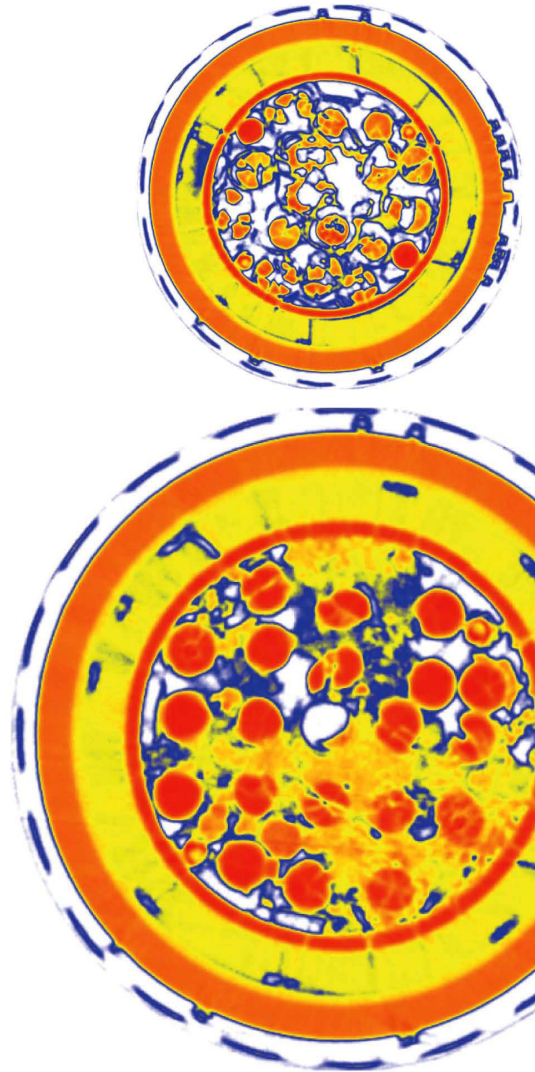


Mémoire d'habilitation à diriger des recherches

**Étude des transferts de masse et de chaleur pour des écoulements à travers des structures poreuses complexes.  
Application à la modélisation des accidents graves de réacteurs nucléaires à eau sous pression**

Florian FICHOT



## EDITORIAL

Ce deuxième opus de la collection HDR de l'Institut de radioprotection et sûreté nucléaire, que j'ai le plaisir de préfacier, traite d'accidents dits « graves » de réacteur nucléaire, c'est-à-dire des accidents majeurs conduisant à la fusion du cœur du réacteur. Ces accidents ont une probabilité d'occurrence heureusement très faible, mais ils peuvent entraîner des conséquences sérieuses à la fois en termes sanitaires et en termes de pollution de l'environnement. C'est pourquoi l'IRSN, établissement public d'expertise des risques liés à l'énergie nucléaire et à l'utilisation des rayonnements ionisants, consacre depuis plusieurs années des efforts importants de recherche et d'étude dans ce domaine, dans le but de prévenir ce type d'accident et d'en limiter les conséquences.

L'enjeu de ces recherches est plus précisément de prédire le déroulement d'un accident à partir de diverses situations données, ce qui nécessite de modéliser les phénomènes impliqués de manière suffisamment fiable. Or leur complexité est telle que les modéliser correctement impose de les comprendre très finement. Les travaux de Florian Fichot, chercheur de l'IRSN, s'inscrivent dans ce contexte. Il s'est attaché à comprendre et à modéliser le comportement des bains de matériaux fondus pouvant résulter de la fusion du cœur ainsi que le transfert de la chaleur dégagée au sein de ces matériaux vers la cuve du réacteur.

Dans son analyse, Florian Fichot s'est appuyé à la fois sur des expériences analytiques et des expériences plus globales dont certaines ont été conduites par l'Institut dans le cadre de programmes de recherche internationaux. Il a ainsi développé des modèles mathématiques qui ont ensuite été intégrés dans des logiciels de simulation, outils indispensables pour passer de l'échelle du laboratoire à celle du réacteur. Les recherches de Florian Fichot se poursuivent à présent pour améliorer la compréhension des phénomènes de renoyage de débris de cœur. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de certaines parades pour tenter d'arrêter la progression de la fusion du cœur et préserver l'intégrité de la cuve.

Cette habilitation à diriger les recherches (HDR) consacre une dizaine d'années d'activité de recherche et constitue une validation du projet scientifique du chercheur. Il s'agit du plus haut diplôme décerné par l'université française ; à ce titre, il permet au chercheur de postuler aux fonctions de Professeur des universités, reconnaissant aussi ses qualités d'encadrement de doctorants.

A l'échelle de l'IRSN, le nombre d'HDR obtenues par les chercheurs de l'Institut est un indicateur de la vitalité de la recherche menée dans ses laboratoires et de sa capacité à former de jeunes chercheurs dans un spectre de disciplines très large allant des sciences de la santé à celles de l'ingénieur en passant par les sciences de l'environnement.

L'Institut est donc particulièrement fier de cette HDR et salue le travail accompli, qui contribue à faire avancer la sûreté nucléaire dans notre pays, et même au-delà.

Michel Schwarz,  
Directeur scientifique de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire  
Janvier 2010

**Illustrations en page de couverture :** Deux coupes d'une grappe de crayons de combustible montrant la diversité et la complexité des structures obtenues après dégradation de ces crayons durant un essai PHEBUS-FPT1 réalisé par l'IRSN.

Mémoire présenté pour l'obtention du  
Diplôme d'habilitation à diriger des recherches

Par Florian Fichot  
Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire  
Direction de la prévention des accidents majeurs  
Centre de Cadarache (Bouches-du-Rhône).

# ÉTUDE DES TRANSFERTS DE MASSE ET DE CHALEUR POUR DES ÉCOULEMENTS À TRAVERS DES STRUCTURES POREUSES COMPLEXES APPLICATION À LA MODÉLISATION DES ACCIDENTS GRAVES DE RÉACTEURS NUCLÉAIRES À EAU SOUS PRESSION

2006

Institut national polytechnique de Toulouse

devant le jury composé de :

Georges Berthoud,	Directeur de recherches, CEA Grenoble	
Jean-Pierre Caltagirone,	Professeur, ENSCPB Bordeaux	(rapporteur)
Yves Fautrelle,	Professeur, ENSHMG, INP Grenoble	(rapporteur)
Dominique Gobin,	Professeur, FAST, Université Paris 6	
Gunther Lohnert,	Professeur, IKE-Universität de Stuttgart	
Michel Quintard,	Professeur, IMFT, INP Toulouse	
Lounes Tadrist,	Professeur, IUSTI, Polytech Marseille	



## SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	7
1.1	Description d'un accident grave de réacteur	8
1.2	Modélisation générale du réacteur en cours de dégradation	9
1.3	Méthodologie et travaux réalisés	12
2	TRANFERTS THERMIQUES - RAYONNEMENT	15
2.1	Nomenclature	17
2.2	Hypothèses et approche de modélisation	17
2.2.1	Choix de la modélisation	17
2.2.2	La conductivité radiative	18
2.2.3	La conductivité équivalente	20
2.3	Validations et applications	22
2.4	Conclusion	23
3	COULÉE DES MATÉRIAUX FONDUS	25
3.1	Introduction	25
3.2	Nomenclature	26
3.3	Modélisation	26
3.4	Validation	28
3.5	Généralisation du modèle	29
3.6	Conclusion	30
4	SOLIDIFICATION DES MÉLANGES	33
4.1	introduction	33
4.2	Nomenclature	34
4.3	Modélisation de la solidification colonnaire	35
4.4	Les modèles macroscopiques actuels	37
4.5	Modélisation adoptée	37
4.6	Validation du modèle colonnaire	38
4.7	Modélisation de la solidification équiaxe	40
4.8	Simulation de croissance cristalline par un modèle à interface diffuse	41
4.9	Conclusion	42
5	RENOYAGE - ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES EN MILIEU POREUX	43
5.1	Introduction	43
5.2	Nomenclature	44
5.3	Problématique du renoyage de particules surchauffées	45
5.4	Modèle macroscopique	46
5.4.1	Validation et application au renoyage de débris en fond de cuve	47
5.5	Simulation directe d'écoulements diphasiques dans un milieu poreux	50
5.6	Conclusion	54
6	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	55

<b>7</b>	<b>PRÉSENTATION PERSONNELLE</b>	<b>57</b>
7.1	Curriculum vitae	57
7.2	Publications	60
7.2.1	Reuves à comité de lecture	60
7.2.2	Congrès avec actes et comité de lecture	61
7.3	Carrière	63
7.4	Objectifs	65
<b>8</b>	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE</b>	<b>77</b>

# 1 INTRODUCTION

---

Ce document présente les recherches effectuées dans le cadre de mon activité d'ingénieur à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).

Il est important de garder à l'esprit que les travaux de recherche décrits dans ce document s'inscrivent dans une problématique industrielle assez complexe (qui sera décrite plus bas). Certaines contraintes liées à ce contexte industriel expliquent donc, en partie, une apparente «dispersion» dans les directions de recherche ou même un défaut d'approfondissement de certains thèmes. L'un des objectifs de ce document sera donc de montrer l'existence d'une cohérence entre les thèmes développés et entre leurs degrés d'aboutissement.

Dans cette introduction, je commencerai par présenter le contexte général des travaux de recherche menés jusqu'ici. Ensuite je préciserai les objectifs visés puis la méthodologie utilisée pour tenter de les atteindre.



## 1.1 Description d'un accident grave de réacteur

Dans un premier temps, je vais brièvement décrire le déroulement supposé d'un accident de réacteur à eau sous pression et indiquer les principaux phénomènes physiques et chimiques mis en jeu. Un schéma du cœur non dégradé est présenté sur la Fig. 1 ainsi qu'un schéma des crayons combustibles. Le cœur est initialement composé d'environ 40 000 crayons de 4 m de haut, de 1 cm de diamètre et espacés d'environ 2 mm au plus près.

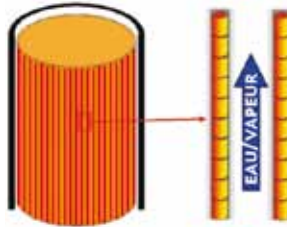


FIG. 1 : Vue schématique du cœur non dégradé et des crayons combustibles

Un accident grave peut être initié à la suite d'une accumulation de défaillances du système de refroidissement du cœur et des systèmes de sécurité, défaillances éventuellement aggravées par des erreurs humaines (mauvaises décisions). Dans tous les cas, il y a une perte prolongée du refroidissement dans le circuit primaire, ce qui conduit au dénoyage partiel ou total du cœur. En effet, bien que la réaction nucléaire en chaîne soit arrêtée, les produits de fission présents dans les crayons combustibles produisent une puissance volumique de l'ordre de 1 à 3 MW/m<sup>3</sup> qui est suffisante pour évaporer l'eau présente dans la cuve. Lorsque le cœur est dénoyé, le refroidissement des crayons par la vapeur devient peu efficace et leur température s'élève rapidement (de l'ordre de 1 K/s). L'accident est qualifié de grave lorsque la température maximale atteinte dans le cœur dépasse 1400 K. Les événements qui s'ensuivent dépendent de nombreux facteurs tels que la taille de la brèche de circuit à l'origine de la défaillance ou les mesures de sécurité mises en œuvre. Cependant, suite à l'accident de Three Mile Island (Broughton et al., 1989) ainsi qu'à partir d'études expérimentales, on est maintenant capable de décrire les étapes successives d'un scénario type d'accident grave.

À partir de 1300 K, la réaction d'oxydation par la vapeur des gaines formées d'un alliage à base de zirconium (Zr) devient significative. Elle entraîne la formation d'une couche de zircone (ZrO<sub>2</sub>) qui modifie les propriétés mécaniques de la gaine et la rend moins résistante. Cette réaction d'oxydation fortement exothermique contribue également à l'élévation de la température du cœur. Lorsque la température atteint 1800 K, l'énergie produite par la réaction devient largement supérieure à l'énergie perdue par échanges thermiques. Il y a alors emballement de la réaction et la température atteint très rapidement 2300 K, température autour de laquelle la gaine peut casser, libérant ainsi le reste du Zircaloy qui est alors liquide (température de fusion autour de 2100 K). D'autre part, on peut préciser que cette réaction produit de l'hydrogène.

L'évolution du cœur pendant cette première phase de l'accident peut donc se résumer par le gonflement et l'éclatement des gaines ainsi que la fusion progressive du cœur (d'abord les métaux tels que l'acier et le Zircaloy, puis les oxydes tels que ZrO<sub>2</sub> et UO<sub>2</sub>). Il se forme alors un mélange de matériaux fondus appelé *corium*,

constitué principalement d' $\text{UO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  et Zr, qui se relocalise dans les régions plus basses et plus froides du cœur. Après une dégradation importante des crayons, les pastilles combustibles peuvent s'effondrer et s'accumuler. Les fragments de pastilles accumulés forment alors ce que l'on appelle un lit de débris, la taille caractéristique de ces débris étant de quelques millimètres. En cas d'impossibilité de refroidissement, les débris fondent et il se forme un bain de *corium* liquide à haute température qui s'étend progressivement dans le cœur, puis jusqu'au fond de la cuve, laquelle peut alors se rompre. Le renoyage du cœur est l'une des mesures de sécurité mises en œuvre pour tenter d'éviter ce scénario catastrophique. L'efficacité du refroidissement du cœur est alors conditionnée par les caractéristiques de la matrice plus ou moins poreuse constituée par les particules et les matériaux fondus. Dans la partie suivante, je précise les objectifs ayant conduit à développer des modèles capables de décrire l'évolution du cœur pendant la dégradation ainsi que son refroidissement lors d'un renoyage par de l'eau.

## 1.2 Modélisation générale du réacteur en cours de dégradation

La Fig. 2 permet d'avoir une idée de l'aspect d'un cœur de réacteur fortement dégradé. On y voit des tomographies (coupes axiale et radiales) de l'état final de l'essai Phebus<sup>1</sup> FPT1 au cours duquel une grappe de 20 crayons a été soumise à un transitoire accidentel la conduisant à fondre partiellement au centre. On peut voir un bain de matériaux fondus dans la partie basse.

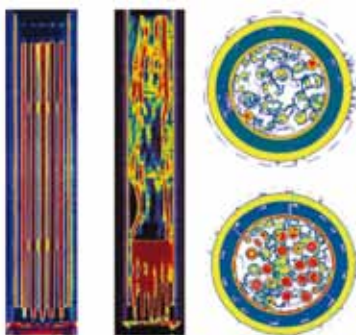


FIG. 2 : Tomographies axiales (avant et après l'essai) et radiales (2 élévations différentes après l'essai) de la grappe Phebus-FPT1

La Fig. 3 est un dessin schématisant l'état du réacteur TMI-2 après l'accident. Cette figure est extraite d'un article de Broughton *et al.* (1989) qui décrit le scénario supposé de l'accident. On peut y voir, en bas du cœur, une zone de crayons intacts, surmontée d'un large bain de matériaux fondus, lui-même surmonté d'un amoncellement de débris résultant de l'effondrement de la partie haute des crayons. On peut ainsi se rendre compte de la diversité des configurations locales pouvant apparaître lors de la dégradation d'un cœur.

<sup>1</sup>Le programme international Phebus FP (Fission Product), basé sur l'installation Phebus située à l'IRSN, à Cadarache, France, a mis en évidence des phénomènes clés impliqués dans les séquences d'un accident sévère de réacteur nucléaire à eau légère grâce à des expériences de simulation intégrale à échelle réduite. L'essai FPT1 est le second de la série.

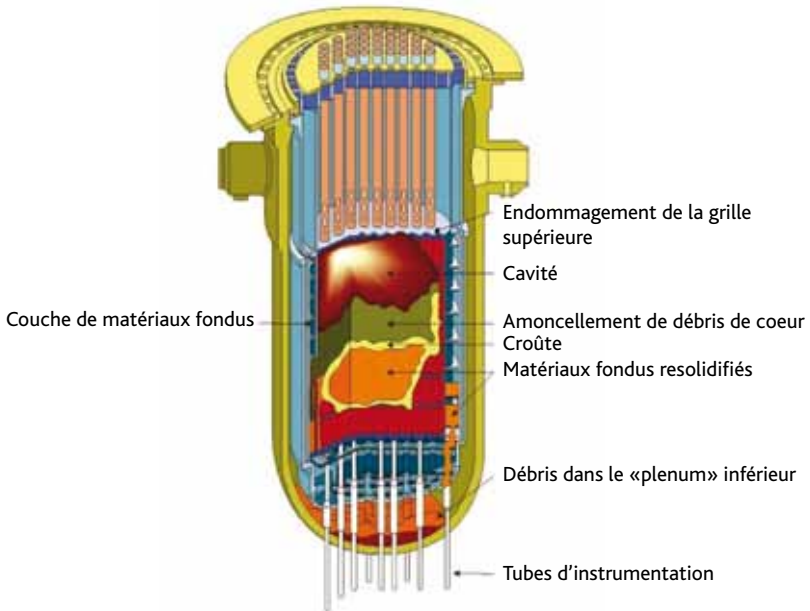


FIG. 3: Vue schématique du réacteur de TMI-2 après l'accident

La géométrie peut varier de celle des crayons initiaux, ordonnée et bien définie, à celle d'un «lit de débris», mélangeant particules solides et matériaux fondus. La porosité varie également beaucoup. La Fig. 4 illustre schématiquement cette évolution. Le besoin d'adapter les codes de calculs d'accidents graves (initialement écrits pour une géométrie demeurant quasi-intacte) pour traiter ces évolutions a été souligné à partir du milieu des années 1990 (Wright, 1996).

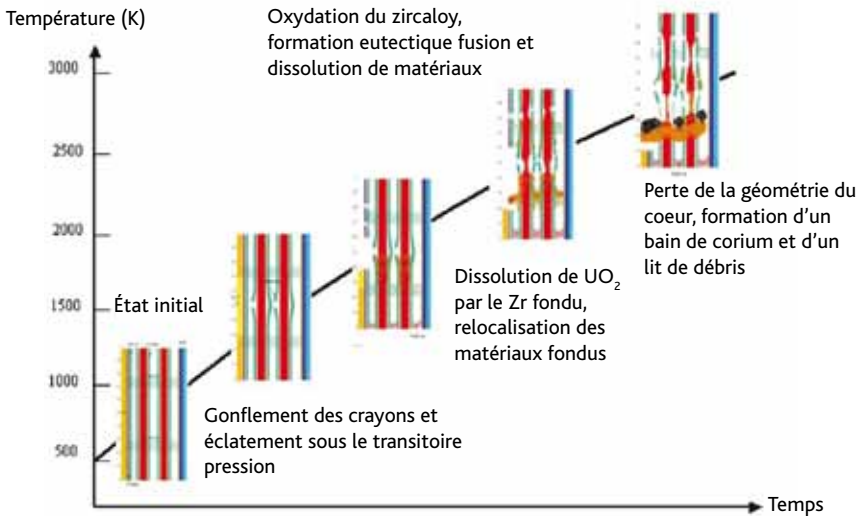


FIG. 4: Évolution schématique de l'état du cœur au cours de la dégradation

L'approche générale choisie pour modéliser le cœur consiste à le traiter comme un milieu continu. Ce choix est dicté, d'une part, par la différence d'échelle entre la dimension du cœur (3 m de diamètre environ) et la taille des crayons ou des débris formés (moins de 1 cm). Cette approche n'est d'ailleurs pas novatrice puisque les travaux de Viskanta *et al.* (1987), Schmidt (1993), Schmidt & Gasser (1997) avaient déjà montré la pertinence d'une description continue pour modéliser le cœur intact ou les particules résultant de la dégradation. L'originalité du travail décrit ici est d'avoir poursuivi ces travaux précurseurs en rassemblant dans une seule approche cohérente toutes les configurations rencontrées au cours d'un accident grave. D'autre part, il faut aussi signaler que, d'un point de vue numérique, il est préférable d'aboutir à un unique système d'équations capables de prendre en compte des domaines où les caractéristiques géométriques varient, plutôt que de résoudre un système différent sur chaque domaine. En effet, dans une approche multi-domaines, la définition de chaque domaine reste assez arbitraire, sachant que les frontières entre les domaines évoluent et font donc partie des inconnues à déterminer. Pour simuler les accidents graves de réacteurs, il existe des approches multi-domaines (Suh & Henry, 1996, Seiler & Froment, 2000) mais elles correspondent à un choix délibéré de simplification dans le but d'obtenir des ordres de grandeurs plutôt qu'une description précise de l'évolution des matériaux dans la cuve. De plus, ces approches ne concernent que la description des matériaux en phase avancée de l'accident. Elles ne sont pas utilisables pour traiter le cœur dans la phase initiale de l'accident.

Ainsi, les modèles décrits dans la suite de ce document ont été développés avec le souci de prendre en compte de manière aussi continue que possible les changements de configuration locaux puisqu'on a vu que la géométrie évolue au cours de l'accident. Cela implique que les formulations soient assez générales pour considérer des géométries quelconques. Concrètement, on s'intéressera essentiellement à deux géométries types : les arrangements de cylindres (crayons intacts) et les amas de sphères (débris). Pour les configurations intermédiaires (crayons déformés, coulées de matériaux, coexistence de crayons et de débris), on cherchera à étendre de manière continue les formulations correspondant aux deux configurations types.

Il est utile de rappeler ici que les codes de calculs d'accidents graves sont utilisés pour des études de sûreté qui doivent prendre en compte de très nombreuses incertitudes : sur la modélisation des phénomènes physiques, mais aussi sur la séquence d'événements de l'accident (disponibilité des systèmes de sécurité, actions des opérateurs, etc.). À l'heure actuelle, la stratégie de l'IRSN est d'étudier tous les scénarios possibles et d'estimer ainsi la probabilité d'occurrence des événements aggravants d'un accident (forte production d'hydrogène, relâchement important de produits de fission, rupture de la cuve, etc.). Ces études, appelées études probabilistes de sûreté (EPS), nécessitent de réaliser un très grand nombre de calculs, ce qui implique d'utiliser des modèles assez simplifiés approchant parfois de manière assez grossière les phénomènes physiques considérés. À l'inverse, l'objectif du code ICARE/CATHARE et des modélisations plus détaillées, qui sont développées dans notre laboratoire, est de constituer une référence pour estimer les limites d'utilisation des codes plus rapides utilisés pour les EPS. Ces modèles détaillés peuvent aussi servir pour faire des estimations plus précises de certaines grandeurs importantes (masse d'hydrogène produite, masse de combustible dans le corium, taux d'oxydation du corium, etc.). Ils peuvent aussi servir à estimer l'efficacité de certains dispositifs comme les injections d'eau de sécurité (le renoyage du cœur dépend beaucoup de l'état de dégradation) ou les recombineurs d'hydrogène dans l'enceinte (dont l'efficacité dépend de la production maximale instantanée d'hydrogène).

