

5.3. Phénomènes pouvant mener à une défaillance différée de l'enceinte de confinement : l'interaction corium-béton (ICB)

5.3.1. Introduction

En cas de défaillance de la cuve lors d'un accident de fusion du cœur, le corium résultant de cette fusion du cœur et de la fusion des structures internes se répand sur le radier en béton du puits de cuve. La mise en contact du corium et du béton conduit à ce que l'on appelle l'interaction corium-béton (ICB⁹). Cette interaction se traduit par une érosion progressive du béton du radier (figure 5.36) et des parois du puits de cuve pouvant entraîner la traversée du radier et, par là, un relâchement de produits radioactifs à l'extérieur de l'enceinte de confinement dans le sous-sol. La mise en contact du corium avec l'eau éventuellement présente dans le puits de cuve et dans des locaux adjacents peut, par ailleurs, contribuer à la mise en pression de l'enceinte de confinement par vaporisation de cette eau, voire conduire à une explosion de vapeur (§ 5.2.3). Les gaz résultant des réactions du corium avec le béton contribuent également à accroître la pression dans l'enceinte de confinement. En tenant compte des incertitudes, la durée de traversée du radier en béton serait comprise entre un et plusieurs jours suivant la quantité de corium, son refroidissement éventuel et le type de béton (siliceux ou calcaire). Il est à noter enfin que la production d'aérosols qui accompagne l'ICB influence également l'évolution du comportement des aérosols radioactifs dans l'enceinte de confinement et donc les rejets qui peuvent en résulter.

5.3.2. Phénomènes physiques mis en jeu

La puissance résiduelle dégagée par les produits de fission au sein du corium étalé sur le radier du bâtiment réacteur (20 à 30 MW au début de l'accident pour un REP de 900 MWe) ne peut pas être évacuée par conduction à travers le radier en raison de la très faible conductivité thermique du béton et de sa forte épaisseur ; elle ne peut l'être que partiellement par rayonnement de la surface du corium. Celui-ci, plus ou moins liquide selon sa composition (qui dépend de l'évolution de la dégradation du cœur au cours de l'accident), s'échauffe donc jusqu'à atteindre la fusion, au moins partielle, des matériaux oxydés (UO_2 , ZrO_2) et des métaux en provenance de la cuve (température de l'ordre de 2 200 °C), entraînant la formation d'un bain de corium à une température supérieure à la température de fusion du béton. La chaleur dégagée par les produits de fission est transmise par convection aux frontières du bain de corium et déclenche la fusion des parois en béton du puits de cuve et leur perte d'intégrité par décomposition du béton (ce processus est généralement appelé érosion ou ablation). L'érosion du béton survient à partir de 1 330 °C pour un béton siliceux ou silico-calcaire et à température plus élevée (de plusieurs centaines de degrés) pour un béton calcaire. L'ICB conduit donc, après une phase initiale d'échauffement du corium, à une phase d'érosion continue des parois de béton. Durant cette phase, la puissance résiduelle est dissipée en majeure partie aux interfaces du corium avec le béton par érosion de celui-ci et, pour une partie minoritaire, par rayonnement de la surface du bain de corium (figure 5.36).

9. MCCI pour "Molten Core-Concrete Interaction" en anglais.

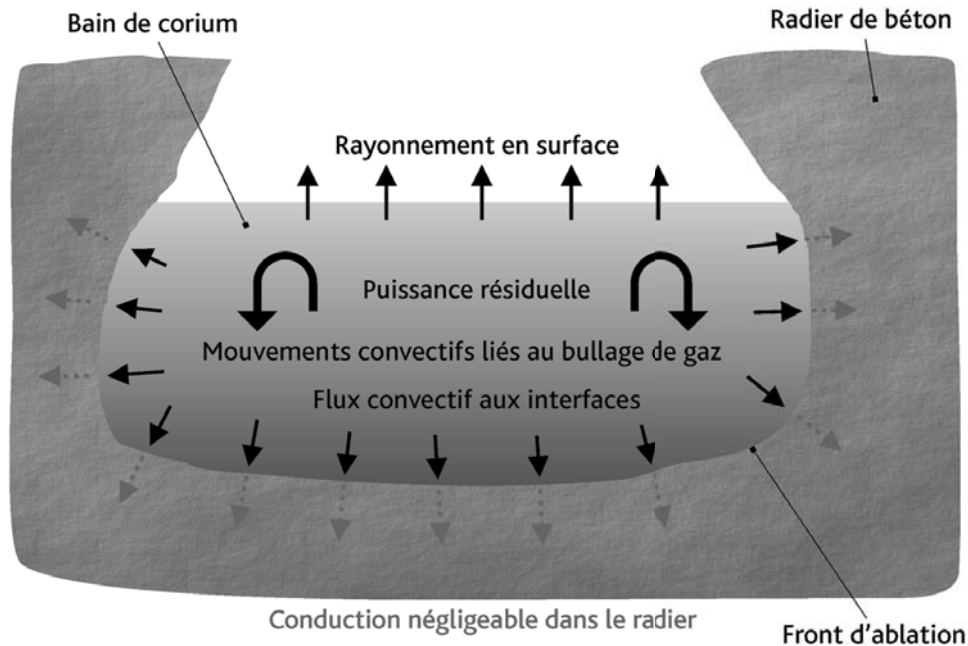


Figure 5.36. Formation d'une cavité par érosion du béton du radier du puits de cuve.

Le béton étant composé majoritairement de SiO_2 , CaCO_3 et H_2O , sa décomposition conduit au relâchement dans le bain de phases condensées (SiO_2 , CaO) et gazeuses (H_2O , CO_2). Le bain de corium contient donc des oxydes lourds en provenance du cœur du réacteur (UO_2 , ZrO_2), des oxydes légers en provenance du béton (principalement SiO_2 et CaO) et des métaux (Fe , Cr , Ni , Zr), le tout étant soumis au brassage induit par les gaz de décomposition du béton. Le mélange des métaux avec des oxydes sous forme condensée ou gazeuse peut donner lieu à des réactions d'oxydation exothermiques et productrices d'espèces gazeuses, telles que H_2 , CO et $\text{SiO}(\text{g})$. Enfin, la mise en contact du corium chaud avec le béton plus froid peut entraîner localement la formation d'une croûte par solidification, des fragments de cette croûte pouvant être mis en suspension dans le corium liquide. Le bain de corium est donc un milieu comportant plusieurs constituants et plusieurs phases (liquide, solide, gaz) dont la composition et les propriétés physiques évoluent constamment au cours de l'ICB du fait de la décomposition du béton et des réactions chimiques.

La vitesse d'érosion des parois verticales et horizontales en béton étant directement corrélée au rapport entre le flux de chaleur reçu par les parois et l'énergie volumique nécessaire à leur érosion, déterminer la vitesse d'érosion de ces parois suppose de calculer la répartition du flux de chaleur aux frontières du bain de corium. Du fait du brassage induit par les gaz, la (ou les) phase(s) liquide(s) constituant le bain produit par l'ICB est (sont) homogène(s), tandis que de forts gradients de température et de concentration peuvent exister aux interfaces (figure 5.37). Le flux de chaleur aux frontières du bain peut alors être évalué à l'aide d'un coefficient d'échange convectif de chaleur (h_{conv}), de la température du bain (T_b) et de la température d'interface (T_i) entre le bain de corium et une couche d'interface séparant le béton du corium

