scale Integrating Project) Seventh Framework Programme EURATOM D2.4.3.21a, European Commission, 2010.
- N. SEILER, P. RUYER et B. BITON : Thermal-hydraulic sub-channel analysis in ballooned regions of a damaged core during the reflood phase of a LOCA, paper n° 140. In *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14) Toronto, Canada 25-29.09 2011* Nur (2011).
- N. SEILER, P. RUYER et J. GÉRARDIN : Final report on CFD modelling of phenomena governing vapor droplets flow in ballooned core regions during the LOCA. NURISP Nuclear Reactor Integrated Simulation Project Collaborative Project (Large - scale Integrating Project) Seventh Framework Programme EURATOM D2.4.3.21b, European Commission, 2011b.
- N. SEILER, P. RUYER, F. LELONG, F. SECONDI et M. GRADECK : CFD simulations of ballooned regions of a damaged core during the reflood phase of a LOCA , paper n° 139. In *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14) Toronto, Canada 25-29.09 2011* Nur (2011).
- N. SEILER, P. RUYER et G. REPETTO : Simulations CFD d'écoulements bouillants avec prise en compte de la distribution en taille des bulles à l'aide d'une méthode des moments. In *Société Française de Thermique, Toulouse, France, 03-06/06/2008*, 2008. url : [http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/actes/congres\\_2008/387.pdf](http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/actes/congres_2008/387.pdf).
- O. SIMONIN : Continuum modelling of dispersed two-phase flows. In *Combustion and turbulence in two-phase flows*. von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1996.
- O. SIMONIN, S. CHEVRIER, F. AUDARD et P. FEDE : Drag force modelling in dilute to dense particle-laden flows with mono-disperse or binary mixture of solid particles. In *9th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2016)*, pages pp. 1–6, Firenze, Italy, mai 2016. url : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01706862>.
- R. SPAN et W. WAGNER : Equations of state for technical applications. I. Simultaneously optimized functional forms for nonpolar and polar fluids. *International Journal of Thermophysics*, 24(1):1–39, 2003a.
- R. SPAN et W. WAGNER : Equations of state for technical applications. III. Results for polar fluids. *International Journal of Thermophysics*, 24(1):111–162, 2003b.
- L. STARON, P.-Y. LAGRÉE et S. POPINET : The granular silo as a continuum plastic flow : The hour-glass vs the clepsydra. *Physics of Fluids*, 24(10):103301, 2012. url : <https://doi.org/10.1063/1.4757390>. doi: [10.1063/1.4757390](https://doi.org/10.1063/1.4757390).
- L. STARON, P.-Y. LAGRÉE et S. POPINET : Continuum simulation of the discharge of the granular silo. *The European Physical Journal E*, 37(1):1–12, 2014. ISSN 1292-895X. url : [10.1140/epje/i2014-14005-6](https://doi.org/10.1140/epje/i2014-14005-6). doi: [10.1140/epje/i2014-14005-6](https://doi.org/10.1140/epje/i2014-14005-6).

- J. STEFAN : Versuche über die Verdampfung. *Sitzungsberichte / Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*, 68(Abt. 2):385 – 423, 1873.
- J. STRNAD : An overview of Stefan's lesser-known contributions. In J. C. CREPEAU, éditeur : *Jožef Stefan : His Scientific Legacy on the 175th Anniversary of His Birth*, chapitre 10, pages 184–199. Bentham Science, 2013. doi: [10.2174/97816080547701130101](https://doi.org/10.2174/97816080547701130101).
- F. TAN et P. RUYER : Écoulement et éjection d'une collection granulaire polydisperse : une étude numérique. Rapport technique PSN-RES/SEMIA 2013-00041, IRSN, 2013.
- S. TANZAWA et T. FUJISHIRO : Effects of waterlogged fuel rod rupture on adjacent fuel rods and channel box under RIA conditions. *Nucl. Sci. and Tech.*, 24(1):23–32, 1987.
- C. TCHEN : *Value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in turbulent fluid*. Thèse de doctorat, Technische Hogeschool Delft, 1947.