### 1.3 Méthodologie et travaux réalisés

La démarche suivie, en général, consiste à faire une prise de moyenne volumique des équations de conservation locales dans chacune des phases et à en déduire des équations moyennes. Cette méthode a été introduite par Marle (1967), Whitaker (1969) et Gray (1975). Elle a déjà été utilisée pour la modélisation des échanges de masse (Zanotti & Carbonell, 1984, Plumb & Whitaker, 1988, Quintard & Whitaker, 1994a, Chella *et al.*, 1998), d'énergie (Quintard & Whitaker, 1995, Batsale *et al.*, 1996, Quintard *et al.*, 1997) et de quantité de mouvement (Whitaker, 1986b, 1996, Quintard & Whitaker, 1988, Barrère *et al.*, 1992, Quintard & Whitaker, 1994b, 1994c) dans les milieux multiphasiques homogènes ou hétérogènes. Le changement d'échelle peut être mené de manière rigoureuse pour les phénomènes «linéaires» ou découplés (diffusion, dispersion, etc.) mais il nécessite certaines simplifications plus ou moins empiriques lorsque les phénomènes sont non linéaires (rayonnement (Whitaker, 1980)) ou couplés (transferts de quantité de mouvement entre deux phases fluides (Quintard & Whitaker, 1988, Whitaker, 1986a)). Les équations moyennes font intervenir des coefficients de transport macroscopiques qui contiennent toute l'information concernant les phénomènes physiques à l'échelle locale. On se retrouve donc, une fois le système d'équations moyennes établi, à devoir déterminer un ensemble de coefficients macroscopiques. Deux difficultés apparaissent : d'une part, on ne connaît pas bien la géométrie du milieu poreux et, d'autre part, la compréhension des phénomènes physiques, même à l'échelle locale, n'est pas totale.

Les travaux réalisés jusqu'à maintenant ont, dans un premier temps, consisté à établir le système d'équations à résoudre pour traiter correctement l'évolution des matériaux du cœur pendant une séquence accidentelle.

Cela comprend :

- les transferts thermiques dans le cœur avec, entre autres, un traitement adéquat du rayonnement,
- la coulée des matériaux fondus à travers le cœur,
- la solidification des matériaux, en prenant en compte les transferts de masse associés,
- l'écoulement de l'eau et de la vapeur à travers le cœur dégradé, en particulier lors d'un renouage.

Le plan de ce document suivra ces quatre thèmes.

Pour mieux comprendre certains phénomènes à l'échelle locale, nous avons été amenés à développer des outils de simulation numérique permettant de calculer les transferts sur des cellules représentatives du milieu poreux.

Cela concerne :

- le rayonnement, simulé par une méthode de Monte Carlo. Il s'agit d'une activité très récente que je cite pour être complet, mais dont je ne m'occupe pas directement.
- la solidification de mélanges binaires, sans convection, simulée par une méthode à interface diffuse (*Phase Field*)
- les écoulements diphasiques (eau-vapeur), sans changement de phase, simulés par une méthode à interface diffuse (Cahn-Hilliard).

Les deux derniers points seront décrits dans les chapitres correspondants. Dans notre cas, une des difficultés de la « simulation directe » est de définir le milieu poreux aussi précisément que possible pour ne pas induire de spécificités inadéquates en construisant les cellules représentatives. En particulier, on cherche à ne pas imposer des symétries n'existant pas dans le milieu réel et à respecter le caractère aléatoire de la distribution des perturbations géométriques autour de la distribution initiale (symétrique et ordonnée). Pour ce faire, nous avons commencé récemment un travail de traitement d'images sur des tomographies d'assemblages de crayons dégradés (essais PHEBUS-PF). Ce travail ne sera pas abordé dans ce document car il est trop récent, mais, à titre d'illustration, quelques images représentatives du milieu qu'on cherche à modéliser sont présentées. Les coupes radiales de la Fig. 2 montrent deux états de dégradation. On peut constater (coupe du bas) que les coulées de matériaux apportent des perturbations de la géométrie initiale sous forme de déformations des cylindres dont la taille est de l'ordre de 1 mm à 3 mm. On peut aussi voir (coupe du haut) que, pour une dégradation plus avancée, les crayons eux-mêmes se fragmentent et le milieu devient à la fois plus homogène et moins ordonné. On espère ainsi, à partir d'une analyse de la distribution statistique de la taille des pores et des particules, pouvoir aboutir à une description réaliste de l'évolution de l'état de dégradation en fonction de certaines variables principales telles que la température ou la fraction volumique de matériaux fondus, etc. Cela permettra de simuler les phénomènes à l'échelle locale sur des cellules réalistes du milieu et d'obtenir des formulations pour les propriétés de transport effectives, qui prennent en compte les évolutions de géométrie.

Dans ce document, je présenterai les quatre thèmes indiqués plus haut, en expliquant les choix effectués et les hypothèses retenues, en insistant sur les résultats les plus importants. Une grande partie des détails des développements ou des résultats se trouvent dans quelques publications présentées en annexe. Pour de plus amples détails, il faut se reporter aux mémoires de thèses ou à certaines publications citées en références. J'ai également travaillé sur d'autres thèmes de recherche dans le domaine des matériaux : oxydation du Zircaloy (Fichot *et al.*, 2004) et stratification des mélanges quaternaires (U-Zr-Fe-O) (Salay & Fichot, 2005). Ces travaux ne figurent pas dans ce rapport parce qu'ils n'ont pas de lien direct avec le problème général du changement d'échelle dans un cœur dégradé.



## 2 TRANSFERTS THERMIQUES - RAYONNEMENT

---

Comme indiqué dans l'introduction, un cœur de réacteur en cours de dégradation est assimilable à un milieu poreux. Celui-ci est constitué d'une matrice opaque (cylindres plus ou moins déformés ou « débris sphériques ») baignée par un fluide semi-transparent (principalement de la vapeur d'eau). La modélisation des échanges de chaleur à travers ce milieu présente plusieurs difficultés :

- d'une part, la géométrie est évolutive et le milieu passe d'un état ordonné mais anisotrope (arrangement de cylindres) à un état désordonné et relativement isotrope (amoncellement de débris particulaires),
- d'autre part, la température est très élevée (typiquement supérieure à 1400 K) ce qui implique une prédominance des transferts radiatifs qui sont particulièrement difficiles à estimer dans un tel milieu à cause des réflexions multiples ou des phénomènes d'absorption/émission par le solide.



La propagation de la chaleur à travers le milieu s'effectue selon trois modes :

- La conduction à travers les phases continues,
- La dispersion, qui résulte des fluctuations de vitesse du fluide induites par la tortuosité du milieu, à petite échelle,
- Le rayonnement à travers le milieu semi-transparent entre les particules solides.

Il est primordial de déterminer la température dans le cœur dégradé avec autant de précision que possible. En effet, de ce facteur dépendent les deux événements les plus significatifs d'un accident grave : l'emballement de la réaction d'oxydation du Zr et la fusion des matériaux. Pour aborder le traitement des transferts thermiques, la démarche a d'abord été de distinguer la géométrie non dégradée (crayons) de celle obtenue après dégradation (débris). Cependant, par la suite, il s'est avéré plus judicieux de rassembler le tout dans un seul modèle, la principale difficulté étant la modélisation du rayonnement. Dans ce cadre, j'ai participé au suivi d'une thèse effectuée au CEA par Pablo Rubiolo sous la direction de Jean-Marie Gatt. Les résultats de la thèse s'avérant intéressants, les travaux sur ce thème se sont poursuivis au sein du laboratoire, ce qui a permis d'aboutir à un modèle de rayonnement très général et adapté à nos besoins. Ce travail a été effectué en collaboration avec Magali Zabiégo. Le modèle développé repose sur l'hypothèse que le cœur dégradé peut être considéré comme un milieu optiquement épais. Cette hypothèse est justifiée lorsque le libre parcours moyen d'un photon (quelques millimètres dans ce cas) est petit par rapport à la dimension du domaine (quelques mètres dans ce cas). On peut alors linéariser le flux radiatif et en faire une approximation diffusiv (Özisik, 1973), ce qui permet aussi d'inclure la conduction (et la dispersion, le cas échéant) dans un tenseur de conductivité unique.

Dans une première partie, nous définirons la conductivité radiative et nous montrons comment la calculer pour un arrangement de cylindres ou de sphères. Ensuite, nous ferons un point rapide sur la validation du modèle.

## 2.1 Nomenclature

$\hat{a}$	Coefficient d'absorption
$d$	Taille des particules ou des crayons, m
$k$	Conductivité, $W.m^{-1}.K^{-1}$
<b>Ke</b>	Tenseur de conductivité équivalente
<b>Kr</b>	Tenseur de conductivité radiative
<b>Kt</b>	Tenseur de conductivité thermique
$K_{r_{0\perp}}$	Conductivité radiative lorsque la conductivité du solide $k_s$ tend vers zéro, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$p$	Porosité du milieu
$q_r$	Flux radiatif, $W.m^{-2}$
$\hat{r}$	Coefficient de réflexion

$\hat{t}$	Coefficient de transmission
$T$	Température, K

### Symboles grecs

$\Delta l$	Épaisseur de la cellule, m
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman

### Indices

$f$	Phase fluide
$s$	Phase solide
$\perp$	perpendiculaire à l'axe des crayons
$\parallel$	parallèle à l'axe des crayons

## 2.2 Hypothèses et approche de modélisation

### 2.2.1 Choix de la modélisation

Les modèles pour les transferts radiatifs dans un milieu poreux gaz-solide peuvent être classés en deux catégories : les modèles homogènes et les modèles de cellule.

Les modèles homogènes sont obtenus en établissant l'équation de transfert radiatif (luminance) valable dans le milieu poreux. Elle peut être obtenue de manière exacte, d'un point de vue physique, quand la porosité est élevée (particules « diluées ») et quand l'hypothèse de diffusion indépendante est valide. Cette hypothèse permet en effet de ne calculer que le champ diffusé par une particule isolée, le champ diffusé dans le milieu poreux étant la somme des champs diffusés par chaque particule indépendamment. L'extension de ces méthodes à des milieux poreux plus denses n'a pas été prouvée et fait l'objet de controverses. Néanmoins, dans le domaine des accidents graves de réacteurs, des modèles homogènes simples sont utilisés, en particulier la méthode « *Net Radiation Enclosure* » (NRE) de Siegel & Howell (1972) ou la méthode de Hottel & Sarofim (1967). L'application de ces modèles dans les codes SCDAP et ICARE2 est expliquée dans Sohal (1986) ou Fichot *et al.* (2001). L'une des limitations importantes de ces méthodes est l'impossibilité de calculer les facteurs de vue moyens, dès lors que les crayons sont dégradés et que leur géométrie n'est plus cylindrique.

D'autres limitations de ces modèles ont été identifiées. En particulier, il est nécessaire d'introduire les effets de diffusion dépendante du rayonnement (réflexions multiples dans notre cas) pour augmenter la précision des résultats. Ceci n'est pas surprenant puisque les modèles homogènes sont basés sur l'hypothèse d'une réflexion indépendante. Ils ne peuvent pas traduire correctement les réflexions multiples et les variations du flux radiatif à l'échelle d'une particule, qui sont caractéristiques des transferts radiatifs dans un milieu poreux dense. Dans ce cas, les modèles de cellule constituent une alternative intéressante. Le rayonnement est alors modélisé à petite échelle, dans une micro-structure dont on peut définir la géométrie (cylindre, sphère, fibre... ). Les réflexions multiples et/ou anisotropes peuvent être prises

en compte sans trop de complexité. Cependant les effets de champ lointain et la diffraction lointaine sont mal estimés, ce qui restreint l'utilisation de ces modèles aux milieux optiquement épais. Parmi les modèles de cellule, on peut citer le modèle multi-couche (voir par exemple Mazza *et al.* (1991)), la méthode de Monte-Carlo (voir par exemple Singh & Kaviany (1991) ou Tancrez & Taine (2004)), la méthode de moyenne volumique proposée par Whitaker (1980), et le modèle de conductivité radiative (Vortmeyer (1978), Tien & Drolen (1988), Strieder (1997)).

Comme expliqué dans Strieder (1997), le modèle de conductivité radiative est à la fois pratique et suffisamment précis pour les calculs de transferts radiatifs dans des applications industrielles. Comparé à d'autres approches comme la méthode NRE, il présente l'avantage de conduire à un système tri diagonal (dans chaque direction de l'espace) qui est plus rapide à résoudre numériquement. De plus, si nécessaire, l'extension au 3D est directe. Cet avantage numérique et le fait de pouvoir prendre en compte des géométries de cellule variées pour déterminer la conductivité radiative nous ont donc conduits à choisir ce modèle. Il est intéressant de noter que cette approche avait déjà été suivie par Viskanta *et al.* (1987) pour modéliser les transferts radiatifs dans un cœur de réacteur non dégradé, et par Schmidt & Gasser (1997) pour modéliser les transferts radiatifs dans un lit de débris (particules).

## 2.2.2 La conductivité radiative

Comme il a été expliqué plus haut, un cœur de réacteur, qu'il soit intact ou dégradé, peut être considéré comme un milieu optiquement épais. Dans ce cas, le flux radiatif local est fonction uniquement des grandeurs locales et les transferts radiatifs peuvent être décrits par une loi de diffusion semblable à la loi de Fourier pour la conduction (Brewster, 1992). Le flux radiatif est approximé de la façon suivante :

$$\mathbf{q}_r = -K_r \nabla T \quad (1)$$

Dans cette expression,  $K_r$  est la conductivité radiative, qui est fonction de la température, de la géométrie du milieu poreux et des propriétés optiques des matériaux. Le concept de conductivité radiative a été étudié et utilisé depuis longtemps et de nombreuses formulations de  $K_r$  existent. Une rapide revue est faite dans (Zabiégo *et al.*, 2006). Une forme générale a été proposée initialement par Vortmeyer (1978) :

$$K_r = 4Fd\sigma T^3 \quad (2)$$

dans laquelle  $F$  est appelé le facteur d'échange radiatif. Plusieurs formulations de ce facteur existent dans la littérature (voir Tien (1988) ou Strieder (1997)) et l'on trouve une discussion à ce sujet dans Kaviany (1995).

Le modèle présenté ici est développé à partir d'une approche différente qui consiste à discrétiser le milieu en volumes élémentaires sur lesquels on écrit le bilan des flux radiatifs pour obtenir l'équation globale de transfert radiatif. La conductivité radiative est obtenue directement par l'écriture des échanges entre deux volumes adjacents. Les flux sont calculés en prenant en compte les variations de température le long de la surface des particules, ce qui n'est pas toujours le cas dans les autres méthodes. De plus, l'absorption et l'émission de la vapeur sont incluses dans le calcul de l'émissivité et de l'absorptivité du milieu poreux. Par commodité cependant, on supposera le fluide transparent. Le calcul de  $K_r$  étant assez long et fastidieux, il ne

sera pas décrit ici, mais on trouvera les détails dans les travaux de Pablo Rubiolo (Rubiolo (2000), Rubiolo & Gatt (2002)).

Les principales hypothèses permettant d'établir l'expression de  $K_r$  sont :

- les surfaces solides sont opaques et grises
- la réflexion sur les surfaces et les limites du domaine sont diffuses
- le flux radiatif n'est pas fortement anisotrope.

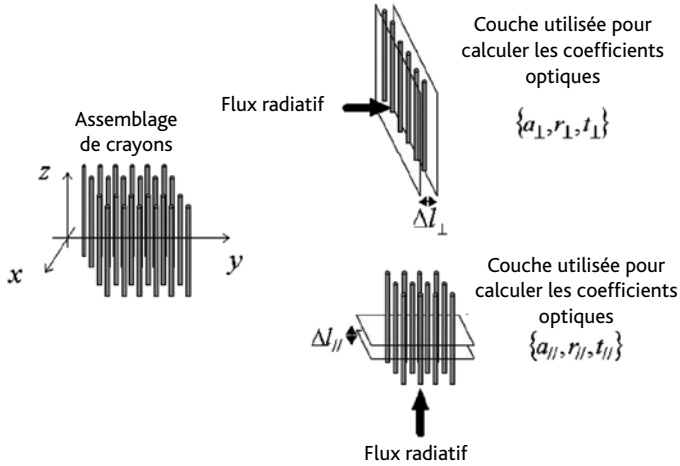


FIG. 5 : Système d'axes de référence

Pour un arrangement de cylindres, dans un repère correspondant aux axes principaux du système (voir la Fig. 5), le tenseur de conductivité radiative devient diagonal.

On peut l'écrire :

$$\mathbf{K}_r = \begin{pmatrix} K_{r\perp} & 0 & 0 \\ 0 & K_{r\perp} & 0 \\ 0 & 0 & K_{r\parallel} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Où  $K_{r\perp}$  et  $K_{r\parallel}$  sont les conductivités radiatives dans les directions perpendiculaire et parallèle à l'arrangement des cylindres.

Lorsque le fluide est supposé transparent, ces éléments du tenseur prennent la forme suivante :

$$K_{r\perp} = 4 \left[ \frac{2 - (\hat{a}_{\perp} + 2\hat{r}_{\perp})}{\hat{a}_{\perp} + 2\hat{r}_{\perp}} \right] \sigma T^3 \Delta l_{\perp} \quad (4)$$

$$K_{r\parallel} = 4 \left[ \frac{2 - (\hat{a}_{\parallel} + 2\hat{r}_{\parallel})}{\hat{a}_{\parallel} + 2\hat{r}_{\parallel}} \right] \sigma T^3 \Delta l_{\parallel} \quad (5)$$

Où  $\hat{a}$  et  $\hat{r}$  sont les coefficients d'absorption et de réflexion du milieu prenant en compte l'effet des variations de température le long de la surface du solide. Ils vérifient la relation :  $\hat{a} + \hat{r} + \hat{t} = 1$ .

Ces coefficients peuvent être calculés à partir des coefficients d'absorption et de réflexion isothermes et s'expriment de la façon suivante :

$$\hat{\alpha} = \varepsilon_s n_s(p) C_a \quad (6)$$

$$\hat{r} = \varepsilon_s n_s(p) C_r \quad (7)$$

Où  $C_a$  et  $C_r$  sont des facteurs correctifs qui prennent en compte la présence des particules voisines. Ils dépendent de la forme des particules (cylindres ou sphères) et de la géométrie de l'arrangement [les détails sont donnés dans Rubiolo (2000) et Rubiolo & Gatt (2002)].

$n_s(p)$  est un facteur géométrique représentant le volume effectivement occupé par une particule dans la cellule représentative.

Dans le cas des cylindres :

$$n_s(p) = \sqrt{\frac{4(1-p)}{\pi}} \quad (8)$$

Dans le cas des sphères :

$$n_s(p) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \frac{2\sqrt{3}(1-p)}{\pi} \right]^{2/3} \quad (9)$$

### 2.2.3 La conductivité équivalente

Une fois estimée la conductivité radiative du milieu, on peut calculer la conductivité équivalente (ou effective) en considérant que les transferts thermiques sont complètement caractérisés par les tenseurs de conductivités radiative et thermique :  $\mathbf{K}_r$  et  $\mathbf{K}_t$ . La conductivité équivalente est définie comme :

$$\mathbf{K}_e = F(\mathbf{K}_t, \mathbf{K}_r) \quad (10)$$

Dans notre modèle, la fonction définissant la conductivité équivalente est obtenue par une homogénéisation du milieu à l'aide d'une analogie électrique. Cette méthode est assez classique et requiert une représentation géométrique du milieu ainsi qu'une identification des différents modes de transfert de chaleur dans le système.

La Fig. 6 représente une couche du milieu poreux sur laquelle on estime la conductivité équivalente en considérant les différentes résistances thermiques associées aux modes de transfert suivants :

- rayonnement traversant la couche sans être absorbé ( $R_{rad1}$ ),
- mode couplé conduction et rayonnement,
- rayonnement absorbé et émis par la phase solide ( $R_{rad2}$ ),
- conduction entre les phases fluide et solide ( $R_s$ ),
- conduction au niveau des contacts solides couplée au rayonnement et à la conduction dans le fluide ( $R_{contact}$ ),
- conduction dans le solide ( $R_s$ ) et dans le fluide ( $R_f$ ).

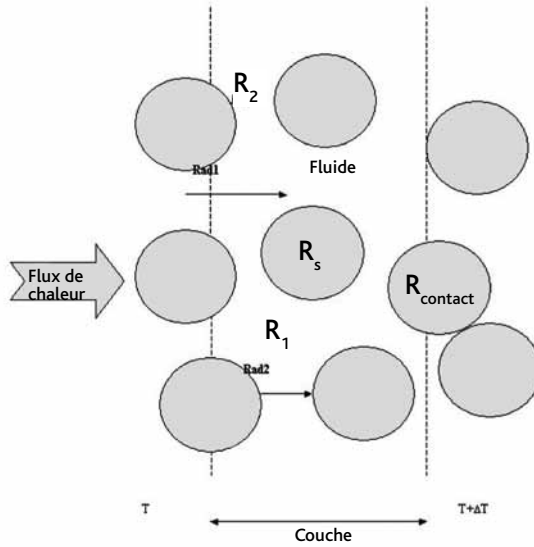


FIG. 6 : Transferts à travers une couche de particules

L'analogie électrique, dans la direction perpendiculaire, conduit à l'expression suivante pour la conductivité équivalente :

$$K_{e\perp} = k_f + Kr_{0\perp} + \frac{1}{R_S + \frac{1}{\frac{Kr_{\perp} - Kr_{0\perp}}{1 - R_S (Kr_{\perp} - Kr_{0\perp})} + \frac{Kt_{\perp} - k_f}{1 - R_S (Kt_{\perp} - k_f)}}} \quad (11)$$

Dans le cas des cylindres, pour la direction parallèle à l'axe, le schéma est beaucoup plus simple et l'on suppose que le rayonnement ( $K_{r\parallel}$ ) et la conduction ( $K_{t\parallel}$ ) s'effectuent en parallèle. La conductivité qui en résulte est :

$$K_{e\parallel} = K_{t\parallel} + K_{r\parallel} \quad (12)$$

Dans l'expression (11),  $k_f$  représente la conductivité du fluide,  $R_S$  la résistance thermique du solide (cylindre ou sphère),  $Kr_{\perp}$  est la conductivité radiative dans la direction perpendiculaire et  $Kr_{0\perp}$  la limite de  $Kr_{\perp}$  quand la conductivité du solide tend vers zéro. L'expression de  $R_S$  dépend des coefficients d'absorption et de réflexion de la phase solide ainsi que de sa conductivité :

$$R_S = \frac{\epsilon_s dr^2}{k_s [2(r_{i0} - r_i) - a_i] \Delta l_i} \quad (13)$$

$r_i$  et  $a_i$  sont les coefficients de réflexion et d'absorption dans la direction  $i$ ,  $d$  est le diamètre des particules,  $\epsilon_s$  l'émissivité du solide et  $k_s$  sa conductivité.

L'expression (11) est très générale et peut être appliquée à n'importe quelle géométrie sans restriction. Les caractéristiques géométriques du milieu (cylindres ou sphères) et l'anisotropie sont prises en compte dans la détermination de  $Kt$  and  $Kr$ .

**Remarque :** Les scénarios d'accident peuvent se dérouler à haute pression et l'approximation d'un fluide transparent n'est pas valable. Dans ces conditions, la vapeur contribue au bilan de flux radiatif en termes d'émission et d'absorption. Il faut alors apporter une correction à la conductivité radiative. Dans le modèle présenté, cet effet peut être facilement pris en compte, ce qui a été fait dans Rubiolo & Gatt (2002). Cette étude a montré que la présence de vapeur peut réduire de 10 à 20 % le flux radiatif à travers le cœur.