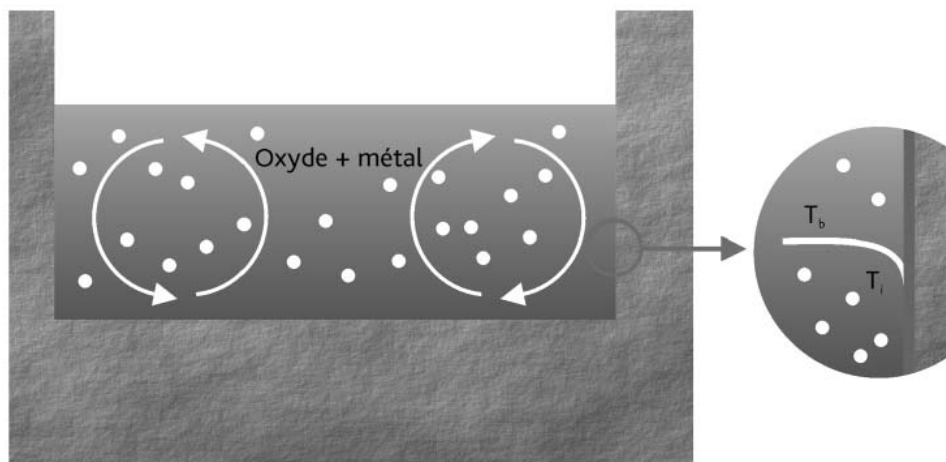


Figure 5.37. Bain oxyde-métal (ox + met) parfaitement mélangé produit par ICB. À droite : gros plan sur l'interface entre le bain et le béton.

(les composition et température de cette couche d'interface sont intermédiaires entre celles du bain de corium et celles du béton ; elle peut être liquide ou solide selon les conditions) ; la température d'interface est fonction de la nature de l'interface entre le corium et le béton (apparition ou non d'une croûte stable). Suivant le débit de gaz relâché par le béton et les densités des phases oxydes et métalliques (qui ne sont que partiellement miscibles), peuvent apparaître des configurations du bain produit par l'ICB comportant une seule couche (oxyde et métal mélangés) ou à deux couches (oxyde et métal stratifiés en fonction de leurs densités respectives). Dans le dernier cas (figure 5.38), la détermination de la température à l'interface et celle du coefficient d'échange de chaleur sont donc nécessaires, non seulement pour l'interface entre les couches et le béton, mais également pour l'interface entre le liquide « oxyde » et le liquide « métallique ».

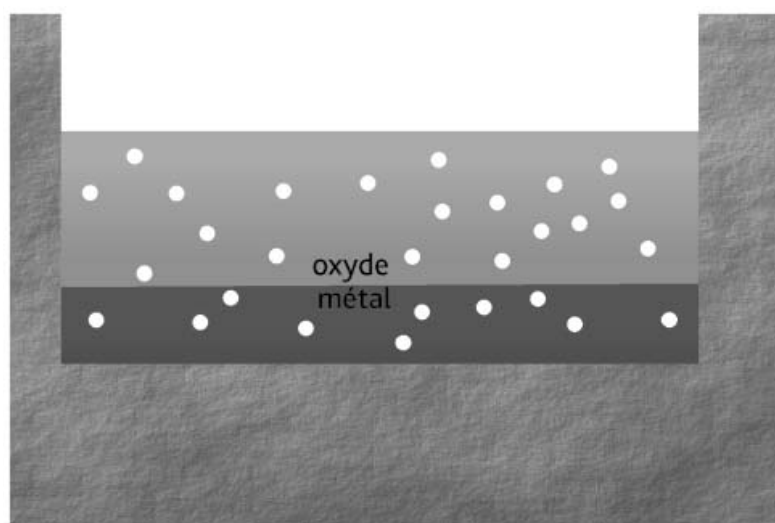


Figure 5.38. Bain produit par ICB en configuration stratifiée.

Pour faciliter la lecture de la suite de ce paragraphe, trois phases de l'ICB sont distinguées, respectivement à court terme, à moyen terme et enfin à long terme. Comme nous le verrons ci-après, le comportement du bain produit pendant l'ICB dépend :

- de ses propriétés physiques de transport (densité, conductivité thermique, chaleur spécifique, viscosité et, dans une moindre mesure, tension de surface liquide-gaz) et de ses propriétés thermochimiques, elles-mêmes fonction de la composition du bain et notamment de la teneur en composés provenant de l'érosion du béton ;
- du flux de chaleur aux interfaces du bain, fonction du volume du bain et donc de la quantité de matière provenant de l'érosion du béton ;
- de la vitesse superficielle des gaz (débit volumique des gaz par unité de surface) le long de l'interface entre le bain et le béton, proportionnelle au flux de chaleur.

Il s'avère donc approprié de distinguer différentes phases de l'ICB en fonction de la teneur du bain en oxydes de béton :

- la phase à court terme correspond à une fraction massique d'oxydes de béton dans le bain inférieure à environ 25 % (en pratique, dans le cas d'un réacteur de puissance cela correspond aux premières heures de l'ICB), avec des propriétés physiques et thermochimiques peu modifiées par rapport à celles des matériaux provenant du cœur et un fort bullage des gaz ;
- la phase à moyen terme correspond à une fraction massique d'oxydes de béton dans le bain plus élevée (jusqu'à environ 50 %), soit, en pratique, dans le cas d'un réacteur de puissance, à la période comprise entre environ 5 et 15 heures après le début de l'ICB, où les propriétés physiques et thermochimiques sont notablement modifiées par rapport à celles des matériaux provenant du cœur mais où le flux de chaleur aux interfaces du bain et le bullage des gaz restent élevés ;
- enfin la phase à long terme correspond à une fraction massique d'oxydes de béton dans le bain supérieure à 50 %, soit, en pratique, dans le cas d'un réacteur de puissance, à la période au-delà de 15 heures après le début de l'ICB, avec un flux de chaleur aux interfaces du bain et un bullage des gaz nettement plus faibles.

5.3.3. Programmes expérimentaux

L'étude de l'interaction corium-béton comprend des expérimentations et de la modélisation. Les expérimentations visent à identifier et à comprendre les phénomènes correspondants (transferts de chaleur, solidification, mélange, etc.) ; elles sont complétées par des études à l'aide de logiciels de simulation qui intègrent des modèles qualifiés sur la base des données expérimentales.

Les essais dédiés à l'étude de l'interaction corium-béton peuvent être classés en deux catégories :

- les essais à caractère analytique, qui permettent d'étudier à échelle réduite un ou plusieurs phénomènes particuliers à l'aide de matériaux simulants ; ces essais permettent de déterminer certaines grandeurs physiques relatives aux phénomènes étudiés (températures d'interface, coefficients d'échange de chaleur, etc.) ;
- les essais globaux lors desquels sont mesurées les vitesses d'érosion du béton et, pour certains, la température du bain lors de l'interaction corium-béton pour des coriums composés de matériaux simulants (contenant de l'alumine ou de la thermitite) et pour des coriums plus représentatifs de la composition attendue lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance (contenant généralement un mélange $\text{UO}_2 + \text{ZrO}_2$).

5.3.3.1. Essais analytiques

► Coefficients d'échange de chaleur

De nombreux essais analytiques [1-3] visant à déterminer les coefficients d'échange de chaleur entre un bain liquide et une paroi poreuse traversée par du gaz ont été réalisés au cours des années 1980 à 2010. L'examen des résultats de ces différents essais [5] montre que les propriétés physiques des liquides utilisés ont été souvent proches de celles de l'eau et que les données disponibles concernent principalement des parois horizontales. Pour l'eau, les mesures effectuées au cours des différents programmes expérimentaux donnent des résultats voisins pour une même vitesse superficielle des gaz. Les données pour les liquides visqueux (cas d'un corium « enrichi » de composés d'érosion du béton) et les parois verticales sont assez rares [4]. Les résultats d'essais en eau montrent toutefois que les coefficients d'échange de chaleur d'un fluide avec une paroi verticale sont voisins de ceux obtenus pour une paroi horizontale. Le programme expérimental CLARA [6] décrit plus loin a été engagé en 2007 en vue de combler les lacunes de connaissances sur la distribution des coefficients d'échange le long des interfaces du bain, qui influence la répartition des flux de chaleur et l'érosion radiale et verticale du béton en situation d'ICB.