- T.G. THEOFANOUS, T.N. DINH, J.P. TU et A.T. DINH : The boiling crisis phenomenon part I : nucleation and nucleate boiling heat transfer. *Exp. Thermal and Fluid Science*, 26:775–792, 2002.
- B.P. TIGHE et M. SPERL : Pressure and motion of dry sand : translation of Hagen's paper from 1852. *Granul. Matter*, 9:141 – 144, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10035-006-0027-x>.
- A. TOMIYAMA, I. SOU, N. ZUN et T. SAKAGUCHI : Effect of Eötvös number and dimensionless liquid volumetric flux on lateral motion of a bubble in a laminar duct flow. *Advances in Multiphase Flow*, 10:3–15, 1995.
- A. TOUTANT : *Écoulements turbulents fortement anisothermes et/ou diphasiques au sein des procédés solaires*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Perpignan Via Domitia, France, novembre 2013. url : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01609179>.
- L. TRUSKINOVSKY : About the "normal growth" approximation in the dynamical theory of phase transitions. *Cont. Mech. Thermodyn.*, 6:185–208, 1994.
- J.D. van der WAALS : Thermodynamische Theorie der Kapillarität unter Voraussetzung stetiger Dichteänderung. *Z. Phys. Chem.*, 13:657–725, 1894. Traduction française dans *Arch. Néerl. Sci. Exactes Nat.*, 28 :121-209.
- J.D. van der WAALS : The thermodynamic theory of capillarity under the hypothesis of a continuous variation of density. *J Stat Phys*, 20:200–244, 1979. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01011514>.
- R. VISENTINI : *Étude expérimentale des transferts thermiques en ébullition transitoire*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2012.
- R. VISENTINI, C. COLIN et P. RUYER : Experimental investigation on heat transfer in transient boiling. In *ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference, paper HT201258245, 8-12 juillet 2012, PuertoRico, USA, 2012a*.
- R. VISENTINI, C. COLIN et P. RUYER : Experimental investigation on heat transfer in transient boiling. In *ECI 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer 2012, Lausanne (June 3-7, 2012)*, 2012b.
- R. VISENTINI, C. COLIN et P. RUYER : Experimental investigation on heat transfer in transient boiling. In *50th European Two-Phase Flows Group Meeting, Udine, Italy, 16-18/05, 2012c*.
- R. VISENTINI, C. COLIN et P. RUYER : Experimental investigation of heat transfer in transient boiling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 55(Supplement C):95 – 105, 2014. ISSN 0894-1777. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089417771400065X>. doi: [10.1016/j.expthermflusci.2014.02.026](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.02.026).
- R. VISENTINI, P. RUYER et C. COLIN : Experimental study of heat transfer during transition toward film boiling, toward a better understanding of the clad to coolant heat transfer during a RIA, paper #024. In *The 15h International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics NURETH-15, Pisa, Italy, 12-17/05 Nur (2013)*.



- R. VISENTINI, P. RUYER et C. COLIN : Experimental study of transient boiling, paper # 120. In *8th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, Jeju, Korea, 26 -31/05, 2013b*.
- D. ZAEPFFEL : *Modélisation des écoulements bouillants à bulles polydispersées*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011. url : <http://www.theses.fr/2011GRENI070>. Thèse de doctorat dirigée par Lhuillier, Daniel et Morel, Christophe Mécanique, génie mécanique Grenoble 2011.
- J.-A. ZAMBAUX : Development in the thermohydraulic module CESAR for cold shutdown accident ASTEC calculations. Rapport Technique SAG-2019-166, IRSN, 2019.
- Y. ZHOU : *Éjection de gaz et de grains suite à la rupture d'un crayon de combustible nucléaire : modélisation de la dynamique*. Thèse de doctorat, Aix-Marseille Univ., 2016.
- Y. ZHOU, P. AUSSILLOUS et P. RUYER : Models for grains and gas ejection dynamics from a silo. In *68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics Volume 60, Number 21, 22-24/11, Boston, Massachusetts, 2015a*.