## 2.3 Validation et applications

Pour la validation du modèle, on s'est appuyé sur quelques expériences disponibles. Dans le cas des crayons, il existe une seule expérience, réalisée par Cox (1976). Dans le cas des sphères, il existe une expérience dédiée à l'étude des transferts purement radiatifs réalisée par Kasperek (les résultats figurent dans une présentation de Vortmeyer (1978)). Dans les deux cas, le modèle présenté permet de retrouver les résultats expérimentaux avec une précision très satisfaisante. La validation sur les essais de Cox figure dans l'article présenté en annexe de ce chapitre (Zabiégo *et al.* 2006). La validation sur les essais de Kasperek se trouve dans Rubiolo (2000). En ce qui concerne les lits de débris, plusieurs expériences ont été réalisées à très haute température, jusqu'à la fusion des débris. Cela permet de valider le modèle de conductivité équivalente sur des essais transitoires balayant un large intervalle de température. On peut citer en particulier les essais ACRR-MP1 et MP2 (Gasser *et al.* (1997)) ainsi que l'essai RASPLAV AW-200-4 (Asmolov *et al.* (2000)). Dans les trois cas, le comportement thermique du lit de débris est bien prédit par le modèle, ce qui a été montré dans (Ederli (2001), Le Roy & Zabiégo (2001), Fichot *et al.* (2000)). Récemment, il a même été montré que l'approche conductive pour modéliser les transferts radiatifs dans un assemblage de crayons s'avère plus appropriée que l'approche classique de la méthode de Hottel (calcul des facteurs de vue élémentaires entre les crayons (Hottel & Sarofim, 1967)). Ces résultats concernent des essais de dégradation de crayons combustibles allant jusqu'à la fusion (Repetto & Ederli, 2005). L'intérêt de cette approche a également été démontré sur une application à un réacteur complet. Ces résultats figurent dans l'article présenté en annexe de ce chapitre (Zabiégo *et al.*, 2006).

## 2.4 Conclusion

Le modèle développé a pu être validé de manière très satisfaisante sur les principaux essais disponibles dans la littérature. Il présente certains avantages sur d'autres modèles de rayonnement : d'une part, il permet de suivre de manière continue l'évolution de la géométrie du milieu et, d'autre part, il est facile à résoudre numériquement en 2D ou même en 3D. Il faut toutefois rappeler qu'il est limité aux milieux optiquement épais, c'est-à-dire lorsque la taille des pores est très petite devant la taille du domaine d'étude.

Le thème du rayonnement dans un cœur dégradé fait l'objet d'une thèse (Elie Chalopin) dans notre laboratoire. Cette thèse est encadrée par Magali Zabiégo, en collaboration avec le laboratoire EM2C de l'École Centrale de Paris (Estelle Iacona et Jean Taine). L'objectif est d'affiner la description locale des flux radiatifs (simulations Monte-Carlo sur des géométries caractéristiques de cœur dégradé) et de définir le formalisme théorique permettant d'effectuer une homogénéisation des transferts radiatifs à plus grande échelle (sans passer par l'analogie électrique).





## 3 COULÉE DES MATÉRIAUX FONDUS

---

### ***3.1 Introduction***

Comme on l'a vu dans l'introduction de ce rapport, l'emballement de la réaction d'oxydation et la coulée de matériaux fondus caractérisent un accident grave, par opposition à l'accident de dimensionnement. Il en résulte une transformation significative de la géométrie des canaux fluides, ce qui affecte les échanges de chaleur et la possibilité de refroidir le cœur. De plus, la progression des matériaux fondus vers le fond de la cuve est une menace pour l'intégrité de cette dernière. Il est donc nécessaire d'essayer de prévoir cette progression avec une précision suffisante.

J'ai débuté sur ce thème par la reprise des travaux de thèse de Nadine Garnier qui avait proposé un modèle d'écoulement à travers des lits de débris (Garnier, 1994). J'ai ensuite étudié la possibilité d'étendre ce modèle aux arrangements cylindriques de crayons, puis à d'autres configurations existant dans le cœur (grilles, plaques percées, etc.). Ce travail a ensuite été repris par Mercedes Ortega Bernardo, dans le cadre d'une collaboration avec l'Universidad Politécnica de Madrid (Professeur A. Alonso). L'un des objectifs de cette collaboration était de proposer à l'étudiante un projet de thèse initié pendant deux années en France à l'IRSN et terminé à Madrid.

Pour des raisons financières et contractuelles, la thèse n'a pas pu aboutir. Je présenterai ici les principaux résultats obtenus pendant ce travail. Je signale également la participation importante de Bertrand Lefèvre à cette étude, notamment en ce qui concerne la résolution numérique du modèle et son implantation dans le code ICARE/CATHARE.

### 3.2 Nomenclature

$g$	accélération gravitationnelle, $m.s^{-2}$
$K$	perméabilité, $m^2$
$\dot{m}$	taux de production massique, $kg.m^{-3}.s^{-1}$
$p$	pression, $Pa$
$R$	rayon du crayon, $m$
$T$	température, $K$
$u$	vitesse, $m.s^{-1}$

#### Symboles grecs

$\delta$	épaisseur du film liquide, $m$
$\varepsilon_x$	fraction volumique de la phase $x$
$\mu$	viscosité, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
$\eta$	passabilité, $m$
$\rho$	densité, $kg.m^{-3}$

#### Indices et exposants

$g, l, s$	phases gaz, liquide, solide
$r, z$	radial, axial

### 3.3 Modélisation

Les modèles existant dans le contexte de la sûreté nucléaire étaient principalement dédiés à la représentation de coulées axiales de matériaux fondus le long des crayons supposés cylindriques (voir par exemple Gonzalez *et al.*, 1997). Il s'agissait donc de modèles 1D résolvant uniquement la conservation de la masse et de l'énergie en supposant la vitesse de coulée connue et assez élevée (de l'ordre de 0,5 m/s) . Cette hypothèse très simplificatrice était justifiée par le fait que les matériaux sont stoppés lorsqu'ils arrivent dans une zone froide où ils solidifient et que le temps de coulée est court. Or, on a pu constater expérimentalement (Veshchunov & Palagin, 1997) que les coulées les plus importantes se font à des vitesses de l'ordre du mm/s et qu'il est donc important de calculer correctement cette vitesse en fonction des caractéristiques du mélange liquide et du milieu qu'il traverse. De plus, lorsque les matériaux s'accumulent, les films liquides recouvrant des crayons voisins se touchent et des mouvements radiaux deviennent possibles. L'approche 1D n'est alors plus du tout justifiée. Il s'avérait donc nécessaire de développer un modèle 2D (extensible à 3D) capable de prendre en compte à la fois les variations de géométrie du cœur et

les variations de viscosité du liquide (en fonction de sa température). Une recherche bibliographique sur le sujet a révélé un nombre très limité de modèles adaptés. Parmi les plus intéressants, on peut citer l'approche de Veshchunov & Palagin (1997) qui met l'accent sur le calcul des interactions chimiques modifiant la viscosité du mélange (le modèle reste 1D) et celle de Schmidt (1993) qui introduit une notion de perméabilité anisotrope pour caractériser les frottements le long des crayons et estime la vitesse à partir d'une équation de Darcy. Pour les situations faisant intervenir des particules (lits de débris), la plupart des modèles existants sont 2D et sont également basés sur la loi de Darcy pour estimer la vitesse de coulée à travers les particules (Dosanjh, 1989, Schmidt & Gasser, 1997, Mayr *et al.*, 1998). Cela nous a conduits à choisir une approche similaire.

Pour simplifier, on se contente de calculer le mouvement des matériaux fondus, sans considérer l'influence de la vapeur s'écoulant aussi dans les pores. Ceci peut se justifier par la très grande différence de densité entre les deux fluides. Cela correspond aux mêmes hypothèses que lorsque l'on utilise l'équation classique de Richards pour un écoulement liquide dans un milieu non saturé. Compte tenu de la taille moyenne des porosités (de l'ordre du millimètre), la capillarité n'est pas très importante et il s'agit plutôt d'écoulements gravitaires. Néanmoins, pour rester général et considérer l'éventuelle existence de tailles de pores plus petites, la pression capillaire sera incluse dans le modèle. Après la prise de moyenne, la forme générale de l'équation de quantité de mouvement est la suivante :

$$\rho_l \frac{\partial(\langle \vec{u}_l \rangle / \epsilon_l)}{\partial t} = \nabla \langle p_l \rangle - \rho_l \vec{g} - \frac{\mu_l}{K K_{rl}} \langle \vec{u}_l \rangle - \frac{\rho_l}{\eta \eta_{rl}} \langle \vec{u}_l \rangle |\langle \vec{u}_l \rangle| \quad (14)$$

Parfois appelé « loi de Darcy généralisée », ce type d'équation résulte plutôt d'une approche empirique. On peut néanmoins aboutir à cette formulation de manière théorique (voir par exemple Whitaker, 1986b et 1986a). Deux coefficients caractérisent le milieu : la perméabilité  $K$  et la passabilité  $\eta$ . Cette dernière quantifie les effets inertiels sur la perte de charge globale. Ces effets deviennent importants lorsque le nombre de Reynolds local est grand. Pour le cas des arrangements de cylindres, la forme de ces deux coefficients est donnée dans l'annexe de ce chapitre (Fichot *et al.*, 1999). Pour le cas des arrangements de sphères, de très nombreuses corrélations classiques existent. Comme on traite un milieu partiellement saturé, deux coefficients correctifs sont également à déterminer :  $K_{rl}^z$  et  $\eta_{rl}^z$ . Pour le cas des arrangements de cylindres, on trouvera leur forme en annexe de ce chapitre. Pour les sphères, de nombreuses corrélations ont été proposées et l'on peut se reporter à Kaviany (1995), où est faite une synthèse sur le sujet.

L'équation de quantité de mouvement est, bien sûr, complétée par l'équation de conservation de la masse :

$$\rho_l \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_l + \rho_l \nabla \cdot (\epsilon_l \langle \vec{u}_l \rangle^l) = \dot{m}_l \quad (15)$$

où  $\dot{m}_l$  est le taux de changement de phase (solide/liquide) puisque les matériaux fondent dans certaines parties du cœur et solidifient après relocalisation dans d'autres parties plus froides.

À partir de ce système d'équations, il est possible de calculer l'écoulement des matériaux fondus dans la plupart des régions du cœur. Le modèle prend en compte l'existence d'une saturation résiduelle en deçà de laquelle le liquide ne s'écoule pas. Il faut noter une discontinuité importante de la perméabilité entre les deux configurations types : pour les cylindres, avec les dimensions standards des arrangements de crayons combustibles, la perméabilité axiale vaut environ  $4 \cdot 10^{-6} \text{m}^2$  alors que pour des sphères de 2 mm arrangées de manière compacte, la perméabilité est de l'ordre de  $4 \cdot 10^{-7} \text{m}^2$  (avec la relation de Kozeny-Carman). Il reste donc à améliorer la description des configurations intermédiaires pour aboutir à une formulation continue. Cela n'a pas encore été fait par manque de temps. La résolution numérique de ce modèle consiste à substituer l'expression de la vitesse dans l'équation de conservation de la masse pour aboutir à une équation du second ordre dépendant uniquement de la variable  $S_j$  (saturation). Cette résolution est faite de manière itérative à cause des fortes non-linéarités des fonctions  $K_{r,l}$  et  $\eta_{r,l}$ .

### 3.4 Validation

Les premières applications de ce modèle à des expériences de dégradation (Phebus FPT1) ont été très satisfaisantes puisqu'elles ont permis de retrouver la répartition finale des matériaux fondus le long des crayons. Ces résultats sont présentés dans un rapport (Ortega-Bernardo & Fichot, 2000), en annexe de ce chapitre. Il s'agit cependant d'une validation très qualitative où interviennent également d'autres modèles, en particulier pour les transferts thermiques qui jouent eux aussi un rôle important.

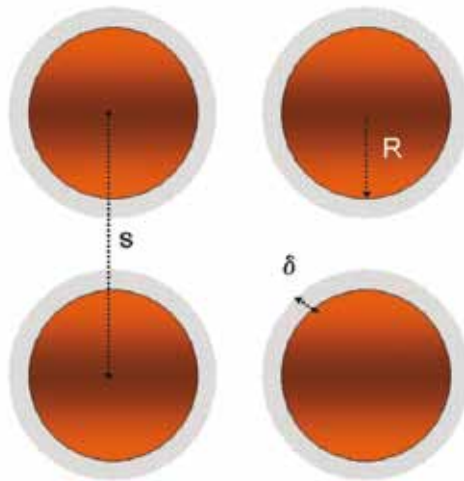


FIG. 7: Schéma de l'arrangement des crayons et du film liquide

Pour faire une validation plus qualitative, on s'est intéressé à des écoulements de liquide sur des cylindres (sans changement de phase), correspondant au schéma de la Fig. 7. Pour ce type d'écoulement, on dispose des résultats expérimentaux de Mudawar & Houpt (1993 a, b). Un film liquide est formé par injection d'un débit constant en haut du cylindre. Le fluide est un mélange de polypropylène glycol et d'eau. Pour faire varier la viscosité, deux mélanges différents ont été étudiés : 90 % et 70 % de glycol. Chaque mesure expérimentale est donc caractérisée par un nombre

de Reynolds, défini par les auteurs de la façon suivante :

$$Re = \frac{2\dot{m}}{\mu_l \pi R} \quad (16)$$

Il est possible de reformuler en faisant apparaître l'épaisseur du film  $\delta$  et sa vitesse moyenne :

$$Re = \frac{2\rho_l \langle u_l \rangle}{\mu_l} \left( 2\delta + \frac{\delta^2}{R} \right) \quad (17)$$

De plus, le modèle donne l'expression de la vitesse moyenne en fonction de l'épaisseur :

$$\langle u_z \rangle^l = \frac{\rho_l g}{2\mu_l} \left[ \frac{R^2}{2} - \frac{(R+\delta)^2 + R^2}{4} + \frac{(R+\delta)^4}{(R+\delta)^2 - R^2} \ln \left( \frac{R+\delta}{R} \right) - \frac{(R+\delta)^2}{2} \right] \quad (18)$$

On peut alors comparer les vitesses (Fig. 9) et les épaisseurs (Fig. 8) mesurées et calculées, en fonction du nombre de Reynolds. Compte tenu de la relative simplicité du modèle, l'accord est très satisfaisant puisque l'écart relatif maximal est de 13 % sur l'épaisseur du film et de 27 % sur la vitesse.

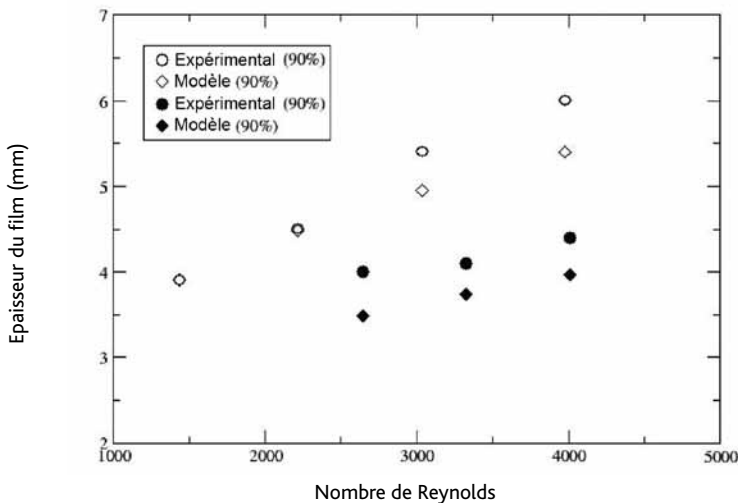


FIG. 8 : Épaisseur du film liquide en fonction du nombre de Reynolds

### 3.5 Généralisation du modèle

Le modèle décrit précédemment a été généralisé pour représenter également l'écoulement à travers des lits de débris. Cela consiste principalement à modifier les propriétés effectives (perméabilités intrinsèque et relative, passabilités) au cas des particules sphériques. Grâce à cette généralisation, il est possible de calculer la progression du corium fondu à travers le cœur du réacteur pendant toute la phase de dégradation, y compris dans le fond de la cuve.

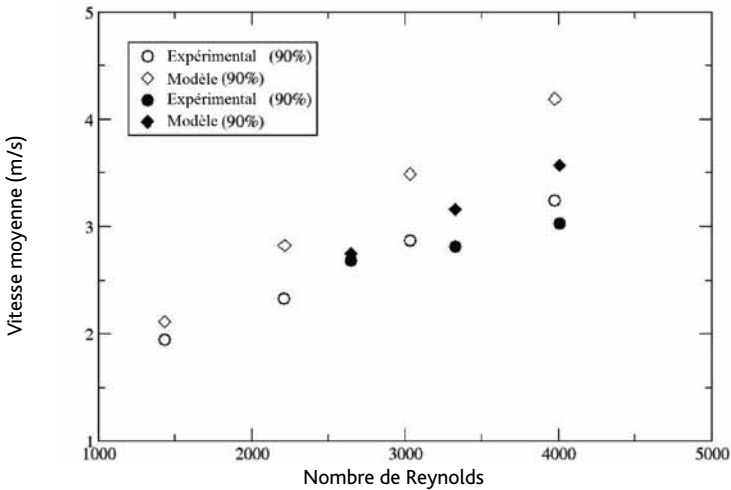


FIG. 9 : Vitesse moyenne du film liquide en fonction du nombre de Reynolds

L'une des principales limitations est l'absence de calcul des transferts d'espèces pendant la coulée (cet aspect est abordé au chapitre suivant, pour les bains fondus). À l'heure actuelle, ce modèle est implanté dans le code ICARE/CATHARE et il est utilisé pour la plupart des calculs de séquences accidentelles. Il permet en particulier de calculer l'accumulation des matériaux fondus au dessus des zones plus froides où se forment des croûtes solides. Ce phénomène a été reproduit expérimentalement dans l'expérience RASPLAV-AW-200 (Asmolov *et al.* (2000)) où un lit de débris (de faible porosité) a été fondu partiellement. La distribution des matériaux lors de la phase stationnaire finale est représentée sur la Fig. 10. On distingue clairement le bain fondu au centre, l'existence d'une zone de transition à la frontière du bain correspondant à une croûte. Les résultats du calcul de la Fig. 11 montrent un très bon accord sur la position du bain fondu et sur la progression des matériaux.

### 3.6 Conclusion

Le modèle développé pour calculer l'écoulement des matériaux fondus à travers le cœur dégradé présente certains avantages du point de vue de la résolution numérique : il est 2D et directement adaptable à 3D et il ne comporte qu'un seul système d'équations à résoudre, quelle que soit la géométrie du milieu. À l'heure actuelle, ce thème ne fait plus l'objet d'études dans notre laboratoire. Il reste néanmoins une direction de recherche évidente, mais difficile, sur ce thème. Il s'agit du couplage de ce modèle d'écoulement avec un modèle de dissolution/solidification de mélanges tel que celui présenté au chapitre suivant. En effet, la dissolution de la matrice poreuse et la solidification du mélange liquide ont un impact important sur la vitesse d'écoulement. Cependant, un tel couplage semble délicat à mettre au point sur le plan numérique. On verra, au prochain chapitre, le développement d'un modèle de solidification de mélange pour un écoulement incompressible. Cela implique, du point de vue numérique, une procédure itérative (et coûteuse en temps de calcul) entre la résolution du champ de vitesse et la résolution des champs de température et de concentration. Le même type de procédure serait à développer pour le cas d'un écoulement insaturé, tel qu'il a été décrit dans ce chapitre.

Examen après essai RASPLAV-AW-200-4 :  
schéma du lingot et des frontières du corium fondu

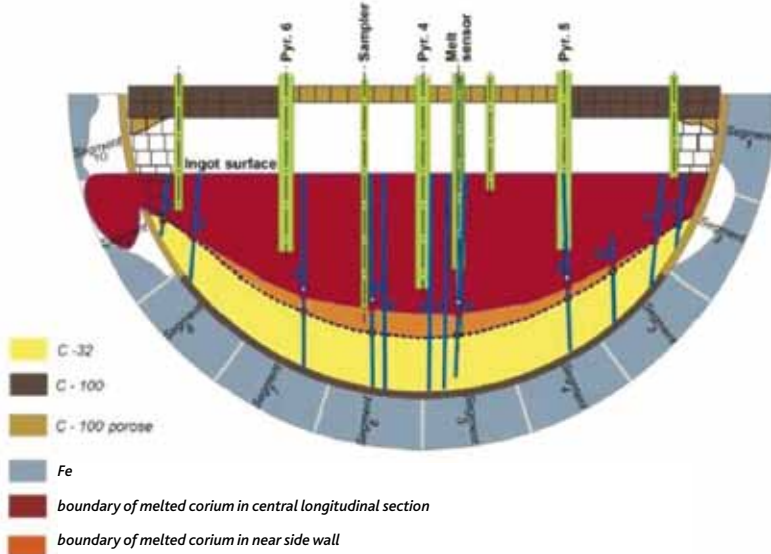


FIG. 10 : RASPLAV-AW-200-4 : distribution des matériaux obtenue expérimentalement

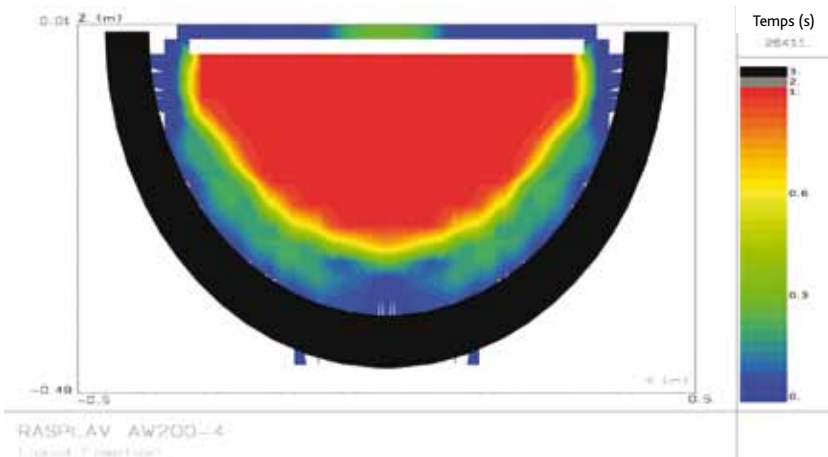


FIG. 11 : RASPLAV-AW-200-4 : distribution calculée des matériaux  
(champ de fraction volumique)





## 4 SOLIDIFICATION DES MÉLANGES

---

### *4.1 Introduction*

Comme on l'a vu dans l'introduction de ce rapport, le corium est un mélange multi-constituants (U, Zr, Fe, O sont les principaux éléments présents) et chauffé en volume par les produits de fission qui libèrent de la puissance en se désintégrant. Maîtriser un accident grave de réacteur revient à être capable de refroidir et de solidifier ce corium pour en stopper la progression, si possible à l'intérieur de la cuve ou, au pire, à l'intérieur de l'enceinte de confinement.