Les résultats relatifs aux coefficients d'échange de chaleur entre deux liquides non miscibles traversés par un gaz (configuration de bain stratifié, voir la figure 5.38) sont encore moins nombreux [7, 8]. L'examen de ces résultats montre notamment une dispersion importante des résultats (environ un facteur 5). Par ailleurs, les essais ne sont pas représentatifs des situations où il y a solidification à l'interface entre le bain et le béton. Cependant les essais ABI [9] réalisés jusqu'en 2008 montrent que l'ordre de grandeur du coefficient d'échange entre deux couches stratifiées d'oxyde et de métal est comparable à celui déterminé à l'aide de la corrélation déduite des essais de Werle [8] et que ce coefficient d'échange entre couches est probablement grand par rapport au coefficient d'échange de chaleur entre un bain liquide et une paroi poreuse mentionné ci-dessus. Ces résultats signifieraient que les transferts de chaleur de la couche d'oxyde vers la couche de métal en configuration stratifiée pourraient favoriser l'érosion de la paroi de béton au contact de la couche métallique (en partie basse, voir la figure 5.38).

Ceci souligne également l'intérêt d'une prédiction fiable de la stratification du bain (phénomènes de mélange et de démixtion).

► Températures d'interface aux frontières d'un bain de corium

Le programme ARTEMIS [10], réalisé par le CEA de 2003 à 2008 est le seul qui a visé à déterminer les températures aux frontières d'un bain de corium. Il a permis d'étudier le couplage entre la physico-chimie et la thermohydraulique grâce aux matériaux simulants mis en œuvre qui sont des sels (LiCl et BaCl_2) dont le diagramme des phases a une allure voisine de celle des espèces rencontrées lors d'une interaction corium-béton dans le cas d'un réacteur de puissance, comme le montre la figure 5.39.

Les essais effectués dans des configurations monodimensionnelles (interface corium-béton horizontale) ont confirmé que, dans des conditions d'essais représentatives de la phase d'ICB à long terme pour un réacteur de puissance en termes de vitesse d'érosion du béton et de bullage des gaz, la température d'interface aux frontières du bain était proche de la température liquidus du bain et que la température du bain décroissait avec la température liquidus du fait de l'enrichissement du bain en composés provenant de l'érosion du béton. Cependant la structure de l'interface apparaît plus complexe que prévu avec la formation au voisinage de l'interface d'une zone solide poreuse hors d'équilibre thermodynamique (c'est-à-dire avec une température d'interface liquide-solide et une composition s'écartant de celles imposées par l'équilibre thermodynamique entre les phases liquide et solide). L'examen des résultats des expériences ARTEMIS 1D [11, 12] montre aussi que, dans des conditions comparables à celles de l'ICB à court et moyen

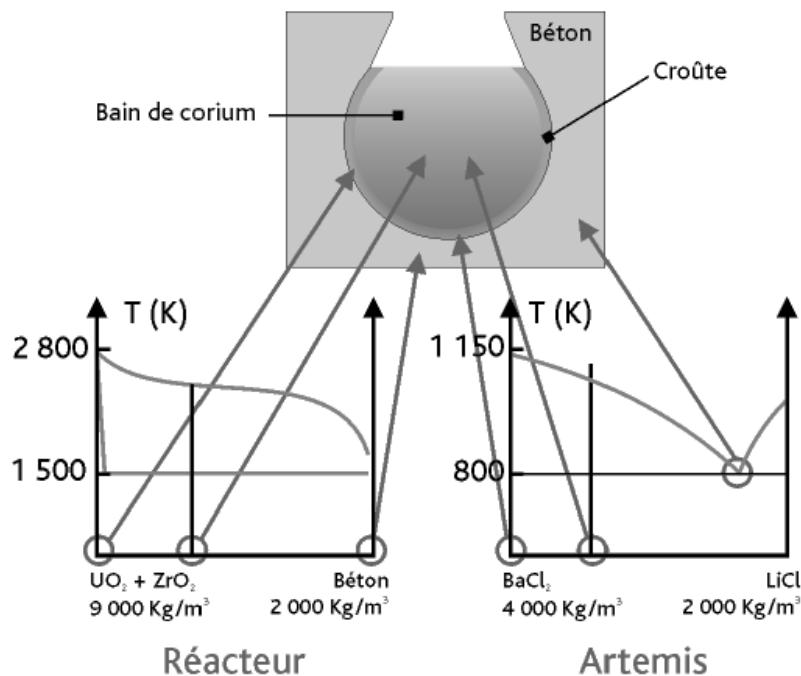


Figure 5.39. Analogie entre les diagrammes de phases des simulants des essais ARTEMIS et ceux des matériaux d'un corium qui se formerait lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance (le sel BaCl_2 simule le comportement réfractaire du corium et le mélange eutectique LiCl-BaCl_2 simule le comportement du béton) [10].

termes dans le cas d'un réacteur de puissance, les résultats ne sont pas compatibles avec une hypothèse d'équilibre thermodynamique : la température de l'interface bain-croûte s'écarte de la température liquidus, le bain devient pâteux en cas de bullage de gaz important, des croûtes se forment à l'interface corium-béton avec une composition moins réfractaire que celle déduite des diagrammes de phases.

Après un premier volet du programme ARTEMIS consacré à des essais avec une érosion purement axiale, le second volet (ARTEMIS 2D) a été consacré à l'étude de configurations avec une érosion du béton bidimensionnelle (dans les directions axiale et radiale) lors d'essais d'interaction corium-béton avec contraste de composition entre bain et béton et d'essais « béton-béton » sans écart de composition entre bain et béton. Les résultats ont montré, pour tous les essais, une érosion importante du béton dans la partie haute des parois latérales en béton, une érosion très faible à l'interface inférieure entre le bain et le béton lors des essais d'interaction béton-béton et la formation d'une croûte pâteuse de corium très épaisse lors des essais d'interaction corium-béton (sur environ un tiers du bain) à l'interface inférieure entre le bain et le béton ; lors des essais, cette croûte est restée chaude et s'est enfoncée dans le béton. Ces résultats inattendus en termes d'érosion du béton (dans tous les cas, une érosion du béton plus importante était attendue dans la partie basse du bain) s'expliquent probablement par un contournement du bain par les gaz injectés en partie basse, en raison de la formation de croûtes stables et étanches à l'interface inférieure entre le bain et le béton ; ces croûtes n'auraient pas laissé passer les gaz pendant une grande partie des essais. À l'échelle d'un réacteur de puissance, il est peu probable qu'une croûte non fissurée de grandes dimensions se forme à l'interface inférieure entre le bain et le béton. Les résultats des essais ARTEMIS 2D ne sont donc pas directement transposables au cas d'un réacteur de puissance ; cependant, ils ont mis en évidence la forte dépendance du profil d'érosion 2D du béton aux conditions d'écoulement des gaz dans le bain.

► Mélange et démixtion de liquides non miscibles traversés par un écoulement de gaz

L'étude du mélange et de la démixtion de liquides non miscibles traversés par un écoulement de gaz a été réalisée dans le but de prédire la configuration du bain de corium au cours de l'ICB (bain mélangé ou stratifié). Les principaux travaux expérimentaux menés sur ce sujet ont été réalisés avec des matériaux simulants aux États-Unis, au laboratoire national d'Argonne [13], à l'université du Wisconsin [14], et plus récemment, au CEA de Grenoble (essais BALISE) [15] ; ils ont été purement hydrodynamiques (pas d'étude des effets de changement de phase). Ils ont visé à déterminer les valeurs limites en termes de vitesse superficielle des gaz (ou de taux de vide) conduisant à un bain mélangé ou stratifié en fonction de la différence de densité entre les liquides. La synthèse des résultats rapportés dans [15] montre une dispersion parfois importante de ces résultats, due partiellement à des différences des propriétés physiques des liquides utilisés. Néanmoins, ces expériences ont clairement montré que la stratification d'un bain de corium ne peut se produire que pour de faibles vitesses superficielles des gaz qui ne sont possibles que lors de la phase à long terme de l'ICB dans le cas d'un réacteur de puissance.