- Y. ZHOU, P. AUSSILLOUS et P. RUYER : The effect of air pressure gradients on the discharge of granular materials from a silo. In *Proceedings of the ICMF 2016 International Conference on Multiphase Flow, Italy, 22 - 27/05 ICM (2016)*.
- Y. ZHOU, P.-Y. LAGRÉE, S. POPINET, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Discharge flow of granular media from silos with lateral orifice : experiments, discrete, and continuous simulations. In *XXIV ICTAM, 2126/08, Montréal, Canada, 2016b*.
- Y. ZHOU, P.-Y. LAGRÉE, S. POPINET, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Experiments on, and discrete and continuum simulations of, the discharge of granular media from silos with a lateral orifice. *Journal of Fluid Mechanics*, 829:459–485, 2017. doi: [10.1017/jfm.2017.543](https://doi.org/10.1017/jfm.2017.543).
- Y. ZHOU, P.-Y. LAGRÉE, S. POPINET, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Gas-assisted discharge flow of granular media from silos. *Phys. Rev. Fluids*, 4:124305, Dec 2019. doi: [10.1103/PhysRevFluids.4.124305](https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.124305).
- Y. ZHOU, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Discharge flow of a bidisperse granular media from a silo : discrete particle simulations. *Phys. Rev. E*, 92:062204, 2015b. url : <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.92.062204>. doi: [10.1103/PhysRevE.92.062204](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062204).
- Y. ZHOU, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Models for grains and gas ejection dynamics following the rupture of a nuclear fuel rod. In *10th Annual European Rheology Conference 14-17/05, Nantes, France, 2015c*.
- Z. ZOU : *Étude de l'éjection de grains hors d'un cylindre pressurisé*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, 2019. url : [https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation\\_recherche/Theses/Theses-soutenues/PSN-RES/Pages/2019-Zou-etude-ejection-grains-hors-cylindre-pressurise.aspx](https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation_recherche/Theses/Theses-soutenues/PSN-RES/Pages/2019-Zou-etude-ejection-grains-hors-cylindre-pressurise.aspx).
- Z. ZOU, P. AUSSILLOUS, P. RUYER et P.-Y. LAGRÉE : Experiments, continuous and discrete simulations of the role of an inclined bottom on the lateral discharge flow of granular media from silos - paper # 2018850. In *13th World Congress on Computational Mechanics / 2nd Pan American Congress on Computational Mechanics 23 -27 juillet 2018, N.Y. USA, 2018a*.
- Z. ZOU, P. AUSSILLOUS, P. RUYER et P.-Y. LAGRÉE : Studies of the role of an inclined bottom and of gas flow on the discharge flow of granular media from silos. In *EFMC12 - 12th European Fluid Mechanics Conference 9-13 September 2018, Vienna, Austria, 2018b*.
- Z. ZOU, P. AUSSILLOUS, P. RUYER et P.-Y. LAGRÉE : Unsteady discharge rate of granular materials out of a pressurized tank. In *Workshop on Powders and Granular Materials Challenges and Future Trends, 6-7 June 2019, Montpellier (France), 2019*. url : <https://pgm2019.sciencesconf.org/>.
- Z. ZOU, P. RUYER et P. AUSSILLOUS : Discharge rate of gas and granular media out of a reservoir. In *Dispersed Two-Phase Flows 2018, 224th session of Scientific and Technical Committee of SHF 17-19 September, 2018, ENSEEIHT, Toulouse, 2018c*.
- Z. ZOU, P. RUYER, P.-Y. LAGRÉE et P. AUSSILLOUS : Discharge of a silo through a lateral orifice : role of the bottom inclination versus friction. *Phys. Rev. E*, 102:052902, Nov 2020. doi: [10.1103/PhysRevE.102.052902](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.052902).

N. ZUBER : On the stability of boiling heat transfer. *J. Heat Transfer, transactions of the ASME*, 80(2):711–720, 1958.