Ce problème a donc suscité l'intérêt des chercheurs et des analystes de sûreté depuis la fin des années 70, et reste un sujet d'actualité. Les processus qui conduisent à la formation d'un bain fondu sont assez complexes et seulement partiellement compris à l'heure actuelle et nous avons déjà abordé une partie de ces phénomènes (transferts de chaleur et coulée des matériaux) dans les deux chapitres précédents. Le problème des bains fondus s'avère aussi difficile à étudier expérimentalement qu'à modéliser. Les difficultés proviennent en particulier de la taille importante du bain (régime fortement turbulent qui ne peut pas être atteint à échelle réduite), des changements

de phase (solidification ou fusion, séparation entre liquides non miscibles) et des transferts de masse engendrés par l'existence de déséquilibres thermo-chimiques au sein du bain.

Ces lacunes dans la compréhension des phénomènes conduisent à de nombreuses incertitudes sur l'évaluation de la sûreté des nouveaux concepts de réacteurs pour lesquels on cherche à garantir la rétention du corium à l'intérieur de la cuve.

On sait néanmoins que la solidification d'un mélange s'accompagne de transferts d'espèces entre les phases solide et liquide à cause de la différence de composition des phases en équilibre. Par conséquent, la convection naturelle s'établit en raison de variations de densité qui ont deux origines : l'une est thermique, l'autre est solutale. De plus, à cause de possibles instabilités thermo-solutales, la phase solide peut prendre des formes complexes (dendrites ou cristaux) qui ont une influence sur l'écoulement.

Dans la suite de ce chapitre, je détaillerai plus particulièrement les transferts de masse et de chaleur dans le bain. Il s'agit d'un thème que j'ai abordé en 1997 avec la thèse de Patrick Bousquet-Mélou. Ce travail s'est effectué en collaboration avec Dominique Gobin et Benoît Goyeau du laboratoire FAST (Paris 6) ainsi que Michel Quintard de l'IMFT (Toulouse). Lors de cette thèse, nous nous sommes restreints, par souci de simplification, à un mélange binaire et à des écoulements laminaires (à faible nombre de Rayleigh). Nous avons développé un modèle de solidification prenant en compte la présence de dendrites croissant à partir d'une paroi froide. Ce modèle sera décrit dans la deuxième partie de ce chapitre.

À la suite de ce travail, la thèse de Patrick Roux a permis de développer un modèle prenant en compte la solidification équiaxe, c'est-à-dire à partir de cristaux susceptibles de germer au sein même de l'écoulement. Ce modèle sera décrit dans la troisième partie de ce chapitre.

Lors de cette thèse, une modélisation locale a également été proposée dans le but de simuler la croissance de cristaux ou de dendrites pour pouvoir obtenir certaines informations locales (perméabilité du réseau dendritique, ordre de grandeur du sous refroidissement dans le liquide, etc.). Cette modélisation s'appuie sur une méthode à interface diffuse (Phase Field). Elle sera décrite brièvement dans la quatrième partie.

## 4.2 Nomenclature

$\langle v_l \rangle^l$	vitesse du liquide ( $m \cdot s^{-1}$ )
$\rho_l$	densité liquide ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$\langle C_l \rangle^l$	concentration dans le liquide
$C_l^*$	concentration d'équilibre dans la phase liquide
$\varepsilon_l$	fraction volumique de liquide
$\mathbf{D}_l$	tenseur de diffusion effective ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
$h_{m_l}$	coefficient d'échange interfacial dans la phase liquide ( $s^{-1}$ )
$\rho_s$	densité solide ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$\langle C_s \rangle^s$	concentration dans le solide

$C_s^*$	concentration d'équilibre dans la phase solide
$\varepsilon_s$	fraction volumique de solide
$D_s$	coefficient de diffusion dans le solide ( $m^2.s^{-1}$ )
$h_{m_s}$	coefficient d'échange interfacial dans la phase solide ( $s^{-1}$ )
$m_s$	pente de la droite de solidus ( $K$ )
$m_l$	pente de la droite de liquidus ( $K$ )
$k$	coefficient de partition = $m_s/m_l$
$T$	Température ( $K$ )

### 4.3 Modélisation de la solidification colonnaire

La solidification d'un mélange multi-constituants engendre très souvent des instabilités conduisant à la formation de dendrites à l'interface solide/liquide (Kurz et Fisher, 1989). Ce sont des structures complexes présentant plusieurs niveaux de ramifications. Elles sont attachées à la paroi froide et orientées selon la direction du gradient de température moyen. Leur taille peut atteindre quelques centimètres. La distance entre deux dendrites voisines est de l'ordre de la centaine de microns. Une image de dendrite est présentée sur la Fig. 12. Ce régime de solidification est qualifié de colonnaire.

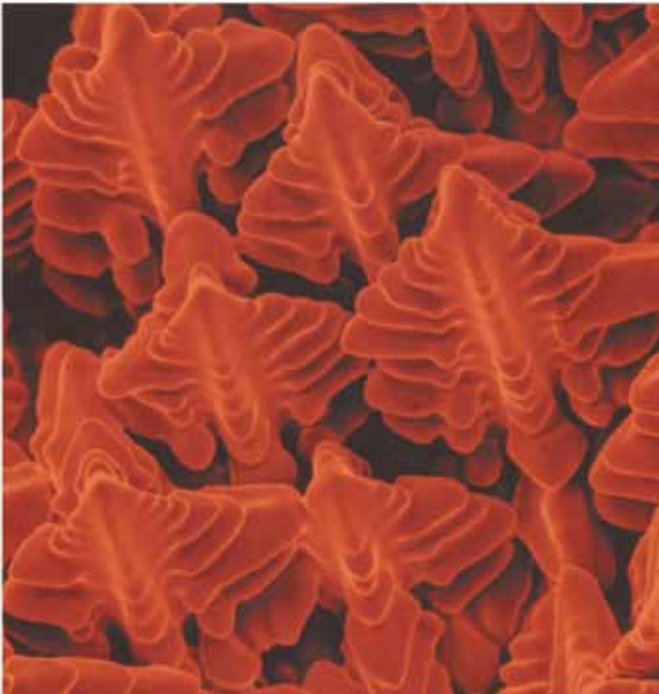


FIG. 12 : Photographie de dendrites d'un alliage à base de Nickel (David et al., 2003)

La présence de ces dendrites a un impact sur l'écoulement et la progression du front de solidification. En effet, la structure très ramifiée des dendrites ralentit considérablement l'écoulement au voisinage de l'interface solide-liquide. De plus, les transferts d'espèces sont également influencés par la structure des dendrites qui ont tendance à retenir du liquide riche en soluté dont la composition est proche de la composition d'équilibre avec le solide.

Pour simplifier, on choisit de s'intéresser à un mélange binaire. Un diagramme de phase, tel que schématisé sur la Fig. 13, permet de représenter les compositions d'équilibre des phases solide et liquide en fonction de la température. Les deux courbes ainsi définies prennent les noms de *solidus* et *liquidus*.

Pour modéliser la solidification d'un mélange binaire, il est nécessaire de traiter de manière couplée les transferts d'espèces, de quantité de mouvement et d'énergie. La grande différence d'échelles entre la distance interdendritique et la taille du bain de corium rend impossible la résolution (numérique) des équations de conservation dans chacune des phases tout en tenant compte de la structure complexe de l'interface entre les phases. Il est nécessaire d'effectuer un changement d'échelle.

Il faut noter ici que nous avons volontairement choisi une modélisation assez détaillée qui n'est pas encore directement utilisable dans un code de simulation d'accident grave comme ICARE/CATHARE (les temps de calcul sont trop élevés). Actuellement, il existe des approches plus simples (multi-domaines) pour modéliser les bains de corium et les croûtes se formant lors de la solidification. Les premiers modèles proposés (Suh & Henry, 1996) reposent sur des simplifications excessives du problème, négligeant en particulier la macro-ségrégation et le caractère diphasique de l'écoulement. Néanmoins, ils restent utilisés dans plusieurs pays pour certaines études de sûreté. Récemment, des modèles alternatifs plus détaillés, prenant en compte la macro-ségrégation, ont été proposés, en particulier par Seiler & Froment (2000). Ces modèles traitent essentiellement les bains de corium en régime quasi-stationnaire. Ce niveau de modélisation est suffisant lorsque l'on cherche, par exemple, à évaluer la probabilité de retenir le corium dans la cuve. Si l'on cherche à prévoir l'évolution transitoire du corium jusqu'à une rupture éventuelle de la cuve, il faut une modélisation plus précise. Ainsi, l'approche que nous avons choisie est plus générale et permet de traiter les écoulements instationnaires avec changement de phase.

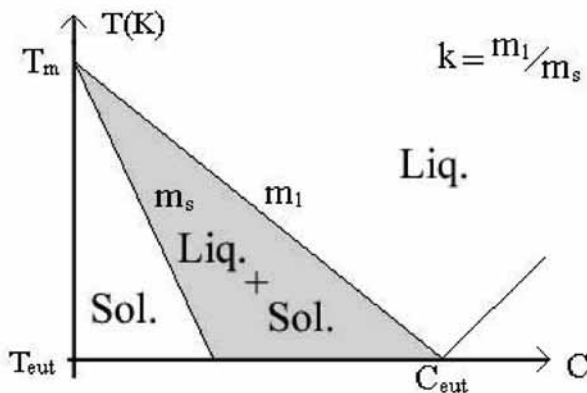


FIG. 13 : Diagramme de phase typique pour un mélange binaire

## 4.4 Les modèles macroscopiques actuels

Dans les premiers modèles macroscopiques, qualifiés de multi-domaines, les échanges étaient décrits dans les régions solide, liquide et diphasique par trois ensembles distincts d'équations (Szekely & Jassal, 1978, Ridder et al., 1981, Worster, 1991). Toutefois, à cause des difficultés algorithmiques relatives au couplage des équations sur les frontières délimitant les trois domaines, ces modèles n'étaient pas adaptés à la prédiction d'interfaces irrégulières (Prescott *et al.*, 1991).

Ceci a motivé le développement de modèles continus, qui décrivent les échanges à l'aide d'un unique système d'équations. Les variables représentent ainsi des quantités physiques moyennes (vitesse, pression, température, fractions massiques d'espèces) définies dans des volumes élémentaires représentatifs (V.E.R.) du mélange. Ainsi, une telle approche suppose a priori que la solidification est dendritique. Ces modèles continus ont été établis à l'aide de deux approches différentes.

Dans la théorie des mélanges, un milieu monophasique équivalent au système est systématiquement considéré : les équations de phase sont sommées afin d'obtenir un ensemble d'équations de mélange. Les interactions entre phases sont alors décrites par des lois semi-empiriques. Bennon & Incropera (1987) ont ainsi établi l'un des premiers modèles continus décrivant les transferts de masse, de quantité de mouvement et d'énergie, mis en jeu dans la solidification des mélanges binaires.

Certains modèles continus ont également été établis par la méthode de prise de moyenne volumique (Beckermann & Viskanta, 1988, 1993, Ganesan & Poirier, 1990, Ni & Beckermann, 1991). À l'aide de théorèmes de prise de moyenne (Whitaker, 1969, Marle, 1982), les équations microscopiques de transport sont intégrées dans chaque phase, dans des volumes élémentaires représentatifs d'un mélange. Les équations macroscopiques, ainsi obtenues, contiennent des intégrales de surface représentant les échanges et les interactions entre phases, dus à la présence de l'interface solide-liquide. Cependant, dans les modèles de solidification, ces termes ne sont pas calculés de manière explicite, mais ils sont modélisés par des lois constitutives (Ni & Beckermann, 1991).

## 4.5 Modélisation adoptée

Dans notre cas, le modèle est établi par la prise de moyenne volumique des équations de conservation locales. Il présente la particularité de définir aussi un problème de fermeture pour chacune des propriétés macroscopiques effectives qui apparaissent dans les équations moyennes (perméabilité, tenseur de diffusion-dispersion, coefficients d'échanges massiques). Cet aspect, assez nouveau dans ce type de modélisation, permet de prendre en compte la géométrie de la zone diphasique (tortuosité) et les phénomènes locaux (dispersion, transferts d'espèces) dans l'expression des équations moyennes. Le modèle ne fait pas l'hypothèse d'équilibre chimique entre les phases. L'équilibre est supposé exister uniquement à l'interface et des coefficients d'échange massiques traduisent les transferts d'espèces par diffusion dans chacune des phases. Ces échanges pilotent le taux de changement de phase que l'on obtient par intégration volumique de la relation de saut pour les espèces. On peut noter que cette modélisation permet, moyennant un ajustement de ces coefficients d'échange massiques, de choisir entre un équilibre chimique macroscopique global (règle du levier), un équilibre macroscopique dans le liquide (Scheil) ou seulement un équilibre local, ce qui est le cas le plus général.

Ci-dessous figurent les équations de conservation du soluté dans chacune des phases ainsi que l'équation donnant l'évolution de la fraction solide, où apparaissent explicitement les écarts à l'équilibre thermochimique.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) = \frac{1}{C_\ell^* - C_s^*} \left[ \rho_s h_{m_s}(C_s^* - \langle C_s \rangle^s) + \rho_\ell h_{m_\ell}(C_\ell^* - \langle C_\ell \rangle^\ell) \right] \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \langle C_s \rangle^s) - C_s^* \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) = \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s D_s \nabla \langle C_s \rangle^s) + \rho_s h_{m_s}(C_s^* - \langle C_s \rangle^s) \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_\ell \rho_\ell \langle C_\ell \rangle^\ell) + \nabla \cdot (\varepsilon_\ell \rho_\ell \langle C_\ell \rangle^\ell \langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell) + C_\ell^* \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) = \nabla \cdot (\rho_\ell \mathbf{D}_\ell \cdot \nabla \langle C_\ell \rangle^\ell) + \rho_\ell h_{m_\ell}(C_\ell^* - \langle C_\ell \rangle^\ell) \quad (21)$$

Le modèle est présenté en détails dans le premier article en annexe de ce chapitre (Goyeau *et al.*, 2004), ainsi que dans la thèse de Patrick Bousquet-Mélou (Bousquet-Mélou, 2000). On pourra trouver les détails sur l'établissement de l'équation de quantité de mouvement dans la zone dendritique dans (Bousquet-Mélou *et al.*, 2002a). En ce qui concerne la dispersion active des espèces par les structures dendritiques, on pourra trouver une discussion détaillée dans (Bousquet-Mélou *et al.*, 2002b).

## 4.6 Validation du modèle colonnaire

Un important travail de validation a été fait sur le modèle de solidification colonnaire. L'objectif principal est de vérifier, par des tests sur des mélanges différents, que le modèle traduit bien les principaux phénomènes physiques intervenant lors de la solidification. En particulier, il est important de vérifier qu'il n'est pas nécessaire d'ajuster différemment les paramètres des propriétés effectives pour calculer les différents cas tests. Les cas étudiés sont les suivants :

- un alliage (Sn - 48 % Pb) dans une cavité rectangulaire (Hebditch & Hunt, 1974),
- un alliage (Sn - 95 % Pb) dans une cavité rectangulaire (Hebditch & Hunt, 1974),
- un alliage (Bi - 10 % Sn) dans une cavité rectangulaire (Quillet, 2003),
- un sel ( $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ ) dans une cavité rectangulaire (il ne s'agit pas d'un cas expérimental mais simplement d'un cas test numérique, (Voller *et al.*, 1989),
- un sel ( $\text{NaBF}_4 - 25 \% \text{NaF}$ ) dans une cavité hémicylindrique (essais RASPLAV-SALT, (Surenkov *et al.*, 1998, Asmolov *et al.*, 1998).

Dans tous les cas, les comparaisons avec les grandeurs mesurées, en particulier la répartition finale des espèces (macro-ségrégation), sont satisfaisantes. L'article présenté en annexe (Roux *et al.*, 2005b) permet d'avoir une vue d'ensemble de tous les résultats obtenus sur ces cas tests. Le dernier cas présente la particularité d'avoir une géométrie simulant celle d'un fond de cuve de réacteur, une taille plus grande que les autres cas et une puissance volumique générée dans le bain liquide. Il est donc très intéressant pour envisager une application du modèle à des situations de bain fondu dans une situation accidentelle. On peut voir les résultats de calcul pour le dernier cas (RASPLAV-SALT) sur les Figs. 14 et 15. La prédiction de la macro-ségrégation est très satisfaisante mais la localisation prédite pour la croûte reste à améliorer. En effet, la zone dendritique calculée est trop étendue (diffuse) par rapport à l'expérience où la croûte, bien que poreuse, ne s'étend qu'à quelques millimètres de la paroi.

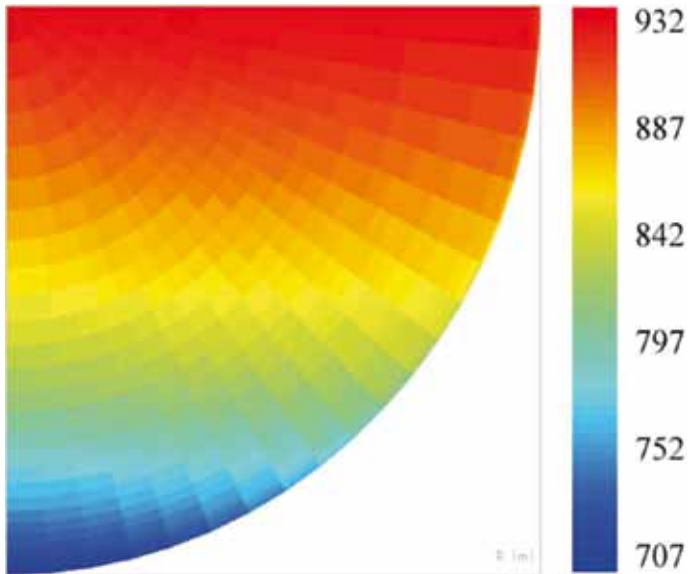


FIG. 14: Rasplav-Salt : champ de température pour le premier régime stationnaire.

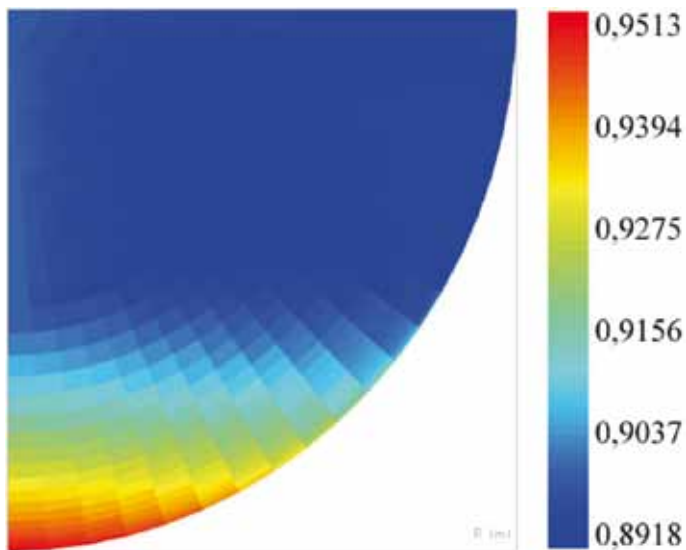


FIG. 15: Rasplav-Salt : champ de concentration pour le premier régime stationnaire.



Un autre objectif de ce travail de validation était d'estimer l'importance relative de certains termes apparaissant dans les équations après la prise de moyenne volumique. Cela concerne en particulier les termes dans lesquels intervient le gradient de porosité et qui traduisent l'influence des hétérogénéités évolutives caractéristiques de la forme des dendrites. En ce qui concerne l'équation de conservation des espèces, l'influence de ces termes a été estimée négligeable, par rapport à celle des autres (diffusion-dispersion, échanges entre les phases). En revanche, pour la quantité de mouvement, ces termes appelés généralement « termes de Brinkman », ont une influence comparable au terme de perméabilité, même si cela n'est vrai que dans une zone très limitée (la pointe des dendrites). Il n'est donc pas possible de justifier l'absence de ces termes dans l'équation moyenne de quantité de mouvement. Néanmoins, les deux termes les plus importants, sur les cas tests étudiés, sont le terme de perméabilité (équation de bilan de quantité de mouvement) et les termes de transfert d'espèces à l'interface (équation de bilan d'espèces). La perméabilité conditionne la macro-ségrégation (distribution des espèces) et les coefficients d'échange massiques caractérisent l'importance du déséquilibre. Tous ces résultats se trouvent dans un article soumis pour publication (Roux *et al.*, 2006).

#### **4.7 Modélisation de la solidification équiaxe**

Dans un bain de corium ou dans un lingot métallique, le refroidissement peut être suffisamment fort pour induire, au sein de la phase liquide (c'est-à-dire en aval des dendrites), un sous refroidissement, lui-même suffisant pour que germent des cristaux équiaxes. Ces cristaux sont mobiles dans la phase liquide et présentent en général une structure ramifiée similaire à celle des dendrites.

Lors de sa thèse, Patrick Roux a développé un modèle de solidification équiaxe. La méthode utilisée est la même que pour le modèle colonnaire. Il s'agit des moyennes volumiques. Ce choix a permis de bénéficier de tout le travail fait sur le modèle colonnaire en ce qui concerne certaines fermetures ainsi que l'estimation des ordres de grandeur des termes permettant de simplifier les équations moyennes. Néanmoins, le modèle équiaxe comporte des équations supplémentaires : une pour le nombre de cristaux par unité de volume et une pour la vitesse des cristaux. On rappelle que, dans le modèle colonnaire, la phase solide est attachée à une paroi et donc immobile. Comme la vitesse des cristaux n'est pas nulle, de nombreux termes supplémentaires faisant intervenir cette vitesse apparaissent dans les équations moyennes. Pour en faire la fermeture, le formalisme utilisé pour le modèle colonnaire n'est pas adapté. Il est préférable d'avoir une approche statistique qui permet de caractériser la distribution de vitesses des cristaux. Cela requiert d'introduire une équation supplémentaire pour quantifier l'énergie cinétique d'agitation des cristaux. Une fois cette grandeur connue, il est possible de proposer une fermeture pour les termes où interviennent les fluctuations de vitesse des cristaux. Les détails du développement de ce modèle se trouvent dans la thèse de Patrick Roux (2005) et dans l'article (Roux *et al.*, 2005a). L'un des avantages de cette méthode de développement est que le système d'équations moyennes du modèle colonnaire apparaît comme un cas particulier du système d'équations du modèle équiaxe. Il est donc envisageable de rassembler les deux dans un modèle global permettant en particulier de traiter les situations (fréquentes) de transition d'un régime colonnaire vers un régime équiaxe au cours de la solidification. La difficulté principale consiste à pouvoir distinguer les cristaux et les dendrites pour utiliser les propriétés effectives correspondantes (qui sont différentes). Concrètement, cela revient à introduire dans

le modèle une limitation à la croissance des dendrites pour autoriser l'apparition d'un sous-refroidissement et donc de cristaux. C'est un thème d'étude qui est en cours d'investigation.