► Propriétés physiques des matériaux

Des essais analytiques avec des matériaux prototypes d'un corium, qui se formerait lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance, ont également été réalisés pour valider et compléter les connaissances sur les propriétés thermophysiques (en particulier la viscosité [21]) et thermochimiques du corium nécessaires à la modélisation des transferts de chaleur et des phénomènes de solidification du bain de corium hors de la cuve. Ces essais ont permis d'améliorer l'évaluation de la viscosité d'un corium formé d'un mélange d'oxydes en fonction de la teneur en silice et celle des températures solidus et liquidus des mélanges corium-béton.

5.3.3.2. Essais globaux

Les essais globaux permettent d'obtenir une vue d'ensemble de l'interaction corium-béton, tous les phénomènes impliqués intervenant alors de façon couplée. Ces essais sont difficiles à réaliser compte tenu des difficultés technologiques associées (très hautes températures, matériaux utilisés, etc.). L'ensemble des essais globaux d'ICB réalisés jusqu'en 2012 est résumé dans le tableau 5.5 ci-dessous.

Tableau 5.5. Synthèse des essais globaux d'ICB.

Programme	Caractéristiques	Masse de corium	Géométrie	Paramètres
SURC (1D)	Matériaux prototypes d'un corium + produits de fission	200 kg	Cylindre d'un diamètre de 0,4 m	Composition du béton, puissance
ACE (1D)	Matériaux prototypes d'un corium + produits de fission	250 à 450 kg	Parallélépipédique 0,5 m x 0,5 m x 0,4 m	Composition du béton, puissance
MACE (1D)	Matériaux prototypes d'un corium injection d'eau	100 à 1 800 kg	Parallélépipédique (0,5 à 1,2 m) x (0,5 à 1,2 m) x 0,4 m	Composition du béton, puissance, débit d'eau
BETA (2D)	Thermite-alumine + fer bain stratifié oxyde-métal	450 kg	Tronconique de diamètre 0,4 m	Composition du béton, puissance
COMET-L (2D)	Thermite-alumine + fer bain stratifié oxyde-métal	920 kg	Cylindre d'un diamètre de 0,6 m	Composition du béton, puissance
MCCI-OCDE (2D)	Matériaux prototypes d'un corium	350 à 550 kg	Parallélépipédique 0,5 m x (0,5 m ou 0,7 m) x 0,6 m	Composition du béton, puissance, géométrie du bain
ARTEMIS 2D	Simulants (sels)	110 kg	Cylindre d'un diamètre de 0,3 m et d'une hauteur de 0,6 m	Puissance, débit de gaz
VULCANO-ICB (2D)	Matériaux prototypes d'un corium	40 kg	Demi-cylindre d'un diamètre de 0,3 m et d'une hauteur de 0,3 m	Composition du béton, puissance

L'interprétation de ces essais globaux est complexe du fait du nombre limité de mesures et de l'imprécision attachée à certaines d'entre elles, de l'évaluation délicate

des pertes thermiques et parfois de la difficulté à quantifier l'influence de certains phénomènes liés au dispositif d'essais et affectant les transferts de chaleur au-dessus du bain : effets du mode de chauffage et effets d'échelle qui peuvent affecter la formation du bain, l'éjection de matière qui modifie l'inventaire de corium participant à l'ICB, l'ancrage de la croûte sur les parois. Malgré ces difficultés, les essais réalisés ont mis en évidence des phénomènes jusqu'alors non identifiés qui peuvent s'avérer importants : la forte influence du type de béton sur la progression de l'érosion axiale et radiale et sur l'éjection de corium lors d'une ICB sous eau au cours des essais MACE ; l'ICB sous eau est présentée plus en détail dans le paragraphe 5.4.2.

D'un point de vue chronologique, les essais 1D avec des oxydes (ACE, MACE, SURC) datent d'une vingtaine d'années, voire plus. Leur analyse a permis d'améliorer la compréhension de l'ICB, de conforter certaines hypothèses sur les modèles de comportement du corium (décroissance de la température du bain voisine de la température liquidus) et de valider partiellement les logiciels de simulation.

Les essais 2D [16, 17], réalisés entre 2003 et 2012 avec des oxydes prototypes d'un corium qui se formerait lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance, ont apporté des informations sur la distribution 2D du flux de chaleur au cours de l'ICB. Les résultats de ces essais tendent à montrer que, tout au moins au début de l'ICB (4 premières heures), l'érosion du béton se ferait préférentiellement dans la direction radiale dans le cas d'un béton siliceux et qu'elle se ferait de manière équivalente dans les directions radiale et axiale dans le cas d'un béton silico-calcaire [18] comme le montre la figure 5.40.

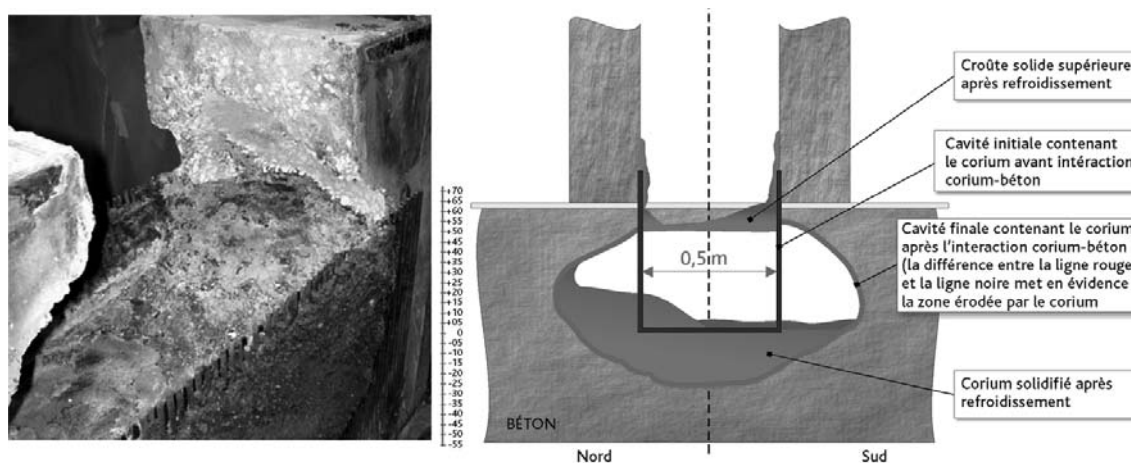


Figure 5.40. Cavité finale obtenue lors de l'expérience MCCI-OCDE CC12 réalisée avec un béton silico-calcaire ; la photo de gauche montre la cavité formée par l'érosion du béton ; celle-ci est représentée en rouge (coupe selon l'axe vertical) sur le schéma de droite.

Les essais mettant en œuvre un béton siliceux indiquent un effet d'échelle possible sur l'anisotropie de l'érosion au cours de la phase initiale de l'ICB. L'analyse et l'interprétation de ces résultats se poursuivent en 2013 pour mieux comprendre l'effet du type de béton sur l'érosion 2D et élaborer un modèle permettant l'extrapolation au cas d'un réacteur de puissance.