#### **4.8 Simulation de croissance cristalline par un modèle à interface diffuse**

Lors du travail de validation du modèle colonnaire, on a pu constater que sa pertinence reposait essentiellement sur deux grandeurs macroscopiques : la perméabilité et les coefficients d'échange massiques. Pour les estimer, on dispose de corrélations issues de différentes études théoriques. Il existe peu de moyens de valider ces corrélations de manière plus rigoureuse. Les structures dendritiques sont trop fines et trop fragiles pour se prêter à des mesures expérimentales. L'une des possibilités, déjà explorée, consiste à photographier une dendrite et à utiliser l'image obtenue pour résoudre les problèmes de fermeture qui permettent d'accéder à la perméabilité ou aux coefficients d'échanges massiques. Cela est uniquement possible lorsque l'on peut facilement extraire les dendrites et en obtenir une image utilisable. Dans le cas des alliages métalliques, c'est souvent impossible.

Une autre possibilité est de simuler numériquement la croissance de dendrites et d'utiliser l'image obtenue de la même manière qu'un document photographique. Cela présente également l'avantage d'apporter des informations sur la cinétique de croissance des dendrites (vitesse de la pointe, degré de sous-refroidissement dans le liquide, etc.). Ces informations sont utiles en particulier pour affiner les coefficients macroscopiques effectifs ou modéliser la transition colonnaire-équiaxe.

Depuis quelques années, il existe des méthodes permettant de calculer la croissance de cristaux ou de dendrites avec des temps de calcul raisonnables. Lors de la thèse de Patrick Roux, nous avons choisi d'explorer les possibilités d'une méthode particulière appelée *Phase Field* (ou champ de phase). C'est une méthode qui peut être classée parmi les méthodes à interface diffuse : l'interface est artificiellement épaissie pour en faire une zone volumique dans laquelle les grandeurs physiques varient de manière abrupte, mais continue. Ainsi, dans le cas d'un changement de phase liquide-solide, on introduit une variable continue, appelée « champ de phase » qui varie de 0 à 1 du liquide au solide.

Ces méthodes se distinguent en particulier des méthodes de suivi d'interface dans lesquelles cette dernière est modélisée comme une surface infiniment mince où certaines grandeurs physiques présentent une discontinuité. Ces dernières méthodes nécessitent des algorithmes particuliers pour faire évoluer l'interface.

En revanche, dans la méthode de champ de phase, l'interface est tout simplement représentée par la zone où la variable « champ de phase » est comprise strictement entre 0,05 et 0,95 (choix arbitraire et peu important). Les calculs faits avec ces méthodes sont parfois qualifiés de « simulation directe », mais il faut rappeler que, bien que résolvant les équations exactes dans les phases pures, elles nécessitent une modélisation des phénomènes intervenant dans l'interface épaissie. De plus, la résolution numérique de ces équations peut elle-même introduire des perturbations sur les résultats. Il convient donc d'être particulièrement rigoureux dans l'utilisation des cristaux calculés comme « images » de cristaux réels à l'aide de ces méthodes.

À l'heure actuelle, il a été possible de calculer des cristaux équiaxes. On peut en voir un exemple sur la figure 16. Il faut noter que le rayon de courbure minimal des structures calculées (branches dendritiques) dépend directement de la taille du maillage. Si l'on veut simuler des structures réelles, il apparaît nécessaire de raffiner

localement le maillage à l'interface solide-liquide. Cela n'a pas pu être fait jusqu'à présent. Pour cette raison aussi, les calculs de dendrites sont encore plus délicats car l'échelle est plus grande. Ils semblent cependant réalisables. Aucune utilisation approfondie des images obtenues n'a encore été faite, par manque de temps. Les détails de la méthode utilisée, les résultats de calculs ainsi que des interprétations préliminaires sont présentés dans la thèse de Patrick Roux (2005).

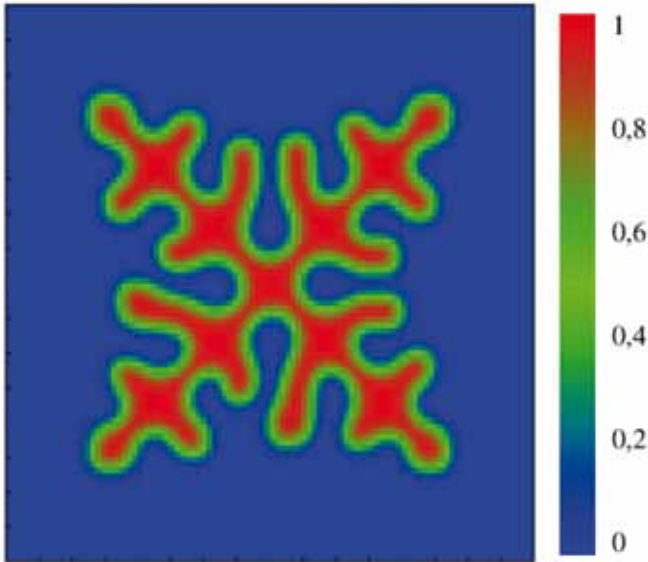


FIG. 16 : Solidification d'un cristal équiaxe - champ de phase calculé.

## 4.9 Conclusion

Après deux thèses sur le sujet, deux modèles macroscopiques de solidification ont été développés : l'un pour le régime colonnaire, l'autre pour le régime équiaxe. Ils ont été validés de façon satisfaisante sur les données expérimentales disponibles. Les modèles ont été obtenus en adoptant le même formalisme théorique, ce qui les rend compatibles et ouvre la possibilité de les rassembler pour simuler des situations de transition entre les deux régimes au cours de la solidification.

Les modèles sont limités à des mélanges binaires. Pour les applications aux bains de corium, il est nécessaire d'étendre les modèles à des mélanges ternaires (voire quaternaires). Ce travail est prévu pour une nouvelle thèse qui débutera en octobre 2005. Cette thèse a également pour objectif d'étudier les capacités du modèle à simuler la refusion (ou dissolution) du solide.

Enfin, la simulation numérique de croissance de cristaux par la méthode de champ de phase semble prometteuse pour obtenir des informations locales sur la cinétique de croissance des cristaux et sur la validité des corrélations calculant la perméabilité ou les coefficients d'échange massiques à partir de la taille des espacements interdendritiques. Ce thème d'étude devrait être approfondi dans les années à venir.

## 5 RENOYAGE - ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES EN MILIEU POREUX

---

### 5.1 Introduction

En cas d'accident grave dans un réacteur, il est probable de voir se former ce qu'on appelle des « lits de débris ». Il y a deux configurations principales. La première correspond à l'effondrement de crayons très chauds à la suite du choc thermique causé par un renoyage : cela a été observé dans le réacteur TMI-2 après l'accident, avec des débris dont la taille est de l'ordre de quelques millimètres (Broughton *et al.*, 1989). La deuxième configuration peut résulter de la fragmentation d'une coulée de matériaux fondus lorsqu'elle rencontre l'eau restant en fond de cuve du réacteur : ceci a été observé et étudié dans de nombreuses expériences et la taille moyenne des débris obtenus est également de l'ordre de quelques millimètres (Magalon, 1997). La tortuosité importante, l'existence de zones à faible porosité et la surchauffe des particules par rapport à l'eau conduisent à s'interroger sur la possibilité de renoyer de tels lits de débris pour les refroidir.

J'ai abordé ce thème en 1995, en participant à l'encadrement de la thèse de François Petit, dirigée par Michel Quintard à l'ENSAM de Bordeaux. Au cours de cette thèse,

un premier modèle à non équilibre thermique a été développé et un dispositif expérimental a été construit pour tenter d'obtenir des données quantitatives permettant une validation. Ces travaux se sont poursuivis par la thèse de Fabien Duval, toujours dirigée par Michel Quintard. Cette thèse a permis d'aboutir à un nouveau modèle à non-équilibre thermique, plus satisfaisant, qui a fait l'objet d'une publication présentée en annexe (Duval *et al.*, 2004). De plus, au cours de cette thèse, nous avons abordé l'étude des écoulements diphasiques à l'échelle locale par simulation numérique directe. À l'aide d'une méthode à interface diffuse (Cahn-Hilliard), nous avons pu réaliser des calculs d'écoulements dans des cellules représentatives d'un milieu poreux. Ces calculs ont permis de résoudre certains problèmes de fermeture nécessaires à la quantification des propriétés de transport effectives apparaissant dans le modèle global. Pour aborder les méthodes à interface diffuse, nous avons bénéficié de la collaboration de Didier Jamet, du CEA de Grenoble.

En parallèle, le modèle global a été implanté dans le code de calcul ICARE/CATHARE lors du post-doctorat de Céline Béchaud. Des applications sur des configurations 2D ont permis d'observer de nombreux résultats nouveaux et intéressants en ce qui concerne la refroidissabilité d'un lit de débris. Ces résultats figurent dans une publication présentée en annexe (Fichot *et al.*, 2006). Actuellement, les recherches sur ce thème se poursuivent en essayant de caractériser les régimes d'écoulement dans un milieu poreux à l'aide de la simulation directe. On cherche en particulier à quantifier les paramètres intervenant dans l'équation moyenne de quantité de mouvement (perméabilités relatives et frottement interfacial notamment). Cette étude fait l'objet d'un post-doc (Phongsan Meekunnasombat) dont les premiers résultats figurent dans une publication présentée en annexe (Fichot *et al.*, 2005).

Dans ce chapitre, je rappellerai brièvement le contexte général de ces études. Ensuite, j'indiquerai les principaux résultats obtenus, tant au niveau du modèle macroscopique que des problèmes de fermeture à l'échelle locale et des simulations directes d'écoulements. Les détails se trouvent, pour la plupart, dans les trois articles présentés en annexe ou bien dans les autres documents cités en référence.

## 5.2 Nomenclature

$h$	enthalpie massique, $J.kg^{-1}$
$h$	coefficient d'échange effectif, $W.K^{-1}$
$\langle h_{\beta} \rangle^{\beta}$	$\beta=g, l, s$ , enthalpie moyenne de la phase $\beta$ , $J.kg^{-1}$
$K$	perméabilité, $m^2$
$\mathbf{K}_{\beta\gamma}$	$\beta, \gamma = g, l, s$ , tenseur de dispersion thermique effective, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$\dot{m}$	taux d'évaporation, $kg.m^{-3}.s^{-1}$
$p$	pression, $N.m^{-2}$
$T$	température, $K$
$\langle T_{\beta} \rangle^{\beta}$	$\beta=g, l, s$ , température moyenne de la phase $\beta$ , $K$
$v$	vitesse, $m.s^{-1}$
$\langle v_{\beta} \rangle^{\beta}$	$\beta=g, l$ , vitesse moyenne de la phase $\beta$ , $m.s^{-1}$

**Symboles grecs**

$\alpha$	taux de vide
$\rho$	densité, $\text{kg.m}^{-3}$
$\mu$	viscosité, $\text{N.s.m}^{-2}$
$\eta$	passabilité, m
$\varepsilon_\beta$	$\beta=g,l,s$ , fraction volumique de la phase $\beta$
$\varepsilon$	porosité, $\varepsilon=1-\varepsilon_s$
$\varpi_s$	puissance volumique, $\text{W.m}^{-3}$

**Indices et exposants**

$g$	gaz, vapeur
$l$	liquide
$s$	solide

### 5.3 Problématique du renoyage de particules surchauffées

Le problème du refroidissement des lits de débris a fait l'objet de nombreuses études au cours des trente dernières années. La plupart de ces études ont eu pour but de déterminer les paramètres limitant la refroidissabilité. En cas d'impossibilité de refroidir le lit de débris, la température s'élève rapidement et les débris fondent pour former un bain dont la progression est très difficile à stopper, ce qui signifie qu'il n'est pas possible de confiner le corium à l'intérieur de la cuve. Pour un lit de débris initialement saturé d'eau, on définit ce qu'on appelle le «flux critique» d'assèchement qui correspond à la puissance maximale (par unité de surface du lit de débris) au delà de laquelle il apparaît une zone entièrement remplie de vapeur. Ce flux critique a été déterminé expérimentalement et analytiquement pour des lits de débris 1D (Lipinski, 1984). Quelques expériences 2D intéressantes ont été faites en parallèle (Lee & Nilson, 1977, Hardee & Nilson, 1977). Récemment, les effets 2D ont été étudiés plus en détails, soit expérimentalement (Decossin, 2000, Atkhen & Berthoud, 2003) soit numériquement (Mayr *et al.*, 1998, Béchaud *et al.*, 2001, Fichot *et al.*, 2006). D'un autre côté, l'étude du renoyage de lits de débris surchauffés n'a été que très peu abordée à cause des difficultés expérimentales. On dispose néanmoins de quelques résultats expérimentaux (Armstrong *et al.*, 1982, 1981, Cho *et al.*, 1984, Ginsberg, 1982, 1985, Ginsberg *et al.*, 1986, Tutu *et al.*, 1984, Konovalikhin *et al.*, 2000).

La modélisation de ce problème est rendue difficile à cause de la grande différence de température entre les particules solides et les fluides (eau et vapeur) et à cause des configurations d'écoulements très variables. En effet, lorsque la température des particules est suffisamment élevée, l'eau ne peut plus être en contact avec le solide et c'est la vapeur qui devient la phase « mouillante ». En particulier, cela complique beaucoup l'estimation des frottements entre les phases qui peuvent varier fortement selon que les phases sont stratifiées en canaux ou que l'une est dispersée dans l'autre.

## 5.4 Modèle macroscopique

Le premier choix de modélisation a consisté à ne pas faire l'hypothèse d'équilibre thermique entre les phases. Comme dans le chapitre précédent, le modèle a été obtenu par changement d'échelle à l'aide de la méthode de moyenne volumique. Une première version a été proposée lors de la thèse de François Petit (Petit, 1998, Petit et al., 1999). Par la suite, pendant la thèse de Fabien Duval, il s'est avéré plus judicieux de faire intervenir la température de saturation dans l'expression des déviations de température. En effet, la température de saturation est la température de référence à l'équilibre thermique (lorsqu'il y a ébullition). Les détails du modèle sont présentés dans l'article de Duval *et al.* (2004), en annexe de ce chapitre ainsi que dans Duval et al. (2002a). La forme générale du système d'équations est la suivante :

$$\frac{\partial (\alpha \epsilon \langle \rho_g \rangle^g \langle h_g \rangle^g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \epsilon \langle \rho_g \rangle^g \langle \mathbf{v}_g \rangle^g \langle h_g \rangle^g) = \nabla \cdot (\mathbf{K}_g^* \cdot \nabla \langle T_g \rangle^g) + \dot{m}_g h_g^{sat} + Q_{pg} + Q_{gi} \quad (22)$$

$$\frac{\partial ((1 - \alpha) \epsilon \langle \rho_l \rangle^\ell \langle h_l \rangle^\ell)}{\partial t} + \nabla \cdot ((1 - \alpha) \epsilon \langle \rho_l \rangle^\ell \langle \mathbf{v}_l \rangle^\ell \langle h_l \rangle^\ell) = \nabla \cdot (\mathbf{K}_l^* \cdot \nabla \langle T_l \rangle^\ell) + \dot{m}_l h_l^{sat} + Q_{pl} + Q_{li} \quad (23)$$

$$\frac{\partial ((1 - \epsilon) \langle \rho_s \rangle^s \langle h_s \rangle^s)}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{K}_s^* \cdot \nabla \langle T_s \rangle^s) - Q_{pl} - Q_{pg} - Q_{pi} + \varpi_s \quad (24)$$

Dans ces équations,  $\langle h_\beta \rangle^\beta$  et  $\langle T_\beta \rangle^\beta$  représentent l'enthalpie et la température de la phase  $\beta$  ( $\beta = g, l, s$  pour le gaz, le liquide et le solide respectivement).  $\mathbf{K}_\beta^*$  est le tenseur de diffusion effective.

Le taux de changement de phase est donné par la relation :

$$\dot{m}_g = \frac{Q_{pi} - Q_{gi} - Q_{li}}{h_g^{sat} - h_g^{sat}} \quad (25)$$

Les termes d'échanges entre phases s'expriment de la façon suivante :

$$Q_{\beta i} = h_{\beta i} \left( \langle T_\beta \rangle^\beta - T_{sat} \right) \quad (26)$$

$$Q_{p\beta} = h_{s\beta} \left( \langle T_s \rangle^s - \langle T_\beta \rangle^\beta \right) \quad (27)$$

où  $h_{p\beta}, h_{\beta i}$  sont les coefficients d'échange thermiques.

Comme pour le modèle de solidification, l'un des avantages du modèle est de fournir, en même temps que le système d'équations moyennées, un ensemble de problèmes de fermeture qui permettent d'estimer les propriétés macroscopiques effectives. Dans ce cas précis, l'accent a été mis sur l'équation de bilan d'énergie. Les coefficients macroscopiques mis en jeu sont le tenseur de diffusion-dispersion et les coefficients d'échange de chaleur entre phases. Ces derniers ont été déterminés analytiquement pour des configurations simples (écoulements stratifiés dans des tubes capillaires). Ces cellules stratifiées ont également permis de valider les résultats du modèle macroscopique en les comparant à ceux obtenus par une résolution directe à l'échelle locale (voir Duval *et al.*, 2004).

L'équation de bilan de quantité moyenne de mouvement est beaucoup plus difficile à établir. La prise de moyenne volumique fait apparaître de nombreux termes pour lesquels il est très difficile de proposer une fermeture assez simple pour être utilisable. On a donc recours à une approche heuristique et l'on utilise une équation de type « Darcy généralisé » (voir (Fichot *et al.*, 2006) en annexe). La forme des équations est la suivante :

$$\alpha \langle \rho_g \rangle^g \left( \frac{\partial \langle \mathbf{v}_g \rangle^g}{\partial t} + \langle \mathbf{v}_g \rangle^g \cdot \nabla \langle \mathbf{v}_g \rangle^g \right) = -\alpha \nabla \langle \tilde{p}_g \rangle^g + \alpha \langle \rho_g \rangle^g \mathbf{g} - \epsilon \alpha^2 \left( \frac{\mu_g}{K k_{rg}} \langle \mathbf{v}_g \rangle^g + \epsilon \alpha \frac{\langle \rho_g \rangle^g}{\eta \eta_{rg}} \langle \mathbf{v}_g \rangle^g |\langle \mathbf{v}_g \rangle^g| \right) \quad (28)$$

$$(1 - \alpha) \langle \rho_\ell \rangle^\ell \left( \frac{\partial \langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell}{\partial t} + \langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell \cdot \nabla \langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell \right) = -(1 - \alpha) \nabla \langle p_\ell \rangle^\ell + (1 - \alpha) \langle \rho_\ell \rangle^\ell \mathbf{g} - \epsilon (1 - \alpha)^2 \left( \frac{\mu_\ell}{K k_{r\ell}} \langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell + \epsilon (1 - \alpha) \frac{\langle \rho_\ell \rangle^\ell}{\eta \eta_{r\ell}} \langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell |\langle \mathbf{v}_\ell \rangle^\ell| \right) \quad (29)$$

Celle-ci est valable même en dehors du milieu poreux, pour peu que l'on adapte les lois de fermeture et les coefficients macroscopiques. D'ailleurs, l'un des grands avantages de ce modèle est de s'écrire sous une forme parfaitement cohérente avec celle du modèle diphasique de CATHARE qui s'applique en dehors du milieu poreux. On a ainsi pu aboutir à un code de calcul capable de traiter une géométrie comportant un milieu poreux et des cavités, ce qui est le cas lors d'un accident grave dans un réacteur (voir (Fichot *et al.*, 2006) en annexe).

### 5.4.1 Validation et application au renoyage de débris en fond de cuve

Le modèle a été validé de manière satisfaisante sur des essais de renoyage 1D qui sont les seuls dont on dispose (Trégourès *et al.*, 2003). Néanmoins, on a pu identifier quelques lacunes de modélisation pour certains régimes d'écoulement (grosses particules ou débit liquide élevé). Dans ces cas, il est possible que le liquide se propage à travers le milieu poreux sans toucher les particules, ce qui n'est pas pris en compte dans les lois de frottements du modèle où l'on suppose toujours que le liquide est mouillant.

Le modèle permet aussi de calculer le renoyage de particules surchauffées en 2D. Les figures 18 et 19 montrent une séquence de renoyage d'un lit de débris constitué de particules de 2 mm générant une puissance de 200 W/kg d' $\text{UO}_2$ , avec une porosité de 0,4. La pression est de 60 bars. La température initiale est 1050 K, c'est à dire 500 K au dessus de la température de saturation.



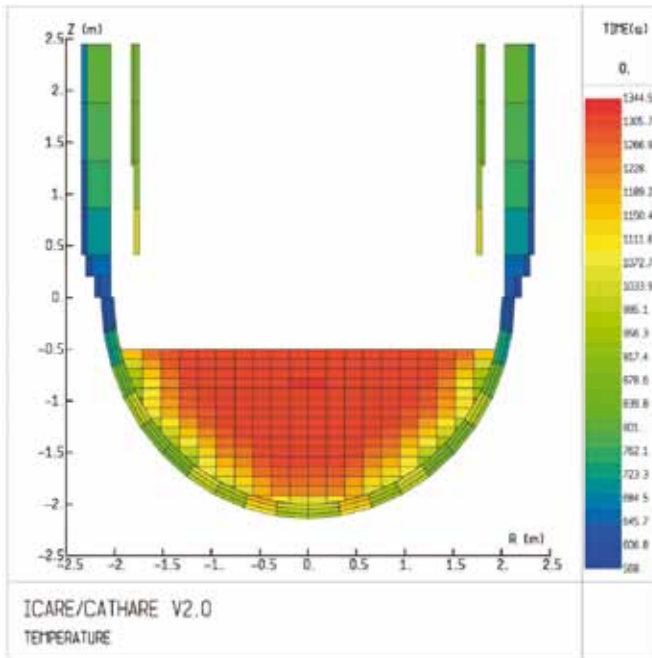


FIG. 17 : Vue générale du domaine de calcul - L'eau arrive par le downcomer latéral

L'eau arrive par le *downcomer* visible sur la vue générale de la cuve (Fig. 17). Les particularités de cette séquence sont résumées ci-dessous.

- Grâce à l'inclinaison de la paroi de la cuve, l'eau peut s'écouler le long de la paroi sans effet de contre-courant de vapeur qui s'échappe vers le haut du lit de débris. De plus, les débris proches de la paroi étant plus froids, cela favorise le refroidissement rapide de cette région et, comme on peut le voir sur la Fig. 19, l'accès principal du liquide se situe le long de la paroi.
- L'accès de l'eau par le haut est limité par l'écoulement intense de vapeur qui résulte de l'évaporation dans la partie basse. Par conséquent, une partie de l'eau injectée s'accumule au dessus du lit de débris et une « bulle » de vapeur persiste au centre, où la température des débris continue d'augmenter. Cette bulle diminue progressivement, au fur et à mesure de l'avancée du front de trempe. Dans cette configuration, le front avance sous l'effet de la différence de pression hydrostatique qui existe entre la bulle et l'eau.
- Il semble que le front de trempe ne soit pas raide, mais présente plutôt une transition continue entre la zone sèche surchauffée et la zone saturée déjà refroidie. Il faut toutefois rappeler que le schéma en espace est seulement d'ordre un et est assez diffusif (*upwind*). Par conséquent, il faudrait analyser plus en détails l'effet du maillage sur la position et la vitesse de progression du front de trempe. Cette étude n'a pas encore été faite.
- Aucune comparaison n'a été faite avec une configuration 1D équivalente pour ce cas mais Tréjourès *et al.* (2003) a montré que la durée du renoyage est très nettement inférieure dans le cas 2D à cause de l'accès facilité de l'eau par les côtés du lit de débris. Cette durée dépend fortement de la taille des particules comme il a été montré dans Fichot *et al.* (2006).

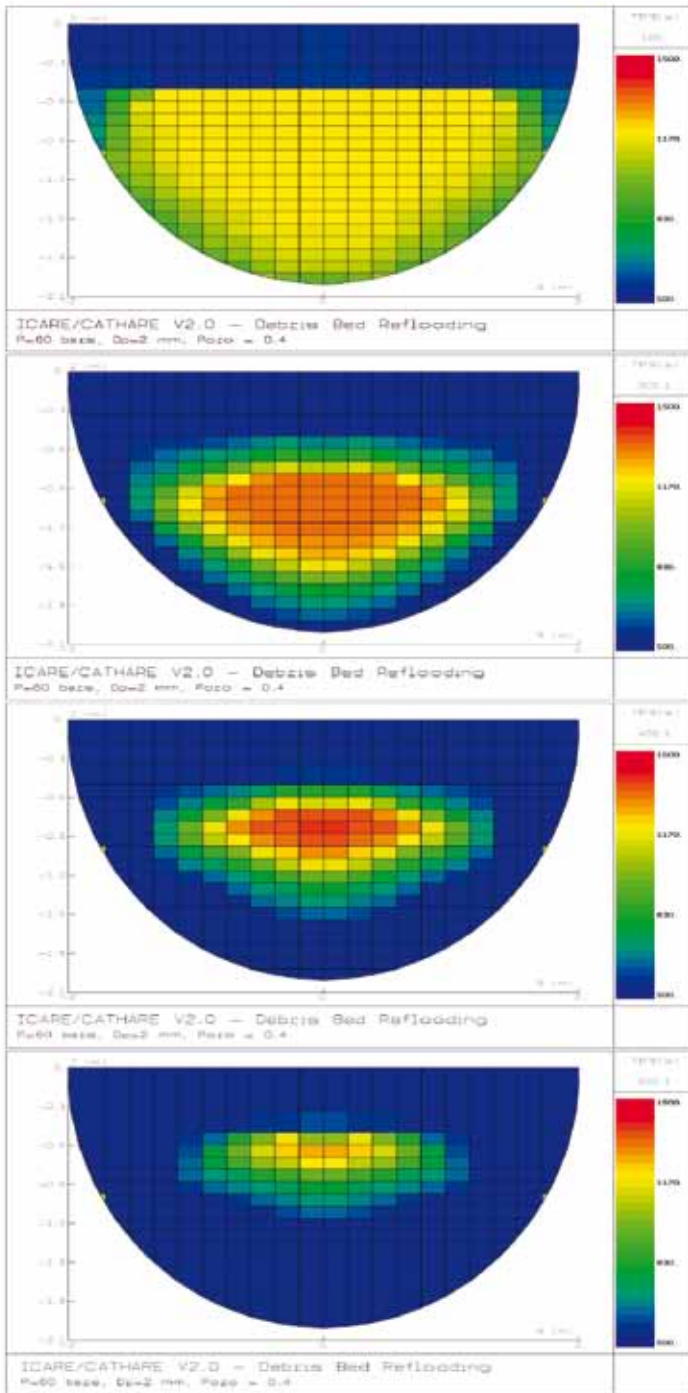


FIG. 18 : Température (à 100 s, 300 s, 400 s et 500 s) –  $p = 60$  bars,  $d_p = 2$  mm,  $\varepsilon = 0.4$

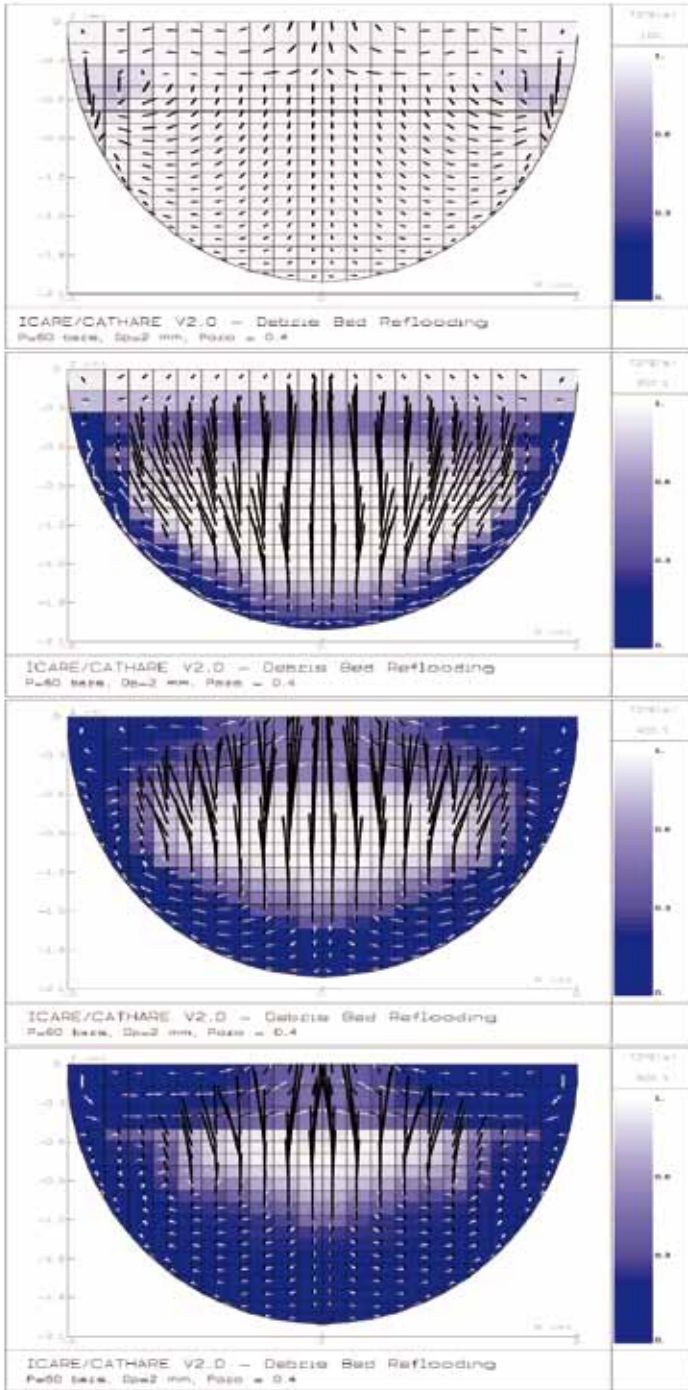


FIG. 19 : Taux de vide et champ de vitesse (à 100 s, 300 s, 400 s et 500 s) - Échelle de vitesse : 1 cm pour 1 cm/s -  $p=60$  bars,  $d_p=2$  mm,  $\varepsilon = 0.4$

Ces exemples montrent que les configurations 2D engendrent une circulation naturelle de l'eau qui permet d'éviter la limitation de l'entrée d'eau dans le milieu poreux à cause du contre-courant de vapeur (caractéristique des géométries 1D). Par conséquent, le flux critique est plus élevé en 2D qu'en 1D. De plus, on montre dans Fichot *et al.* (2006) qu'il est possible de refroidir aussi certaines parties non renouées, à condition que le débit de vapeur produit en aval soit suffisant. Ce point est particulièrement intéressant du point de vue de la sûreté puisqu'il démontre que l'assèchement du lit de débris ne conduit pas nécessairement à la fusion des matériaux. Cela illustre aussi l'intérêt d'utiliser un modèle à non-équilibre thermique, sans lequel il serait impossible d'observer de tels phénomènes.

## ***5.5 Simulation directe d'écoulements diphasiques dans un milieu poreux***

Déterminer des problèmes de fermeture permettant de calculer les propriétés effectives macroscopiques n'a d'intérêt que si l'on est capable de les résoudre sur des cellules représentatives du milieu poreux. Comme on l'a mentionné dans la partie précédente, il est possible de résoudre analytiquement ces problèmes pour des géométries très simples (voir l'article (Duval *et al.*, 2004), en annexe).

Pour des géométries plus complexes et plus proches du milieu réel, la résolution des problèmes de fermeture nécessite de connaître la forme de l'interface liquide-vapeur et le champ de vitesse dans les phases fluides. Cela n'est possible qu'à l'aide d'une simulation directe de l'écoulement diphasique. À l'heure actuelle, plusieurs méthodes existent. Le choix s'est porté sur la méthode de Cahn-Hilliard qui est une méthode à interface diffuse. Comme pour la méthode de champ de phase (changement de phase liquide-solide) décrite au chapitre précédent, l'interface est épaissie et les grandeurs physiques (densité, fraction massique) varient continûment à travers cette interface. La méthode choisie est décrite en détails dans la thèse de Fabien Duval (Duval, 2002) et dans Duval *et al.* (2001), et plus succinctement dans l'article présenté en annexe (Fichot *et al.*, 2005). Encore une fois, bien que commode, l'appellation simulation directe est abusive puisque les transferts à travers l'interface sont régis par un modèle et non par des équations exactes, à cause de l'épaississement de cette interface. Dans sa version actuelle, le modèle de Cahn-Hilliard est applicable à des écoulements isothermes. Il n'est donc pas possible de prendre en compte le changement de phase, ce qui limite la pertinence de certains des résultats obtenus notamment pour les coefficients d'échange de chaleur.

Dans la thèse de Fabien Duval, des simulations d'écoulements sur des cellules assez simples (cellules 2D périodiques contenant une seule particule) ont permis de montrer que les coefficients d'échange obtenus analytiquement sur des cellules 1D stratifiées constituent de bonnes approximations de ceux obtenus sur des cellules 2D. Néanmoins, des déviations notables existent lorsque la vitesse des fluides est grande. Cette étude reste à approfondir.

La simulation directe est également un outil particulièrement intéressant pour étudier les frottements entre phases et la fermeture des termes de frottement pariétal et interfacial. Il s'agit d'une étude complexe et nous l'avons juste abordée par des calculs d'écoulements co-courant dans des cellules 2D périodiques contenant une dizaine de particules. Les résultats montrent que les phases ont tendance à s'organiser en canaux (dès lors que leur fraction volumique est suffisante) et que les régimes

dispersés n'existent que pour une faible fraction volumique de l'une des phases. On a aussi pu observer qu'il existe parfois plusieurs configurations d'écoulement possibles pour une saturation donnée. Cela signifie que l'on ne peut pas établir une bijection entre les coefficients de frottement (les perméabilités relatives en particulier) et la saturation. Les résultats de cette étude sont présentés dans l'article (Fichot *et al.*, 2005), en annexe. Un exemple de calcul, pour une saturation  $S_f=0.54$ , est présenté sur la Fig. 20.

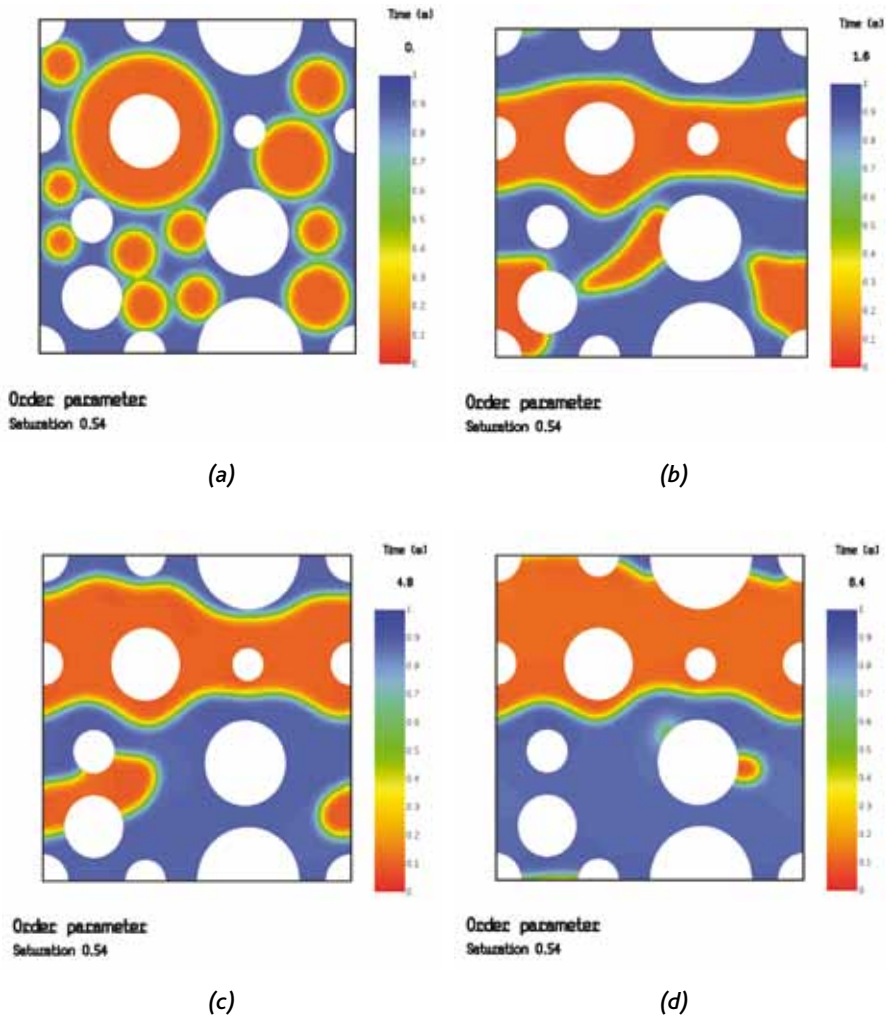


FIG. 20 : Simulation numérique Cahn-Hilliard pour  $S_f=0.54$   
(a) : configuration initiale.  
(b)-(d) : 3 instants différents.

## 5.6 Conclusion

Le thème du renoyage de lits de débris est celui que j'ai le plus approfondi. L'un des principaux résultats obtenu est le modèle macroscopique à non-équilibre thermique qui a pu être implanté dans le code ICARE/CATHARE et validé, soit à partir de solutions exactes sur des cellules très simples, soit à partir de résultats expérimentaux sur des essais 1D. Le modèle comporte des propriétés macroscopiques effectives (tenseur de diffusion-dispersion et coefficients d'échange thermique) pour lesquelles on a proposé des problèmes de fermeture. Ces problèmes ont été résolus pour des cellules simples.

Pour des cellules plus complexes et plus proches du milieu poreux réel, il est nécessaire de recourir à la simulation numérique de l'écoulement à l'échelle locale. Pour cela, une méthode à interface diffuse (Cahn-Hilliard) a été utilisée. Elle s'avère être un outil intéressant pour déterminer la répartition des phases dans la cellule ainsi que les champs de vitesse. On peut ainsi caractériser les écoulements en fonction de paramètres tels que la saturation ou les débits. Pour l'instant, ce modèle est limité aux écoulements isothermes et il n'est donc pas possible d'étudier l'impact du changement de phase sur ces régimes d'écoulement. L'extension du modèle pour prendre en compte les changements de phase fait partie d'un projet de collaboration future avec le CEA (Didier Jamet).

Parmi les autres perspectives envisagées, il reste également à étendre le modèle macroscopique pour pouvoir traiter simultanément, comme expliqué dans l'introduction, les zones contenant des crayons intacts, des crayons dégradés ou des débris. Un travail sur ce thème est en cours au laboratoire avec Magali Zabiégo et Phongsan Meekunnasombat (post-doc). On essaiera de s'appuyer sur la simulation directe pour établir des lois de fermeture continues entre ces différentes configurations. On utilisera aussi un ensemble de tomographies du milieu dégradé (provenant d'essais Phebus) pour caractériser la géométrie du milieu poreux et réduire ainsi certaines incertitudes qui sont actuellement limitantes.



## 6 CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

---

Les travaux décrits dans ce rapport ont permis d'aboutir à une formulation cohérente de plusieurs modèles macroscopiques décrivant chacun l'un des processus importants intervenant lors d'un accident grave de réacteur. L'un des avantages de cette cohérence est d'avoir pu utiliser certains résultats obtenus au cours du développement d'un modèle pour le développement d'un autre. À titre d'exemple, on peut citer le tenseur de conductivité radiative qu'il est nécessaire de prendre en compte dans le modèle de coulée des matériaux fondus et dans le modèle de renoyage des lits de débris. On peut aussi citer les corrélations donnant la perméabilité du milieu dégradé, indispensables dans ces deux mêmes modèles. Tous ces modèles sont en fait complémentaires pour la description d'un cœur dégradé. Il est même envisageable d'en rassembler certains, comme le modèle de coulée des matériaux fondus et le modèle de solidification des mélanges. Dans ces modèles, les systèmes d'équations obtenus à l'aide de la même méthode faisant intervenir les moyennes volumiques sont très similaires, comme on l'a évoqué au troisième chapitre.

Bien que la méthode des moyennes volumiques ait été largement utilisée pour le développement de ces modèles, elle n'est pas la seule utilisable pour traiter le



problème d'un milieu poreux évolutif. Dans le cas du rayonnement, l'homogénéisation de l'équation de la luminance est faite d'une autre manière. De même, pour la solidification équiaxe, il s'est avéré plus judicieux d'utiliser une approche statistique pour traiter le comportement des cristaux.

Dans tous les cas, on cherche à utiliser une technique de changement d'échelle qui permette d'établir de façon aussi rigoureuse que possible le système d'équations macroscopiques.

En même temps, on essaie de définir, au cours du changement d'échelle, les propriétés macroscopiques effectives. Cela peut se traduire en particulier par des problèmes de fermeture qu'il est nécessaire de résoudre sur des cellules représentatives du milieu poreux.

À partir de cellules très simples (phases stratifiées ou réseaux élémentaires de particules), il est possible d'obtenir directement une formulation analytique des propriétés effectives (c'est le cas pour la conductivité radiative, les coefficients d'échange massiques ou thermiques, les perméabilités absolue et relative, etc.).

Pour se rapprocher du milieu réel, qui est constitué d'une distribution plus aléatoire de particules, il faut utiliser des cellules plus complexes, comportant un grand nombre de particules. Dans ce cas, il n'est plus possible de résoudre analytiquement les équations locales de transport. Il est nécessaire d'utiliser des méthodes de simulation numérique « directe ». On a vu dans le rapport que ces méthodes comportent elles-mêmes une part de modélisation, ce qui exige d'utiliser les résultats avec rigueur pour en déduire des propriétés à l'échelle macroscopique. À l'heure actuelle, nous disposons ainsi de trois outils de simulation à l'échelle locale :

- La méthode de Monte Carlo pour les coefficients d'absorption et de réflexion et la fonction de phase dans un milieu poreux,
- Le modèle de champ de phase pour la croissance de cristaux ou dendrites dans un mélange binaire,
- Le modèle de Cahn-Hilliard pour les écoulements liquide-vapeur isothermes dans un milieu poreux.

Les premières applications de ces méthodes ont permis d'estimer certaines propriétés effectives macroscopiques. Néanmoins, nous restons confrontés à une autre difficulté : celle de définir correctement la cellule et les conditions aux limites afin que le résultat soit significatif à l'échelle macroscopique.

Il faut donc, dans un premier temps, être capable de construire des cellules que l'on estime représentatives. Ce travail est, en soi, une tâche délicate. Il fait actuellement l'objet d'une étude qui a pour objectif d'obtenir, à partir d'images de cœur dégradé, certaines grandeurs géométriques statistiques caractérisant l'état de sa dégradation.

Actuellement, les études se poursuivent sur les thèmes suivants :

- L'estimation plus précise du tenseur de conductivité radiative à l'aide de la méthode de Monte Carlo,
- L'extension du modèle de solidification aux mélanges ternaires et application à la dissolution de particules solides par le corium fondu,
- L'estimation plus précise des termes de frottements dans le modèle d'écoulement liquide-vapeur, à l'aide de simulations (modèle de Cahn-Hilliard) sur des cellules représentatives du cœur dégradé.

## 7 PRÉSENTATION PERSONNELLE

---

Dans cette partie, je présente brièvement mon parcours professionnel et les objectifs de mes travaux de recherche.

### *7.1 Curriculum vitae*

Florian Fichot - Né le 2 avril 1966

Ingénieur à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

#### **Formation :**

- Ingénieur, École Centrale Paris (1989), Spécialité « Énergétique et transferts thermiques »
- Doctorat en Énergétique (1994) : « Modélisation de l'allumage d'une flamme de diffusion turbulente - Application aux moteurs-fusées cryotechniques », École Centrale Paris. Mention Très Honorable avec les Félicitations.

### Expérience professionnelle antérieure :

- Séjour de 16 mois (Oct. 1991 - Jan. 1993) au Jet Propulsion Laboratory de la NASA (Pasadena, USA) pour une étude sur la modélisation de l'évaporation et de la combustion d'un nuage de gouttelettes dans un jet turbulent, sous la direction de J. Bellan.

### Activités à l'IRSN :

- Définition et suivi du développement du code de calcul d'accidents graves ICARE/CATHARE. L'objectif du code est de prédire, de manière aussi précise que possible, le comportement des matériaux d'un cœur de réacteur et la thermohydraulique du circuit en cas d'accident grave sur un réacteur nucléaire à eau. Les résultats servent à estimer le terme source (d'éléments radioactifs) dans l'enceinte, ainsi que la production d'hydrogène (susceptible de provoquer une déflagration dans l'enceinte). Ils permettent aussi de prédire les conditions de rupture de cuve.
- Encadrement de doctorants, post-docs, stagiaires et collaborateurs étrangers.
- Participation à des projets internationaux de recherche sur les accidents graves.
- Expertise et soutien technique pour les études de sûreté (Études probabilistes de niveau 2 en particulier).

### Thématiques explorées :

- Combustion turbulente de flammes de diffusion ou de pré mélange.
- Combustion de nuages de gouttes dans un écoulement turbulent.
- Renoyage d'un milieu poreux chauffé en volume (lit de débris).
- Simulation numérique directe des écoulements liquide-vapeur à l'échelle locale dans un milieu poreux, par méthodes à interface diffuse.
- Transferts de masse et de chaleur dans un bain de corium multi-constituants en cours de solidification.
- Écoulement et oxydation des métaux fondus dans un cœur de réacteur en cours de dégradation.
- Stratification des phases métallique et oxyde non miscibles dans un bain de corium.
- Rayonnement thermique dans un cœur de réacteur en cours de dégradation : suivi des évolutions géométriques et homogénéisation.