Il existe très peu de résultats d'essais réalisés avec des matériaux prototypes d'un corium qui se formerait lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance et avec un chauffage du bain représentatif de la puissance résiduelle d'un corium pour des configurations stratifiées oxyde-métal. Les essais BETA et COMET ont été réalisés avec des matériaux simulants et leur mode de chauffage (par induction) implique que la puissance a été injectée dans la phase métallique alors qu'elle se trouverait dans la phase « oxyde » dans le cas d'un réacteur de puissance. Les essais BETA indiquent une érosion privilégiée du béton dans la direction axiale ; cependant ce comportement n'est pas extrapolable au cas d'un réacteur de puissance pour les raisons évoquées précédemment et parce que la masse de métal est surestimée par rapport au cas d'un réacteur de puissance [19]. Seuls les essais VULCANO réalisés avec une composition en oxydes et en métaux du bain [20] et un mode de chauffage plus représentatifs pourraient permettre de répondre aux questions posées par l'ICB sur l'existence d'une stratification du bain qui pourrait conduire à une vitesse d'érosion axiale rapide, comme l'illustrent les applications au cas d'un réacteur de puissance présentées dans le paragraphe 5.3.5.

5.3.4. Modélisation et logiciels de simulation

5.3.4.1. Les modèles

► Comportement du bain et températures aux interfaces entre le bain et le béton

L'approche la plus ancienne pour déterminer le comportement du bain de corium et les températures aux interfaces entre le bain et le béton lors d'une ICB a consisté à supposer que, si la température moyenne du bain de corium est comprise entre la température liquidus et la température solidus, le bain est dans un état « pâteux », intermédiaire entre une phase solide et une phase liquide. La croûte qui se forme aux interfaces a la même composition que le bain de corium et la même fraction solide que le corium à l'interface bain-croûte. L'interface entre le bain (avec ou sans croûte) et le béton est composée d'un film de béton fondu, appelé en anglais "*slag layer*". La température d'équilibre solide-liquide est alors la température solidus et la totalité de la zone pâteuse est supposée participer aux mouvements de convection près de l'interface solide. Cependant, cette hypothèse ne permet pas de retrouver les évolutions de température mesurées lors de certains essais ACE et MCCI-OCDE.

En 2000, le CEA a élaboré un modèle dit « modèle de ségrégation de phases » pour décrire le comportement du bain de corium lors d'une ICB. Ce modèle est déduit du modèle, couplant la thermohydraulique et la physico-chimie, utilisé pour décrire le comportement du corium dans la cuve [21]. Il y est supposé que le bain est liquide et que des croûtes composées d'éléments réfractaires (UO_2 , ZrO_2) se forment à l'interface entre le bain de corium et le béton. Ces croûtes peuvent être instables. Les mécanismes de formation des croûtes aux interfaces et les mécanismes qui peuvent affecter leur stabilité sont mal connus ; notamment ceux pouvant expliquer les instabilités des croûtes formées aux interfaces avec les parois verticales en béton, la présence de

croûtes lors du contact corium-béton initial, puis à plus long terme la disparition de croûtes même au fond du bain, comme l'indiquent certains examens réalisés après les essais VULCANO avec un bain d'oxydes. Pour les applications aux réacteurs de puissance, compte tenu des durées de l'ICB et des volumes importants du bain, l'existence permanente de croûtes aux interfaces est estimée plausible. Aux interfaces du bain et des croûtes, un équilibre thermodynamique est supposé exister entre les phases physiques présentes, d'une part le liquide du bain, d'autre part le solide des croûtes, avec comme température à l'interface la température liquidus du bain. Si un écart à l'équilibre survient, la ségrégation liquide-solide est partielle ou absente dans le bain qui devient pâteux et la transition bain-croûte pourrait correspondre alors à un seuil de fraction solide au-delà duquel la conduction prend le relais de la convection. La température d'interface bain-croûte serait alors inférieure à la température liquidus du bain. Ce type d'approche est retenu dans la modélisation du logiciel MEDICIS développé à l'IRSN [27] et est détaillée au paragraphe 5.3.4.2.

Le modèle de ségrégation de phases a été partiellement validé à partir des résultats des essais ARTEMIS 1D pour ce qui concerne les interactions avec une paroi horizontale et pour des vitesses d'érosion et de bullage faibles correspondant à la phase à long terme de l'ICB dans le cas d'un réacteur de puissance. Cependant, ce modèle « idéal », qui suppose un équilibre thermodynamique à l'interface bain-béton, ne permet pas d'expliquer de manière satisfaisante les résultats des essais ARTEMIS 1D avec érosion rapide et bullage important correspondant à la phase initiale très transitoire de l'interaction ; en outre, ce modèle n'est pas non plus pertinent pour la phase à long terme pour un réacteur de puissance, malgré le bon accord indiqué plus haut avec les résultats des essais ARTEMIS 1D correspondant à ces conditions, en raison cette fois de la forte concentration de silice dans le bain, qui réduit la diffusion des espèces chimiques dans celui-ci et ralentit l'établissement de l'équilibre à l'interface [22].

► Distribution des flux de chaleur à l'interface corium-béton

De nombreuses corrélations d'échange de chaleur entre un bain et une paroi poreuse horizontale traversée par un gaz sont mentionnées dans la « littérature » [1-4, 7]. Elles ont été établies à partir de données expérimentales rappelées précédemment ou à partir d'approches plus théoriques. Elles s'expriment sous la forme de corrélations qui donnent le nombre de Nusselt Nu en fonction des nombres de Reynolds Re et de Prandtl Pr dans l'hypothèse où l'échange de chaleur est lié à une convection forcée induite par les gaz de décomposition du béton ou Nu en fonction du nombre de Rayleigh Ra et de Pr dans l'hypothèse où l'échange de chaleur est lié à la convection naturelle ; le nombre de Prandtl Pr ne dépend que des propriétés du fluide, le nombre de Reynolds Re dépend des propriétés de transport du bain et de la vitesse superficielle des gaz ; le nombre de Rayleigh Ra dépend des propriétés de transport du bain et du taux de vide et donc indirectement de la vitesse superficielle des gaz. Les plages de variation des propriétés physiques des fluides utilisés pour les essais avec des matériaux simulants (§ 5.3.3.1) sont réduites et ne couvrent pas toujours celles d'un bain de corium représentatif d'une interaction corium-béton [23]. Bien que ces corrélations donnent des résultats identiques pour les conditions expérimentales des essais réalisés avec des matériaux simulants, une grande dispersion des résultats est observée

lorsque ces corrélations sont utilisées avec des paramètres représentatifs du cas d'un réacteur de puissance. Cette dispersion indique probablement que les nombres adimensionnels retenus dans les corrélations ne reflètent pas correctement l'intégralité des phénomènes physiques ou les poids respectifs des différents paramètres physiques en raison du domaine restreint des données expérimentales qui ont permis d'établir les corrélations. C'est pourquoi un modèle fondé sur une approche plus phénoménologique a été proposé en 2005 [24] ; il donne des résultats satisfaisants pour les conditions des données expérimentales disponibles (paroi horizontale et paroi verticale [5]) mais aurait besoin d'une validation complémentaire pour les liquides visqueux. Enfin, il est important de noter que, plus que la valeur locale du coefficient d'échange thermique du bain avec les croûtes, c'est la distribution de la valeur de ce coefficient à la surface du bain qui est cruciale pour déterminer la distribution des flux de chaleur et des vitesses d'érosion locales pendant le régime quasi stationnaire qui existe durant la majeure partie de l'ICB.

C'est pourquoi le programme d'essais analytiques CLARA a été lancé par le CEA et l'IRSN pour améliorer la connaissance de la distribution des coefficients d'échange thermique le long des interfaces du bain et de leurs variations en fonction de la vitesse superficielle des gaz et du niveau de viscosité du bain.