**Encadrement de thèses** (dans tous les cas, sauf pour F. Petit et P. Rubiolo, il s'agit de thèses que j'ai proposées et encadrées, dans le laboratoire, supervisées par un directeur de thèse universitaire) :

- F. Petit (1998) : Ébullition en milieu poreux et renoyage d'un lit de débris de réacteur nucléaire, ENSAM Bordeaux. Directeur universitaire : M. Quintard
- P. Bousquet-Mélou (2000) : Modélisation macroscopique et simulation numérique de la solidification des mélanges binaires, Université P. et M. Curie (Paris 6). Directeur universitaire : D. Gobin
- P. Rubiolo (2000) : Modélisation du transfert thermique dans un milieu poreux : application aux réacteurs nucléaires en situation accidentelle, Université Aix-Marseille 1 (il s'agissait, dans ce cas, d'une participation limitée à une partie de la thèse, encadrée par J.-M. Gatt au CEA). Directeur universitaire : R. Martin

- F. Duval (2002) : Modélisation du renoyage d'un lit de particules : contribution à l'estimation des propriétés de transport macroscopiques, INPToulouse. Directeur universitaire : M. Quintard
- P. Roux (2005) : Modélisation de la solidification équiaxe et du transport de cristaux dans un mélange multi-constituants, Université P. et M. Curie (Paris 6). Directeur universitaire : D. Gobin
- J. Belloni (2009) : Modélisation des phénomènes de dissolution lors des phases précoces et avancées d'un accident grave, Université P. et M. Curie (Paris 6). Directeurs universitaires : B. Goyeau et M. Quintard

#### Encadrement de post-docs :

- C. Béchaud (1999-2001) : Modélisation des écoulements diphasiques dans un milieu poreux : implémentation dans CATHARE 3D et validation
- M. Salay (2002-2004) : Modélisation de la stratification métal-oxyde dans un bain de corium U-Zr-Fe-O
- P. Meekunnasombat (2004-2006) : Modélisation du renoyage de crayons fortement dégradés

#### Encadrement de stages :

- C. Ackermann (1996, DEA) : Convection naturelle turbulente dans un bain de corium
- F. Brand (1997, DEA) : Conductivité effective et coefficient de dispersion thermique dans un lit de débris
- A. Floquet (1998) : Rayonnement dans un cœur dégradé
- G. Delmas et G. Genot (1999, Génie Atomique) : Effondrement de pastilles combustibles - Formation de lits de débris
- P. Roux (2002, DEA) : Solidification colonnaire d'un mélange binaire
- A. Garcia (2003, DEA) : Estimation des coefficients de transfert de chaleur effectifs dans un milieu poreux par résolution de problèmes de fermeture
- J. Belloni (2004, DESS) : Simulation numérique d'écoulements diphasiques en milieu poreux avec le modèle de Cahn-Hilliard

#### Expertise et participation à des projets internationaux :

- 4<sup>ème</sup> FrameWork Programme de la Communauté Européenne : Corium Interaction Chemistry (calculs d'incertitudes avec des codes IRSN sur la séquence accidentelle de TMI-2).
- Programmes TACIS de transferts de codes aux autorités de sûreté de Russie et d'Ukraine pour applications aux VVER.
- Représentant IPSN au Programme Review Group du projet OCDE RASPLAV (étude expérimentale de la thermohydraulique des bains de corium - Moscou).
- Consultant auprès de l'AIEA pour la rédaction d'un rapport : Methodology for severe accident analysis with computer codes : In-vessel phenomena.
- Participation au projet européen EUROFASTNET (définition des besoins en thermohydraulique pour les futurs codes) en tant qu'expert IRSN.
- Participation au projet européen EURSAFE (European expert network for the reduction of uncertainties in severe accident safety issues - définition des besoins d'essais et de modélisation pour les études d'accidents graves) en tant qu'expert IRSN.

- Chairman et représentant IRSN au Programme Review Group du projet OCDE MASCA (étude expérimentale des interactions entre matériaux et des phénomènes de ségrégation - RRC-KI, Moscou).
- Représentant IRSN au Programme ISTC METCOR (étude expérimentale des interactions entre un corium partiellement oxydé et l'acier de la cuve - NITI, St Petersburg)

### Autres activités :

#### *Contribution à l'organisation de conférences :*

- NURETH-11 (Avignon, 2005) : co-organisateur de la session sur les accidents graves et les bains de corium, relecteur de plusieurs articles.
- ICARE/CATHARE Seminar : Progress and future trends in core degradation modelling (Cadarache, 2001) : organisation des sessions techniques, participation à l'organisation du séminaire
- Journée Ébullition en Milieu Poreux (Marseille, 2002) : participation à l'organisation

#### *Participation aux comités de lecture de revues ou de congrès :*

- Journal of Numerical Heat Transfer, Nuclear Engineering and Design, Nuclear Engineering and Technology
- Conférences ICONE-7, NURETH-8, NURETH-10, NURETH-11

#### *Enseignement :*

- Transfert de connaissances aux partenaires étrangers, concernant la physique des accidents graves et l'utilisation de codes de calcul pour l'analyse de sûreté (sessions organisées en fonction des besoins).
- Participation aux cours sur les accidents graves organisés par le réseau européen SARNET (Severe Accident Phenomenology Short Courses, Janvier 2006).

## 7.2 Publications

### 7.2.1 Revues à comité de lecture

#### Références

Fichot, F., Schreiber, D., Lacas, F., Veynante, D., & Yip, B. 1992. A new flamelet approach to model the transient phenomena following ignition of a turbulent diffusion flame. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 151, 331.

Fichot, F., Veynante, D., Lacas, F., & Candel, S.M. 1993. One-dimensional study of the propagation of a turbulent premixed flame with a flame surface density model. *Combustion Science and Technology*, 48, 1.

Fichot, F., Harstad, K., & Bellan, J. 1994a. Entrainment and evaporation of drops in the laminar part of a developing mixing layer. Page 397 of : *Proceedings of the 25th Symposium (Int.) on Combustion*. The Combustion Institute, Irvine (USA).

Fichot, F., Delhaye, B., Veynante, D., & Candel, S.M. 1994b. Strain rate modeling for a flame surface density equation with application to non-premixed combustion. Pages 1273–1281 of : Proceedings of the 25th Symposium (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, Irvine (USA).

Fichot, F., Harstad, K., & Bellan, J. 1994c. Unsteady evaporation and combustion of a drop cluster inside a vortex. *Combustion and Flame*, 95, 5.

Candel, S.M., Veynante, D., Fichot, F., & D., Thévenin. 1996. Modélisation des problèmes d'allumage. In : Larrouturou, B. (ed.), *Images des Mathématiques*, vol. Modélisation de la Combustion. CNRS.

Petit, F., Fichot, F., & Quintard, M. 1999. Écoulement Diphasique en Milieux Poreux : Modèle à Non-Équilibre Local. *Int. J. Therm. Sci*, 38, 239–249.

Goyeau, B., Bousquet-Mélou, P., Gobin, D., Quintard, M., & Fichot, F. 2004. Macroscopic modeling of columnar dendritic solidification. *Computational and Applied Mathematics*, 23(2-3), 381–400.

Duval, F., Fichot, F., & Quintard, M. 2004. A local thermal non-equilibrium model for two-phase flows with phase change in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(3), 613–639.

Fichot, F., Adroguer, B., Volcheck, A., & Zvonarev, Yu. 2004. Advanced treatment of zircaloy cladding high temperature oxidation in severe accident code calculations - Part III Verification against representative transient tests. *Nuclear Engineering and Design*, 232, 97–109.

Zabiégo, M., Fichot, F., & Rubiolo, P. 2006. Modeling of radiative heat transfer during a PWR severe accident. *Nuclear Technology*, 154(2), 194–214.

Van Dorsselaere, J.P., Fichot, F., & Seiler, J.M. 2006. Views on R&D needs about in-vessel reflooding issues, with a focus on debris coolability. *Nuclear Engineering and Design*, 236.

Fichot, F., Duval, F., Trégourès, N., Béchaud, C., & Quintard, M. 2006. The impact of thermal non equilibrium and large scale 2D/3D effects on debris bed reflooding and coolability. *Nuclear Engineering and Design*, 236, 2144–2163.

Roux, P., Goyeau, B., Gobin, D., Fichot, F., & Quintard, M. 2006. Chemical non-equilibrium modelling of columnar solidification. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49(23-24), 4496–4510.

## 7.2.2 Congrès avec actes et comité de lecture

### Références

Fichot, F., Gonzalez, R., Chatelard, P., Lefèvre, B., & Garnier, N. 1995. ICARE2 Late Degradation Models: Applications to TMI-2 Accident. Pages 141–152 of: Rogers, J.T. (ed.), *Proceedings of Seminar on Heat and Mass transfer in severe nuclear reactor accidents*. Cesme (Turkey) : Begell House, for International Centre for Heat and Mass Transfer.

Bousquet-Mélou, P., Goyeau, B., Quintard, M., Fichot, F., & Gobin, D. 1999. Équation Macroscopique du Mouvement au sein d'une Zone de Croissance Dendritique. In : 14<sup>e</sup> Congrès Français de Mécanique.

Bousquet-Mélou, P., Goyeau, B., Quintard, M., Fichot, F., & Gobin, D. 2000. Average model for momentum, heat and mass transfers during solidification of a binary mixture. In : Proceedings of MCWASP 11.

Ortega-Bernardo, M., & Fichot, F. 2000 (April). Post-test calculations of FPT1 test using ICARE2 V3MOD0 code: an alternative scenario. In: Proceedings of ICONE 8, 8th International Conference on Nuclear Engineering.

Bousquet-Mélou, P., Goyeau, B., Quintard, M., Fichot, F., & Gobin, D. 2000b. Modèle macroscopique de solidification d'un mélange binaire. In : Congrès Français de Thermique (SFT 2000).

Béchaud, C., Duval, F., Fichot, F., Quintard, M., & Parent, M. 2001 (April). Debris bed coolability using a 3-D two phase model in a porous medium. In : Proceedings of ICONE 9, 9th International Conference on Nuclear Engineering.

Guillard, V., Fichot, F., Boudier, P., Parent, M., & Roser, R. 2001 (April). ICARE/CATHARE coupling : three-dimensional thermal hydraulics of LWR severe accidents. In : Proceedings of ICONE 9, 9th International Conference on Nuclear Engineering.

Duval, F., Fichot, F., & Quintard, M. 2001. Diffuse interface methods for two-phase flow in porous media. In: Trends in Numerical and Physical Modelling for Industrial Multiphase Flows.

Duval, F., Béchaud, C., Fichot, F., & Quintard, M. 2002a. Evaporation in porous media : a comprehensive non-equilibrium model. In: International Heat Transfer Conference (IHTC 2002).

Duval, F., Béchaud, C., Fichot, F., & Quintard, M. 2002b. Two-phase flow with phase change in porous media: a local non-equilibrium model. In : HEFAT 2002.

Ciobanas, A., Roux, P., Quillet, G., Goyeau, B., Gobin, D., Fichot, F., Quintard, M., Lehmann, P., & Fautrelle, Y. 2003. Modélisation des ségrégations en solidification d'alliages binaires. In : Congrès Français de Thermique (SFT 2003).

Trégourès, N., Fichot, F., Duval, F., & Quintard, M. 2003. Multi-dimensional numerical study of core debris bed reflooding under severe accident conditions. In : 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10).

Roux, P., Fichot, F., Gobin, D., Goyeau, B., & Quintard, M. 2003. 2D modelling of solidification of binary mixture: volume averaging models and numerical results. In : Eurotherm 69 - Heat and Mass Transfer in Solid-Liquid Phase Change Processes.

Zabiégo, M., Fichot, F., & Rubiolo, P. 2004. Transfert radiatif lors d'une séquence accidentelle dans un cœur de Réacteur à Eau sous Pression. In : Congrès Français de Thermique- SFT2004.

Fichot, F., Duval, F., Meekunnasombat, P., Garcia, A., Belloni, J., & Quintard, M. 2005. The use of a diffuse interface model to estimate effective transport properties for two-phase flows in porous media. In : Eleventh International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Le Dantec, G., & Fichot, F. 2005. Study of air ingress into the reactor vessel in case of severe accident, using ICARE-CATHARE V2.0. In : Eleventh International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Roux, P., Gobin, D., Goyeau, B., Fichot, F., & Quintard, M. 2005a. Macroscopic model for equiaxed solidification of binary mixtures. In : 4th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer (ICCHMT'05).

Roux, P., Fichot, F., De Pierrepont, S., Gobin, D., Goyeau, B., & Quintard, M. 2005b. Modelling of binary mixture phase change: Assessment on RASPLAV-SALT experiments. In : Eleventh International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Salay, M., & Fichot, F. 2005. Modelling of metal-oxide corium stratification in the lower plenum of a reactor vessel. In : Eleventh International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Zabiégo, M., Fichot, F., & Rubiolo, P. 2005. Radiative heat transfer modelling in the ICARE-CATHARE software - Application to a PWR severe accident sequence. In : Eleventh International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Roux, P., Gobin, D., Goyeau, B., Quintard, M., & Fichot, F. 2005b. Modèle macroscopique de solidification équiaxe de mélanges binaires. In : Congrès Français de Mécanique (CFM05).

Roux, P., Gobin, D., Goyeau, B., Fichot, F., & Quintard, M. 2005d. Solidification équiaxe de mélanges binaires. Influence du non-équilibre chimique local et des propriétés effectives de transport. In : Congrès Français de Thermique (SFT2005).

Meekunnasombat, P., Fichot, F., & Quintard, M. 2006. Numerical simulation of two-phase flow in severely damaged core geometries. In: Proceedings of ICONE 14, 14th International Conference on Nuclear Engineering. ASME, Miami (USA).

### **7.3 Carrière**

Après une formation d'ingénieur généraliste à l'École Centrale Paris, terminée en 1989, j'ai obtenu un DEA en Énergétique et transferts thermiques puis une thèse de doctorat en Énergétique en 1994 (à l'ECP également, sous la direction de Sébastien Candel et Denis Veynante). Le sujet de cette thèse portait sur l'allumage d'une flamme de diffusion turbulente, dans le contexte des moteurs-fusées cryotechniques.

Lors de cette thèse j'ai abordé la modélisation de la combustion turbulente à l'aide d'une approche faisant intervenir la densité d'aire interfaciale de la zone de réaction, pour laquelle il est possible d'écrire une équation de bilan. Cette approche est justifiée



dans le cas où la zone de réaction est très mince devant les petites échelles de la turbulence. Mon travail a d'abord consisté à démontrer que ce modèle était capable de prédire la propagation d'une flamme turbulente dans un pré mélange (Fichot *et al.*, 1993). Ensuite, j'ai validé le modèle à partir d'images instantanées de flammes de diffusion hydrogène-air (images obtenues par fluorescence induite sur le radical OH). Une moyenne sur un grand nombre d'images a permis de déterminer la densité de surface de flamme et de faire des comparaisons avec le modèle (Fichot *et al.*, 1994b). Enfin, j'ai étendu le modèle afin qu'il puisse traiter simultanément les flammes de pré mélange et de diffusion, puisque l'allumage d'une flamme de diffusion se fait toujours dans une zone prémélangée éloignée du brûleur. Ce modèle étendu a été validé sur une expérience d'allumages successifs de six brûleurs hydrogène-air situés dans un même canal (Candel *et al.*, 1996).

J'ai également fait un séjour de 16 mois au Jet Propulsion Laboratory de la NASA à Pasadena (USA). Sous la direction de J. Bellan, j'ai étudié l'évaporation et la combustion d'un nuage de gouttes de combustible, en proposant en particulier des modélisations pour les situations où le nuage se trouve entraîné dans un vortex ou bien dans une zone de mélange (Fichot *et al.*, 1994c, 1994a). Ces modélisations reposent sur une description du nuage de gouttes comme un milieu «périodique» composé de sphères liquides (gouttes) entourées de gaz. L'extension de la sphère de gaz (« sphère d'influence ») détermine la position où sont définies les conditions aux limites dont dépend le taux d'évaporation. L'interaction avec la turbulence (vortex ou zone de mélange) est traduite par le bilan de quantité de mouvement du nuage. Lorsqu'il rentre dans un vortex, le nuage subit une force de traînée de la part du gaz en rotation. Cela permet d'estimer l'expansion du nuage de gouttes et l'influence de la turbulence sur l'évaporation et la combustion.

Les deux thèmes évoqués au dessus étant assez éloignés de mon activité de recherche actuelle, ils ne seront pas abordés dans ce rapport mais toutes les références figurent dans la liste des publications (jointe au CV). En annexe, on trouvera également une publication sur une partie de mon travail de thèse (Fichot *et al.*, 1994b)

En entrant à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN, à l'origine IPSN), j'ai changé de thème de recherche. Depuis 1994, mon activité consiste à développer des modèles permettant de comprendre, prévoir et simuler le comportement d'un réacteur nucléaire à eau sous pression en situation accidentelle. Ces travaux de modélisation s'effectuent à deux niveaux distincts. D'une part, des modèles aussi précis que possible sont développés dans le cadre de travaux de thèses ou de post-docs. D'autre part, des modèles, généralement plus simples et moins pénalisants en temps de calcul, sont développés pour être intégrés dans un code de calcul nommé ICARE/CATHARE. Ce code est destiné à servir d'outil d'analyse pour estimer les conséquences d'un accident grave sur un réacteur ou pour améliorer les procédures de gestion d'un accident.

## 7.4 Objectifs

Une partie de mon travail consiste à assurer un transfert entre les résultats des travaux de recherche et les modèles utilisables dans un code de calcul industriel. Ce transfert peut se décomposer en trois étapes : l'interprétation de résultats expérimentaux, la proposition de modèles détaillés puis la proposition de modèles plus simples garantissant néanmoins une précision acceptable. Cette précision peut être évaluée à partir de comparaisons avec des résultats expérimentaux ou bien des résultats obtenus à partir des modèles détaillés. Les travaux de recherche que

j'encadre consistent principalement à élaborer ces modèles détaillés. Comme on le verra plus loin, la thématique générale est celle des écoulements en milieu poreux, avec changement de phase. J'essaie de développer une approche cohérente de différents phénomènes tels que l'ébullition en milieu poreux, la coulée d'un liquide dans un milieu poreux (avec dissolution éventuelle du milieu) et la solidification d'un mélange multi-constituants sous forme de structures poreuses (dendrites ou amas de cristaux). Le formalisme général est celui des moyennes volumiques. Il permet une transposition assez directe à des modèles (simplifiés ou pas) utilisables dans nos codes de calcul « industriels ». L'avantage d'utiliser un formalisme unique est d'accumuler de l'expérience d'une thèse à l'autre et de bénéficier de développements réutilisables (approches théoriques, outils de résolution, outils de simulation directe, etc. ). Il y a bien sûr des inconvénients évidents à se cantonner à ce formalisme pour développer des modèles. Cependant, la taille limitée de notre équipe ne nous permet pas d'explorer trop de voies de recherche simultanément. En effet, seuls deux permanents consacrent une partie de leur temps aux activités de recherche avec une moyenne de deux à trois étudiants par an sur les dernières années (doctorants ou post-docs).

Dans le cadre de ces travaux, des collaborations ont été mises en place avec plusieurs universités françaises ou européennes. On peut citer en particulier l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT), le laboratoire FAST de l'Université Paris 6, le laboratoire EM2C de l'École Centrale Paris ainsi que les universités de Stuttgart et Madrid. Ces partenaires universitaires, en partageant leurs connaissances et en portant un regard différent sur les phénomènes physiques que nous traitons apportent à nos travaux de recherche une contribution particulièrement appréciable. On voit ainsi que le principal avantage de mener une telle activité de recherche au sein de l'IRSN est de s'assurer que nos compétences sont à un niveau suffisamment élevé pour garantir la qualité du développement de nos codes de calcul.

L'activité de recherche permet aussi, par l'intermédiaire des publications nationales et internationales, de contribuer à la notoriété de notre laboratoire (et plus généralement de l'IRSN) ce qui se traduit par une image plus attractive vis-à-vis des étudiants et des partenaires extérieurs et une crédibilité renforcée vis-à-vis des instances qui nous financent (gouvernement, CEE, organismes étrangers).

Pour consolider cette activité de recherche, l'obtention de l'Habilitation à diriger des recherches est une étape importante puisqu'elle concrétise la reconnaissance des résultats obtenus jusqu'à maintenant. Au delà de la valeur symbolique de ce diplôme, j'y vois surtout une motivation à explorer de manière plus approfondie les domaines déjà abordés et à renforcer les liens et les échanges avec nos partenaires extérieurs (universités, CEA, etc. ). C'est donc pour cela que je sou mets ce dossier qui présente des travaux de recherche effectués lors des 10 dernières années.



## 8 RÉFÉRENCES

---

Armstrong, D.R., Cho, D.H., Bova, L., Chan, S.H., & Thomas, G.R., 1981. Quenching of a high temperature particle bed, Transactions of the American Nuclear Society, 39, 1048--1049.

Armstrong, D.R., Cho, D.H., & Bova, L., 1982. Formation of dry pockets during water penetration into a hot particle bed, Transactions of the American Nuclear Society, 39, 418-419.

Asmolov, V., Abalin, S., Merzliakov, A. & Ignatochkin, A., 1998. Property measurements of 75 NaBF<sub>4</sub> + 25 NaF salt composition, Tech. rept. OECD.

Asmolov, V., Abalin, S., Degaltsev, Yu., Strizhov, V. & Shakh, O., 2000, RASPLAV final report: Behaviour of the corium melt pool in LWR lower head with external cooling, Tech. rept. Kurtchatov Institute.

Atkhen, K., & Berthoud, G., 2003. Experimental and numerical investigations on debris bed coolability in a multidimensional and homogeneous configuration with volumetric heat source, Nuclear Technology, 142.

- Barrère, J., Gipouloux, O., & Whitaker, S., 1992. On the Closure Problem for Darcy's Law. *Transport in Porous Media*, 7, 209–222.
- Batsale, J.C., Gobbé, C., & Quintard, M., 1996. Local Non-Equilibrium Heat Transfer in Porous Media. *Recent Research Developments in Heat, Mass & Momentum Transfer*, 1, 1–24.
- Béchaud, C., Duval, F., Fichot, F., Quintard, M., & Parent, M., 2001 (April). Debris bed coolability using a 3-D two phase model in a porous medium. In : *Proceedings of ICONE 9, 9 International Conference on Nuclear Engineering*.
- Beckermann, C. & Viskanta, R., 1988. Double-Diffusive Convection during Dendritic Solidification of a Binary Mixture, *PhysicoChemical Hydrodynamics*, 10, 195-213.
- Beckermann, C. & Viskanta, R., 1993. Mathematical Modeling of Transport Phenomena during Alloy Solidification, *Applied Mechanics Review*, 46(1), 1-27.
- Bennon, W.D. & Incropera, F.P., 1987. A Continuum Model for Momentum, Heat and Species Transport in Binary Solid-Liquid Phase Change Systems-I. Model Formulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(10), 2161-2170.
- Bousquet-Mélou, P., 2000. Modélisation macroscopique et simulation numérique de la solidification des mélanges binaires. Thèse de Doctorat, Université Paris 6.
- Bousquet-Mélou, P., Goyeau, B., Quintard, M., Fichot, F., & Gobin, D., 2002. Average momentum equation for interdendritic flow in a solidifying columnar mushy zone. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 45(17).
- Bousquet-Mélou, P., Neculae, A., Goyeau, B., & Quintard, M., 2002. Averaged solute transport during solidification of a binary mixture : active dispersion in dendritic structures. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33B(3), 365–376.
- Brewster, M.Q., 1992. *Thermal radiative transfer and properties*, Wiley-Interscience Publication, New York.
- Broughton, J.M., Kuan, P., Petti, D.A., & Tolman, E.L., 1989. A scenario of the Three Mile Island unit 2 accident. *Nuclear Technology*, 87, 34–53.
- Candel, S.M., Veynante, D., Fichot, F., & Thévenin, D., 1996. Modélisation des problèmes d'allumage. In : Larrouturou, B. (ed), *Images des Mathématiques*, vol. Modélisation de la Combustion. CNRS.
- Chella, R., Lasseux, D., & Quintard, M., 1998. Multiphase, Multicomponent Fluid Flow in Homogeneous and Heterogeneous Porous Media. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 53(3), 335–346.
- Cho, D.H., Armstrong, D.R. & Chan, S.H., 1984. On the pattern of water penetration into a hot particle bed, *Nuclear Technology*, 65, 23-31.

Cox, R.L., 1976. Radiative heat transfer in arrays of parallel cylinders. Thèse de doctorat, University of Tennessee, Knoxville.

David, S.A., Babu, S.S. & Vitek, J.M., 2003. Welding : Solidification and Microstructure, JOM, 55(6).

Décossin, E., 2000. Ebullition et Assèchement dans un Lit de Particules avec Production Interne de Chaleur : Premières Expériences et Simulations Numériques en Situation Multidimensionnelle. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse.

Dosanjh, S.S., 1989. Melt propagation in porous media, Int. J. Heat Mass Transfer, 32(7).

Duval, F., 2002. Modélisation du renoyage d'un lit de particules : contribution à l'estimation des propriétés de transport macroscopiques. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Duval, F., Fichot, F. & Quintard, M., 2001. Diffuse interface methods for two-phase flow in porous media. In : Trends in Numerical and Physical Modelling for Industrial Multiphase Flows.

Duval, F., Béchaud, C., Fichot, F. & Quintard, M., 2002. Evaporation in porous media : a comprehensive non-equilibrium model, In : International Heat Transfer Conference (IHTC 2002).

Duval, F., Fichot, F. & Quintard, M., 2004. A local thermal non-equilibrium model for two-phase flows with phase change in porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(3), 613–639.

Ederli, S., 2001. Validation of the ICARE2 V3mod1.0 late phase models against ACRR MP-1 and DC-1 experiments. Note Technique SEMAR 01/50. IPSN.

Fichot, F., Veynante, D., Lacas, F., & Candel, S.M. 1993. One-dimensional study of the propagation of a turbulent premixed flame with a flame surface density model. Combustion Science and Technology, 48, 1.

Fichot, F., Harstad, K., & Bellan, J., 1994a. Entrainment and evaporation of drops in the laminar part of a developing mixing layer. Page 397 of : Proceedings of the 25th Symposium (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, Irvine (USA).

Fichot, F., Delhaye, B., Veynante, D., & Candel, S.M., 1994b. Strain rate modeling for a flame surface density equation with application to non-premixed combustion. Pages 1273–1281 of : Proceedings of the 25th Symposium (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, Irvine (USA).

Fichot, F., Harstad, K., & Bellan, J., 1994c. Unsteady evaporation and combustion of a drop cluster inside a vortex. Combustion and Flame, 95, 5.

Fichot, F., Ortega-Bernardo, M., & Lefèvre, B., 1999. Melt relocation through a rod bundle. Note Technique SEMAR 99/34. IPSN.

Fichot, F., Kobzar, V., Zvonarev, Yu. & Bousquet-Mélou, P., 2000. The Use of RASPLAV results in IPSN severe accident research program. In: OECD-NEA (ed), Proceedings of RASPLAV Seminar.

Fichot, F., Chatelard, P., Barrachin, M., Guillard, V., Mélis, S. & Zabiégo, M., 2001. ICARE/CATHARE a computer code for analysis of severe accidents in LWRs - ICARE2 V3mod1 - Description of the physical models. Note Technique SEMAR 00/03. IPSN.

Fichot, F., Adroguer, B., Volcheck, A., & Zvonarev, Yu., 2004. Advanced treatment of zircaloy cladding high temperature oxidation in severe accident code calculations - Part III. Verification against representative transient tests. Nuclear Engineering and Design, 232, 97–109.

Fichot, F., Duval, F., Meekunnasombat, P., Garcia, A., Belloni, J., & Quintard, M., 2005. The use of a diffuse interface model to estimate effective transport properties for two-phase flows in porous media. In : 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Fichot, F., Duval, F., Trégourès, N., Béchaud, C., & Quintard, M., 2006. The impact of thermal non equilibrium and large scale 2D/3D effects on debris bed reflooding and coolability. Nuclear Engineering and Design, 236, 2144–2163.

Ganesan, S. & Poirier, D.R., 1990. Conservation of Mass and Momentum for the Flow of Interdendritic Liquid during Solidification, Metallurgical Transactions B, 21B, 173--181.

Garnier, N., 1994. Modélisation des lits de débris pouvant apparaître lors d'un accident grave survenant sur un réacteur à eau pressurisée. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 2.

Gasser, R.D., Gauntt, R.O., Bourcier, S.C., Schmidt, R.C., Humphries, L.L. & Reil, K.O., 1997. Late-phase melt progression experiment: MP-2 - Results and analysis. NUREG/CR-6167. Sandia National Laboratory.

Ginsberg, T., 1982. Transient core debris bed heat removal experiments and analysis, In: International Meeting on Thermal Nuclear Reactor Safety.

Ginsberg, T., 1985. Analysis of influence of steam superheating on packed bed quench phenomena, In: International Meeting on Heat Transfer Conference.

Ginsberg, T., Klein, J., Klages, J., Sanborn, Y., Schwarz, C.E., Chen, J.C. & Wei, L., 1986. An experimental and analytical investigation of quenching of superheated debris beds under top-reflood conditions. Tech. rept. NUREG-CR-4493. Sandia National Labs.

Gonzalez, R., Chatelard, P., Fichot, F. & Jacq, F., 1997. ICARE2 : A computer program for severe core damage analysis in LWRs. Tech. rept. 97-12. IPSN.

Goyeau, B., Bousquet-Mélou, P., Gobin, D., Quintard, M., & Fichot, F., 2004. Macroscopic modeling of columnar dendritic solidification. *Computational and Applied Mathematics*, 23(2-3), 381–400.

Gray, W.G., 1975. A Derivation of the Equations for Multi-Phase Transport. *Chemical Engineering Science*, 30, 229–233.

Hardee, H.C., & Nilson, R.H., 1977, Natural convection in porous media with heat generation. *Nuclear Science and Engineering*, 63, 119-132.

Hebditch, D.J. & Hunt, J.D., 1974. Observations of ingot macrosegregation on model systems. *Metallurgical Transactions*, 5, 1557-1564.

Hottel, H.C. & Sarofim, A.F., 1967. *Radiative transfer*, New York: McGraw-Hill Book Company.

Kaviany, M., 1995. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. 2nd edn., Springer-Verlag.

Konovalikhin, M.J., Yang, Z.L., Amjad, M. & Seghal, B.R., 2000. On dry-out heat flux of particle debris beds with a downcomer, In: *Proceedings of ICONE 8, 8th International Conference on Nuclear Engineering*.

Kurz, W. & Fisher, D.J., 1989. *Fundamentals of Solidification*, Trans Tech Publications.

Le Roy, M. & Zabiégo, M., 2001. Validation of the ICARE2 V3mod0 software against the ACRR MP-2 experiment. Tech. rept. 01-27. IPSN.

Lee, D.O. & Nilson, R.H., 1977. Flow visualization in heat generating porous media. Tech. rept. SAND76-0614. Sandia National Labs.

Lipinski, R.J., 1984. A coolability model for post-accident nuclear reactor debris. *Nuclear Technology*, 65, 53-66.

Magallon, D., 1997. The FARO program recent results and synthesis, In: *Proceedings of CSARP Meeting*.

Marle, C., 1967. Ecoulements Monophasiques en Milieu Poreux. *Revue de L'Institut Français du Pétrole*, XXII(10), 1471–1509.

Marle, C.M., 1982. On Macroscopic Equations Governing Multiphase Flow with Diffusion and Chemical Reactions in Porous Media. *International Journal of Engineering Science*, 20(5), 643-662.



- Mayr, P., Burger, M., Buck, M., Schmidt, W. & Lohnert, G., 1998. Investigations on the Coolability of Debris in the Lower Head with WABE-2D and MESOCO-2D. OECD/CSNI Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability.
- Mazza, G.D., Berto, C.A. & Barreto, G.F., 1991. Evaluation of radiative heat transfer properties in dense particulate media, *Powder Technology*, 67, 137--144.
- Mudawar, I. & Houpt, R.A., 1993. Mass and momentum transport in smooth falling liquid films laminarized at relatively high Reynolds numbers, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36(14), 3437--3448.
- Mudawar, I., & Houpt, R.A., 1993. Measurement of mass and momentum transport in wavy laminar falling liquid films, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36(17), 4151--4162.
- Ni, J., & Beckermann, C., 1991. A volume-Averaged Two-Phase Model for Transport Phenomena during Solidification. *Metallurgical Transactions B.*, 22B, 349—361.
- Ortega-Bernardo, M., & Fichot, F., 2000 (April). Post-test calculations of FPT1 test using ICARE2 V3MOD0 code : an alternative scenario. In : *Proceedings of ICONÉ 8, 8th International Conference on Nuclear Engineering.*
- Ozisik, N., 1973. *Radiative transfer and interaction with conduction and Convection.* Wiley-Interscience Publication.
- Petit, F., 1998. *Ebullition en Milieu Poreux et Renoyage d'un Lit de Débris de Réacteur Nucléaire.* Thèse de doctorat, ENSAM, Bordeaux.
- Petit, F., Fichot, F. & Quintard, M., 1999. Ecoulement Diphasique en Milieux Poreux : Modèle à Non-Equilibre Local. *Int. J. Therm. Sci.*, 38, 239--249.
- Plumb, O., & Whitaker, S., 1988. Dispersion in heterogeneous porous media 1. Local volume averaging and large-scale averaging. *Water Resources Research*, 24(7), 913–926.
- Prescott, P.J., Incropera, F.P. & Bennon, W.D., 1991. Modeling of dendritic solidification systems: reassessment of the continuum momentum equation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(9), 2351-2359.
- Quillet, G., 2003. *Influence de la convection, naturelle ou forcée, sur l'apparition des macroségrégations lors de la solidification d'alliages métalliques.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Quintard, M., & Whitaker, S., 1988. Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media : The Method of Large Scale Averaging. *Transport in Porous Media*, 3, 357–413.
- Quintard, M., & Whitaker, S., 1994. Convection, Dispersion, and Interfacial Transport of Contaminants : Homogeneous Porous Media. *Advances in Water Resources*, 17, 221–239.

Quintard, M., & Whitaker, S., 1994. Transport in Ordered and Disordered Porous Media II : Generalized volume Averaging. *Transport in Porous Media*, 14, 179–206.

Quintard, M., & Whitaker, S., 1994. Transport in Ordered and Disordered Porous Media III : Closure and Comparison Between Theory and Experiment. *Transport in Porous Media*, 15, 31–49.

Quintard, M., & Whitaker, S., 1995. Local Thermal Equilibrium for Transient Heat Conduction : Theory and Comparison with Numerical Experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(15), 2779–2796.

Quintard, M., Kaviany, M., & Whitaker, S. 1997. Two-Medium Treatment of Heat Transfer in Porous Media : Numerical Results for Effective Properties. *Advances in Water Resources*, 20(2-3), 77–94.

Repetto, G. & Ederli, S., 2005, Analysis of the FPT0 and FPT2 Phébus FP experiments using porous medium geometry with the ICARE2 code. In: 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Ridder, S.D., Kou, S. & Mehrabian, R., 1981, Effect of Fluid Flow on Macrosegregation in Axi-Symmetric Ingots. *Metallurgical Transactions B*, 12B, 435--447.

Roux, P. 2005. Modélisation de la solidification équiaxe de mélanges binaires. Thèse de doctorat, Université Paris 6.

Roux, P., Gobin, D., Goyeau, B., Fichot, F., & Quintard, M., May 2005. Macroscopic model for equiaxed solidification of binary mixtures. In : 4th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer (ICCHMT'05).

Roux, P., Fichot, F., De Pierrepont, S., Gobin, D., Goyeau, B., & Quintard, M., 2005. Modelling of binary mixture phase change : Assessment on RASPLAV-SALT experiments. In : 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Roux, P., Goyeau, B., Gobin, D., Fichot, F. & Quintard, M., 2006, Chemical non-equilibrium modelling of columnar solidification. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49(23-24), 4496--4510.

Rubiolo, P., 2000. Modélisation du transfert thermique dans un milieu poreux : application aux réacteurs nucléaires en situation accidentelle. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille I.

Rubiolo, P. & Gatt, J.M., 2002. Modeling of the radiative contribution to heat transfer in porous media composed of spheres or cylinders. *Int. J. Therm. Sci.*, 41, 401–411.

Salay, M., & Fichot, F., 2005. Modelling of metal-oxide corium stratification in the lower plenum of a reactor vessel. In : 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11).

Schmidt, R.C., 1993. MERIS : a model for melt relocation in core structures of nuclear reactors during severe accident conditions. Tech. rept. NRC FIN L-2452. Sandia National Laboratories.

Schmidt, R.C., & Gasser, R.D., 1997. Models and correlations of the DEBRIS late-phase melt progression model. Tech. rept. SAND93-3922. Sandia National Laboratories.

Seiler, J.M., & Froment, K., 2000. Material effects in late phases of severe accidents. *Multiphase Science and Technology*, 12, 117–257.

Siegel, R. & Howell, J.R., 1972. *Thermal Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill.

Singh, B.P. & Kaviany, M., 1991. Independent Theory Versus Direct Simulation of Radiative Heat Transfer in Packed Beds. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34, 2869--2881.

Sohal, M.S., 1986. A Radiation Heat Transfer Model for the SCDAP Code. *Nuclear Technology*, 75, 196-204.

Strieder, W., 1997. Radiation Heat Transport in Disordered Media. *Advances in Water Resources*, 20(2-3), 171-187.

Suh, K.Y., & Henry, R.E., 1996. Debris interactions in reactor vessel lower plena during severe accidents - I Predictive model. *Nuclear Engineering and Design*, 166, 147–163.

Surenkov, A., Abalin, S., Gnidoi, I., Barkovsky, B., Komissarova, N. & Chuvilin, D., 1998. The Database for the seventh S2-1 series of salt experiments under the RASPLAV project. Tech. rept. OECD.

Szekely, J. & Jassal, A.S., 1978. An Experimental and Analytical Study of the Solidification of a Binary Dendritic System. *Metalurgical Transactions B*, 9B, 389-398.

Tancrez, M. & Taine, J., 2004. Direct Identification of Absorption and Scattering Coefficients and Phase Function of a Porous Medium by a Monte Carlo Technique. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47, 373-383.

Tien, C.L., 1988. Thermal Radiation in Packed and Fluidized Beds. *ASME J. Heat Transfer*, 110, 1230-1242.

Tien, C.L. & Drolen, B.L., 1988. Thermal Radiation in Particulate Media with Dependent and Independent Scattering. *Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 1, 1-32.

Trégourès, N., Fichot, F., Duval, F., & Quintard, M., 2003. Multi-dimensional numerical study of core debris bed reflooding under severe accident conditions. In : 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10).

Tutu, N.K., Ginsberg, T., Klein, J., Klages, J. & Schwarz, C.E., 1984. Debris bed quenching under bottom flood conditions. Tech. rept. NUREG/CR-3850. Sandia National Labs.

Veshchunov, M.S. & Palagin, A.V., 1997. Modelling of chemical interactions of fuel rods at high temperatures - Part II - Investigation of downward relocation of molten materials. *J. Nucl. Mater.*, 252, 110.

Viskanta, R., Chellailah, S., & Moallemi, M., 1987 (November). Thermal Analysis of Core Barrel Heating and Coolant Recirculation During Core Uncovery in PWR Accidents. NP 5586. EPRI.

Voller, V.R., Brent, A.D. & Prakash, C., 1989. The Modelling of Heat, Mass and Solute Transport in Solidification Systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(9), 1719-1731.

Vortmeyer, D., 1978. Radiation in packed solids, In: 6th International Heat Transfer Conference.

Whitaker, S., 1969. Advances in Theory of Fluid Motion in Porous Media. *Industrial and Engineering Chemistry*, 61(12), 14–28.

Whitaker, S., 1980. Radiant energy transport in porous media. *Industrial Engineering Chemistry Fund.*, 19, 210–218.

Whitaker, S., 1986. Flow in Porous Media II : The Governing Equations for Immiscible, Two-Phase Flow. *Transport in Porous Media*, 1, 105–125.

Whitaker, S., 1986. Flow in Porous Media I : A Theoretical Derivation of Darcy's Law. *Transport in Porous Media*, 1, 3–25.

Whitaker, S., 1996. The Forchheimer Equation : a Theoretical Development. *Transport in Porous Media*, 25, 27–61.

Worster, M.G., 1991. Natural Convection in a Mushy Layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 224, 335–359.

Wright, R.W., 1996. Core Melt Progression : Status of Current Understanding and Principal Uncertainties. In : Rogers, J.T. (ed), *Heat and Mass Transfer in Severe Nuclear Reactor Accidents*.

Zabiégo, M., Fichot, F. & Rubiolo, P., 2006. Modeling of radiative heat transfer during a PWR severe accident. *Nuclear Technology*, 154(2), 194–214.

Zanotti, F. & Carbonell, R.G. 1984. Development of Transport Equations for Multiphase Systems-I. *Chemical Engineering Science*, 39(2), 263–278.



## 9 BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE

---

Dans cette partie figurent des références issues des travaux de recherches décrits dans ce document. Elles permettent d'approfondir certains points et donnent une vision plus large des résultats obtenus et de leurs applications.

### Chapitre 1

Fichot F., Delhay B., Veynante D. and Candel S.M.. «Strain rate modeling for a flame surface density equation with application to non-premixed turbulent combustion». In Proc. of 25th Symposium (International) on Combustion, pp. 1273-1281, The Combustion Institute (1994).

Fichot, F., Veynante, D., Lacas, F., & Candel, S.M., 1993. One-dimensional study of the propagation of a turbulent premixed flame with a flame surface density model. *Combustion Science and Technology*, 48, 1.

Fichot, F., Harstad, K., & Bellan, J., 1994a. Entrainment and evaporation of drops in the laminar part of a developing mixing layer. Page 397 of: Proceedings of the 25th Symposium (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, Irvine (USA).

Fichot, F., Harstad, K., & Bellan, J., 1994c. Unsteady evaporation and combustion of a drop cluster inside a vortex. *Combustion and Flame*, 95, 5.

Candel, S.M., Veynante, D., Fichot, F., & Thévenin, D., 1996. Modélisation des problèmes d'allumage. In : Larroutou, B. (ed), *Images des Mathématiques*, vol. Modélisation de la Combustion. CNRS.

## Chapitre 2

Zabiégo, M., Fichot, F. and Rubiolo, P., 2006. Modelling of radiative heat transfer during a PWR severe accident. *Nuclear Technology*, Vol. 154(2), pp. 194-214.

Rubiolo, P., 2000. Modélisation du transfert thermique dans un milieu poreux : application aux réacteurs nucléaires en situation accidentelle. Ph.D. thesis, Université d'Aix-Marseille I.

Rubiolo, P., & Gatt, J.M., 2002. Modeling of the radiative contribution to heat transfer in porous media composed of spheres or cylinders. *Int. J. Therm. Sci.*, 41, 401-411.

## Chapitre 3

Ortega Bernardo M. and Fichot F., 2000. Post-test calculation of FPT1 test using ICARE2 V3Mod0 : an alternative scenario. *Proceedings of ICON-8, Baltimore (USA)*.

## Chapitre 4

Goyeau B., Bousquet-Mélou P., Gobin D., Quintard M. and Fichot F., 2004. Macroscopic modeling of columnar dendritic solidification. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol.23, 2-3, pp. 381-400.

Roux P., De Pierrepont S., Fichot F., Gobin D., Goyeau B. and Quintard M., 2005. Modelling of binary mixture phase change : Assessment on RASPLAV-SALT experiments. *Proceedings of NURETH-11 Conference, Avignon (France)*.

Bousquet-Mélou, P. 2000. Modélisation macroscopique et simulation numérique de la solidification des mélanges binaires. Thèse de doctorat, Université Paris 6.

Bousquet-Mélou, P., Goyeau, B., Quintard, M., Fichot, F., & Gobin, D., 2002a. Average momentum equation for interdendritic flow in a solidifying columnar mushy zone. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 45(17).

Bousquet-Mélou, P., Neculae, A., Goyeau, B., & Quintard, M., 2002b. Averaged solute transport during solidification of a binary mixture : active dispersion in dendritic structures. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33B(3), 365-376.

Roux, P., Gobin, D., Goyeau, B., Fichot, F., & Quintard, M., May 2005. Macroscopic model for equiaxed solidification of binary mixtures. In: 4th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer (ICCHMT'05).

Roux, P. 2005. Modélisation de la solidification équiaxe de mélanges binaires. Thèse de doctorat, Université Paris 6.

Roux P., Goyeau B., Gobin D., Fichot F. and Quintard M., 2006. Chemical non-equilibrium modelling of columnar solidification: Validation and influence of effective transport properties. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, 23-24, pp. 4496-4510.

## Chapitre 5

Duval F., Fichot F., and Quintard M., 2004. A local thermal non-equilibrium model for two-phase flows with phase change in porous media. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, 3.

Fichot F., Duval F., Trégourès N., Béchaud C. and Quintard M., 2006. The impact of thermal non-equilibrium and large-scale 2D/3D effects on debris bed reflooding and coolability. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, pp. 2144-2163.

Fichot F., Meekunnasombat P., Belloni J., Duval F., Garcia A. and Quintard M., 2007. Two-phase flows in porous media: Prediction of pressure drops using a diffuse interface mathematical description. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, pp. 1887-1898.

Petit, F., 1998 (avril). Ébullition en Milieu Poreux et Renoyage d'un Lit de Débris de Réacteur Nucléaire. Thèse de doctorat, ENSAM, Bordeaux.

Duval, F., 2002. Modélisation du renoyage d'un lit de particules : contribution à l'estimation des propriétés de transport macroscopiques. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Duval, F., Fichot, F., & Quintard, M., 2001 (septembre). Diffuse interface methods for two-phase flow in porous media. In: *Trends in Numerical and Physical Modelling for Industrial Multiphase Flows*.

Béchaud, C., Duval, F., Fichot, F., Quintard, M., & Parent, M., 2001 (April). Debris bed coolability using a 3-D two phases model in a porous medium. In: *Proceedings of ICONE 9, 9th International Conference on Nuclear Engineering*.

Duval, F., Béchaud, C., Fichot, F., & Quintard, M., 2002. Evaporation in porous media: a comprehensive non-equilibrium model. In: *International Heat Transfer Conference (IHTC 2002)*.

Trégourès, N., Fichot, F., Duval, F., & Quintard, M., 2003. Multi-dimensional numerical study of core debris bed reflooding under severe accident conditions. In : *10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10)*.

Meekunnasombat, P., Fichot, F., & Quintard, M., 2006. Numerical simulation of two-phase flow in severely damaged core geometries. In: *Proceedings of ICONE 14, 14th International Conference on Nuclear Engineering*. ASME, Miami (USA).