Pour ce qui concerne les échanges de chaleur entre les deux couches d'oxydes et de métaux qui se forment lors de la stratification du bain, on trouve également plusieurs modèles dans la bibliographie, déduits d'essais analytiques [7, 8, 25]. En raison des manques de résultats expérimentaux et de la dispersion des résultats disponibles, ces modèles ont été revus en 2010 [1] en tenant compte des résultats plus récents obtenus sur la mesure du coefficient d'échange convectif dans le cadre du programme expérimental ABI réalisé au CEA de Grenoble [9]. La conclusion majeure de ce travail [1] est que le transfert de chaleur convectif entre les couches est grand devant le transfert de chaleur radial, ce qui conduit à une vitesse d'érosion axiale du béton beaucoup plus rapide que celle de l'érosion radiale ; cependant la formation éventuelle d'une croûte perméable à l'interface entre les deux liquides, qui réduit ce transfert de chaleur, est difficile à modéliser précisément en raison de l'instabilité très probable de cette croûte.

► Mélange et démixtion de liquides non miscibles traversés par un gaz

Les résultats des essais réalisés avec des matériaux simulants sont à la base du développement de corrélations expérimentales [15] permettant d'estimer les seuils de vitesse superficielle des gaz conduisant au mélange ou au contraire à la stratification du bain ; les valeurs obtenues présentent une dispersion non négligeable (plusieurs dizaines de %). Ces corrélations n'ont de plus pas été validées sur des résultats d'essais avec des matériaux réels et leur utilisation pour le cas d'un réacteur de puissance peut conduire à des configurations très variées : configuration largement mélangée ou configuration stratifiée voire partiellement stratifiée pendant une durée plus ou moins longue de l'ICB. Les incertitudes concernent notamment la dépendance des corrélations aux propriétés physiques des liquides, aux volumes respectifs des couches d'oxyde et de métal ainsi qu'à la taille des bulles.

5.3.4.2. Les logiciels de simulation

Les logiciels développés pour les études relatives à l'ICB [26, 27, 30] reposent sur des hypothèses de base identiques :

- le bain de corium est constitué de différentes couches (d'oxydes ou de métaux) présentant chacune une température et une composition chimique homogènes ;
- le bain de corium peut se trouver dans une configuration mélangée ou stratifiée ;
- la structure de l'interface est décrite par un modèle de résistance thermique tenant compte de la formation éventuelle d'une croûte solide ou d'une zone de produits de décomposition du béton (film de béton fondu ou "*slag layer*") La vitesse d'érosion du béton est évaluée à l'aide de la relation de Stefan qui permet de déterminer la quantité de chaleur provenant du bain de corium non évacuée par conduction dans le béton et servant à l'érosion du béton.

Ces logiciels se distinguent principalement par leurs modèles de comportement du corium et par les sous-modèles (ou corrélations) qu'ils utilisent (corrélations pour calculer le taux de vide, les échanges de chaleur, etc.).

Le logiciel TOLBIAC-ICB [26], développé par le CEA, repose sur le modèle de ségrégation de phases décrit plus haut qui suppose le bain de corium liquide et la formation de croûtes de matériaux réfractaires à l'interface : la température d'interface est la température liquidus du bain (supérieure à 2 200 K durant une grande partie de l'ICB). Elle est calculée à partir de la composition du bain grâce à un couplage avec le logiciel de calculs thermodynamiques GEMINI2.

Le logiciel CORCON [30] développé par Sandia National Laboratories aux États-Unis considère, en revanche, que le bain est un mélange de liquide et de débris solides en suspension et suppose l'existence d'une zone pâteuse si la température du bain est comprise entre les températures liquidus et solidus. Le modèle de film de béton fondu ou "*slag layer*" est utilisé pour décrire les interfaces entre le corium et le béton. Dans cette approche, la température d'interface bain-croûtes est proche de la température de fusion du béton.

Le logiciel MEDICIS [27], développé par l'IRSN, utilise une modélisation plus souple pour décrire le comportement des interfaces du bain : il y est fait l'hypothèse de l'existence d'une zone pâteuse à l'interface entre le bain liquide et le béton, comprenant une zone de convection et une zone de conduction. Dans cette approche, la température d'interface utilisée pour les transferts convectifs du bain vers l'interface est la température seuil délimitant la partie convective du bain et la partie conductive de la zone pâteuse ($T_{\text{solidification}}$ sur la figure 5.41). Comme aucun modèle ne permet de déterminer cette température d'interface de manière satisfaisante dans tous les cas, celle-ci est fixée arbitrairement par l'utilisateur entre la température liquidus et la température solidus ou bien déduite d'une valeur seuil de la fraction fondue du corium du bain. Les choix extrêmes correspondent respectivement à la modélisation de l'interface dans TOLBIAC (température liquidus) et à celle retenue dans le logiciel CORCON (température solidus). La validation de MEDICIS conduit à recommander pour la température d'interface

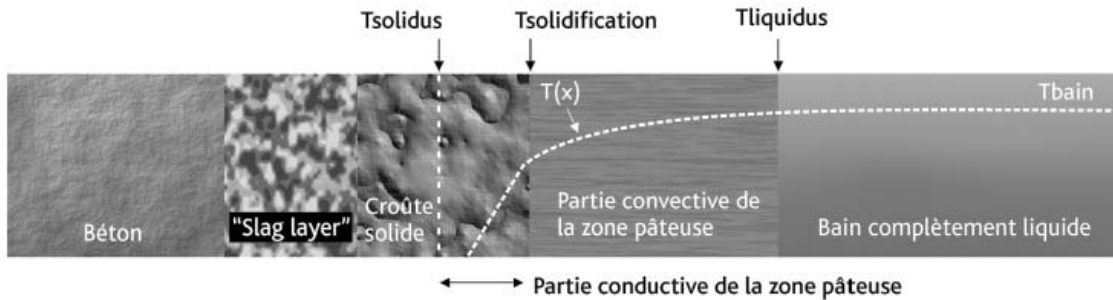


Figure 5.41. Modélisation de l'interface corium-béton dans le logiciel MEDICIS.

une valeur un peu inférieure à la température liquidus ou bien une fraction fondue seuil d'environ 50 %. La ségrégation de phases dans les croûtes n'est pas prise en compte, car les croûtes à l'interface corium-béton ont une épaisseur faible dans la plupart des cas ; mais les températures liquidus et solidus ainsi que la relation entre la fraction fondue du corium, sa composition et sa température, sont évaluées, préalablement au calcul d'une ICB, à l'aide de calculs avec le logiciel GEMINI2. Entre le béton et le bain (avec ou sans croûtes), est également supposée l'existence d'un film de béton fondu ("slag layer").

Les principales étapes du calcul d'une ICB sont les suivantes :

- calcul des propriétés physiques du bain ;
- calcul (éventuel) de la fraction solide dans le bain ;
- détermination de la température d'interface ;
- calcul des coefficients d'échange de chaleur ;
- estimation des vitesses d'érosion du béton ;
- bilan de masse en tenant compte des réactions chimiques et bilan d'énergie intégrant le rayonnement à la surface, permettant d'obtenir la composition et la température de chaque zone du bain ;
- calcul des épaisseurs des croûtes et des érosions ;
- mise à jour de la forme de la cavité et des surfaces d'échange.

Les logiciels de simulation sont validés à l'aide des résultats des essais décrits au paragraphe précédent. Cette validation est rendue complexe dans le cas des essais globaux du fait des nombreux phénomènes observés lors de ces essais et non traités dans les logiciels (éjection de corium, dépôts de matières sur les parois des sections d'essais, etc.), et des spécificités des installations expérimentales déjà mentionnées.

D'une façon générale, la validité des logiciels de simulation pour leur application au cas d'un réacteur de puissance est limitée par les incertitudes sur les effets d'échelle, puisque les modèles implémentés dans ces logiciels n'ont pu être validés qu'à partir des résultats d'essais de taille 10 à 20 fois inférieure à celle d'un réacteur de puissance. Les solutions pour surmonter cette difficulté sont *a priori*, d'une part la réalisation d'essais avec des matériaux prototypes à plus grande échelle, d'autre part le développement d'outils de simulation

maillés capables de décrire la thermohydraulique et la physique des transferts de chaleur à différentes échelles afin de conforter l'extrapolation de l'échelle des essais à celle d'un réacteur de puissance. La première solution se heurte à des questions de faisabilité technologique et de coût. La seconde solution suppose le développement et la validation de modèles de turbulence applicables à un bain en présence d'un bullage de gaz ; ces modèles ne seront applicables qu'à des situations idéalisées pour ce qui concerne la structure des interfaces du bain et nécessiteront la mise au point d'outils de simulation qui ne pourront être disponibles qu'au-delà de plusieurs années.

5.3.5. Applications au cas d'un réacteur de puissance

Ce paragraphe présente, à titre d'illustration, des applications au cas d'un réacteur REP 900 MWe réalisées avec le logiciel MEDICIS [27, 28] pour le cas d'un radier en béton siliceux d'une épaisseur axiale de 4 m avec ferrailage. Des hypothèses très enveloppes sur les conditions initiales et sur les conditions aux limites ont été utilisées pour obtenir des résultats enveloppes en termes d'érosion du béton ; en particulier, tout le cœur du réacteur transformé en corium a été supposé présent dans le puits de cuve au début de l'ICB et les effets de la présence d'eau et de l'érosion radiale du radier ont été ignorés.

Les principales hypothèses de calcul retenues sont similaires à celles utilisées pour l'interprétation d'essais d'ICB du programme MCCI d'ANL [16] conduisant à une érosion 2D isotrope [29]. Un modèle de transfert de chaleur indépendant de l'orientation des interfaces et une température d'interface légèrement inférieure à la température liquidus dans le cas d'un bain homogène ont été retenus. Le coefficient d'échange par convection entre les couches d'oxydes et de métaux qui s'applique en configuration stratifiée a été déduit de la corrélation de Greene [7] qui tend à surestimer les échanges.

De larges incertitudes existent concernant la configuration du bain et son évolution. C'est pourquoi trois scénarios très différents sont considérés pour calculer l'érosion du béton.

(1) Un scénario avec une configuration de bain homogène maintenue durant toute l'ICB (figure 5.42), qui conduit à une érosion lente et à un délai de traversée du radier d'environ 5 à 9 jours, suivant l'épaisseur de béton à éroder (3 m à 4 m).

Les vitesses d'érosion axiale et radiale restent faibles en raison de la distribution uniforme du flux de chaleur aux interfaces du bain avec le béton, conduisant à une érosion uniforme et à une zone de béton érodée très étendue comme le montre la figure 5.42.

(2) À titre d'illustration, un scénario peu réaliste avec une configuration de bain stratifiée où la couche de métal est supposée au-dessous de la couche d'oxydes dès le début de l'interaction, qui conduit à une érosion axiale très rapide avec un délai de traversée du radier compris entre 14 et 24 heures selon l'épaisseur de celui-ci. La raison de l'érosion rapide dans ce cas est le coefficient d'échange de chaleur élevé à l'interface oxydes-métal, qui conduit à concentrer l'évacuation de la puissance résiduelle au fond du bain et par conséquent à favoriser l'érosion axiale (figure 5.43).

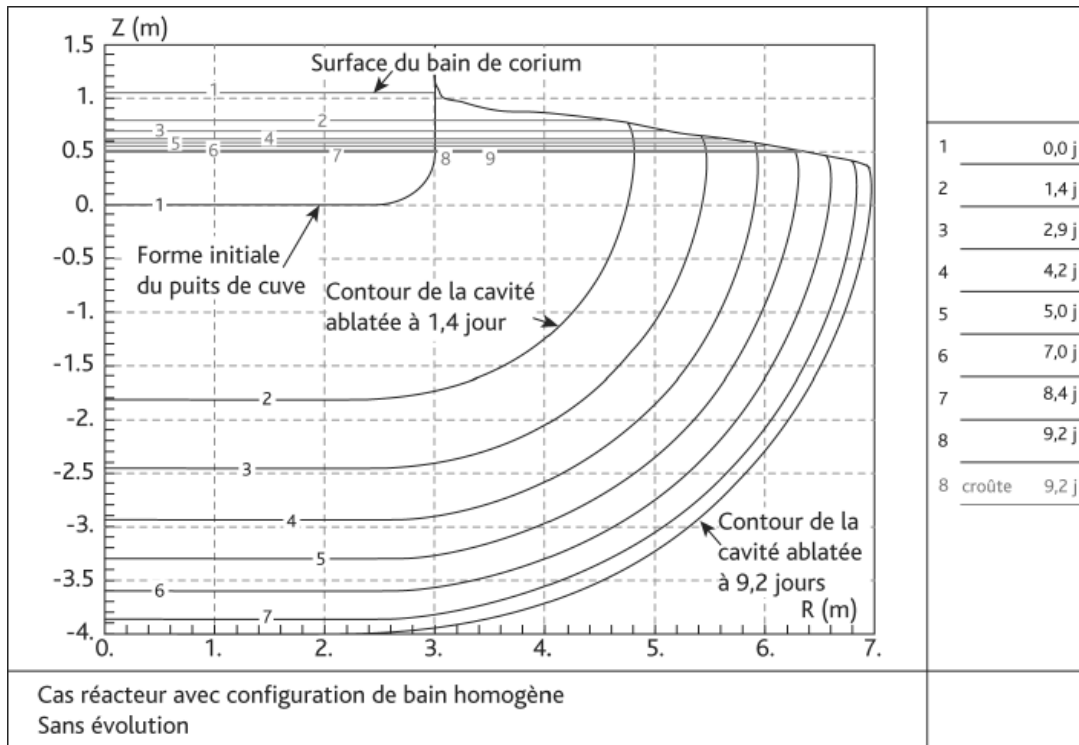


Figure 5.42. Cas d'un réacteur de puissance avec une configuration de bain homogène : évolution calculée de la cavité résultant de l'érosion du béton (érosion axiale selon l'axe Z et radiale selon l'axe R) jusqu'à la traversée du radier au bout de 9,2 jours. La dernière courbe correspond à l'instant de traversée axiale du radier.

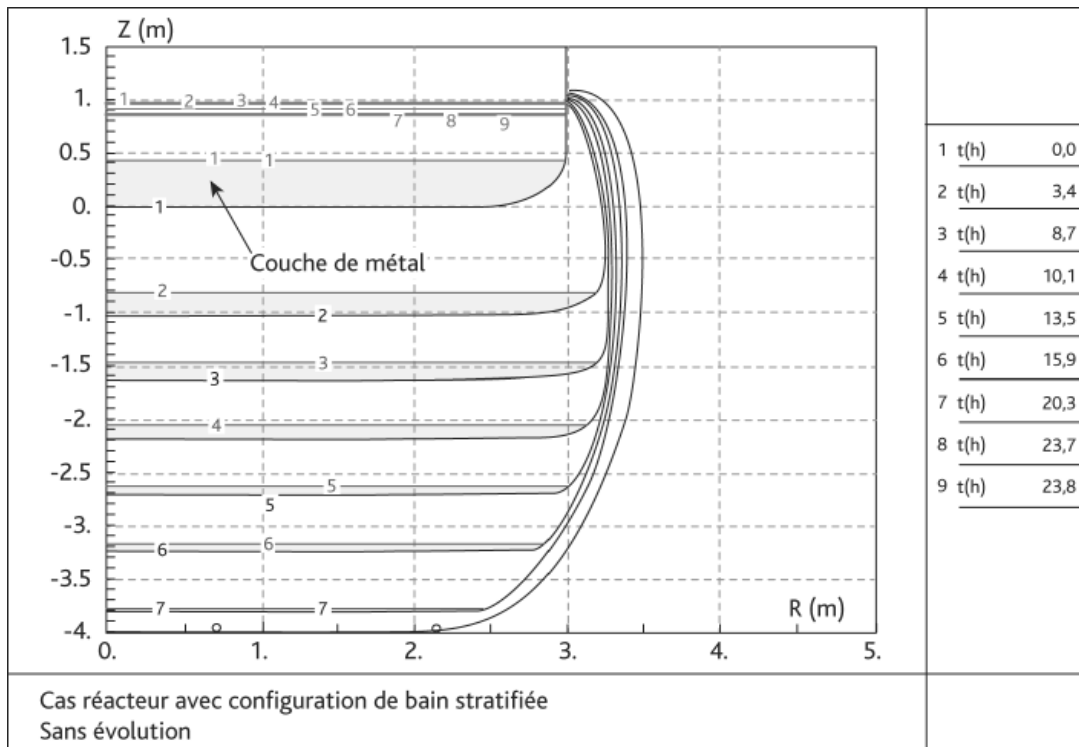


Figure 5.43. Cas d'un réacteur de puissance avec une configuration stratifiée – évolution calculée de la cavité résultant de l'érosion du béton (érosion axiale selon l'axe Z et radiale selon l'axe R) par intervalle d'environ 3 heures, traversée axiale au bout d'environ 24 heures, La dernière courbe correspond à l'instant de traversée axiale du radier.

(3) Un scénario plus réaliste qui comporte quatre phases successives d'évolution de la configuration du bain (figure 5.44). Dans ce scénario, le bain est supposé initialement stratifié avec la couche d'oxydes sous la couche de métaux en raison de la densité plus élevée des oxydes (première phase à court terme), puis il est homogénéisé en raison du bullage de gaz important (seconde phase à moyen terme) ; ensuite, dans une troisième phase (début de la phase à long terme), le bain est à nouveau stratifié avec, cette fois, la couche de métaux en dessous de la couche d'oxydes en raison de l'allègement des oxydes par apport de composés provenant de l'érosion du béton ; enfin, dans une quatrième phase à plus long terme, le bain redevient homogène du fait de la disparition de la couche de métaux par oxydation. L'évolution de la configuration du bain est déterminée à l'aide de critères déduits des essais BALISE [15] mentionnés précédemment au paragraphe 5.3.3.1. La prise en compte de l'évolution de la configuration conduit à repousser le délai de traversée du radier d'au moins 24 heures par rapport au cas d'une configuration stratifiée fixe avec les métaux en dessous de la couche d'oxydes (comparer les figures 5.43 et 5.44).

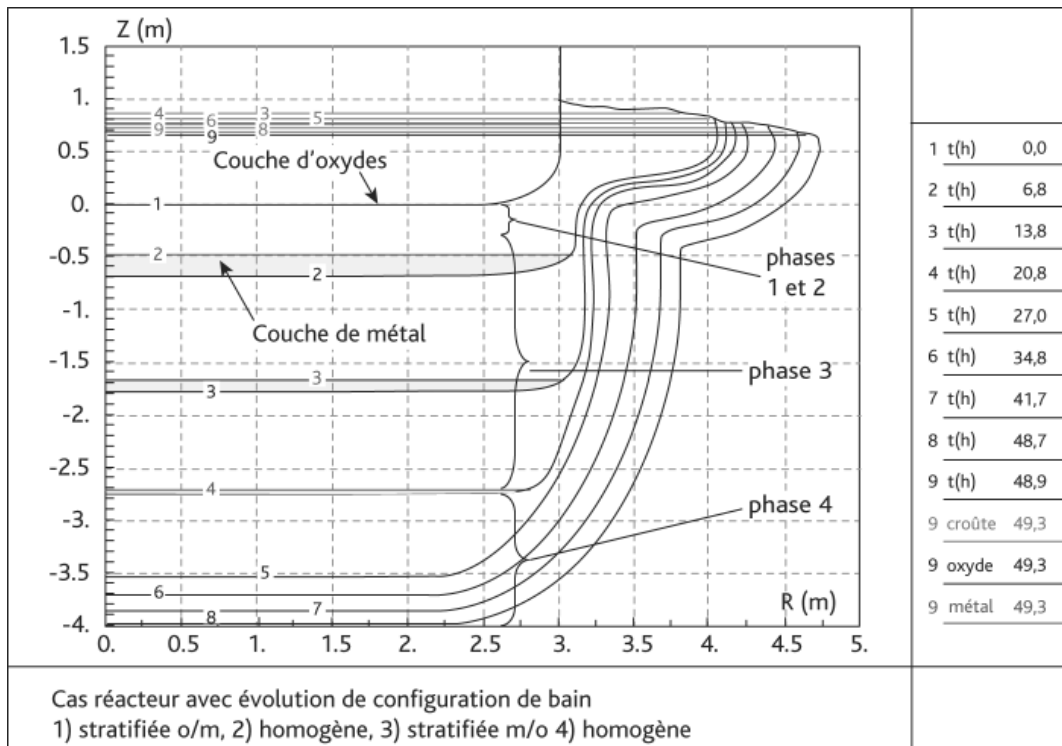


Figure 5.44. Cas d'un réacteur de puissance avec évolution de la configuration du bain – évolution calculée de la cavité résultant de l'érosion du béton par intervalle d'environ 6 heures, traversée axiale au bout d'environ 49 heures (o/m : la couche d'oxydes est sur la couche de métaux ; m/o : la couche de métaux est sur la couche d'oxydes).

Les résultats des calculs concernant le délai de traversée du radier sont représentés sur la figure 5.45 ci-après. Cette figure montre que l'effet de la stratification du bain sur le délai de traversée du radier ne pourrait disparaître que si le coefficient d'échange entre les couches d'oxydes et de métaux était fortement réduit, de plus d'un facteur 20, par rapport aux données expérimentales disponibles. Or les valeurs élevées du coefficient d'échange de chaleur oxydes-métaux dues au brassage résultant

du bullage des gaz sont confirmées, au moins en ordre de grandeur, par les expériences du programme ABI [9] mentionnées au paragraphe 5.3.3.1.

Il est à souligner que les calculs présentés ci-dessus reposent sur certaines hypothèses prudentes :

- le critère d'évolution de la configuration du bain suppose que la stratification de celui-ci a lieu dès le début de la démixtion des phases oxydes et métaux et que cette stratification se maintient même pour une faible épaisseur de la couche métallique ; un critère d'évolution de configuration plus réaliste prenant en compte la limitation de la stratification en cas de faible épaisseur de métal qui reste à confirmer conduira très probablement à des délais de traversée axiale excédant plusieurs jours ;
- le coefficient d'échange de chaleur à l'interface bain-béton est supposé indépendant de l'orientation de l'interface dans le cas d'un bain d'oxydes (et dans le cas d'un bain métallique). Cependant, dans le cas d'un béton siliceux et dans la configuration d'un bain d'oxydes, les transferts de chaleur pourraient être plus faibles à l'interface inférieure qu'à l'interface latérale comme le montrent certains résultats du programme MCCI-OECD [16] ; une modélisation tenant compte de ces résultats conduira à ralentir l'érosion axiale ;
- le renoyage du corium en cas d'injection d'eau est ignoré.

La figure 5.45 montre que la traversée des parois du puits de cuve (conduisant à un déversement partiel de corium hors du puits de cuve dans l'enceinte de confinement)

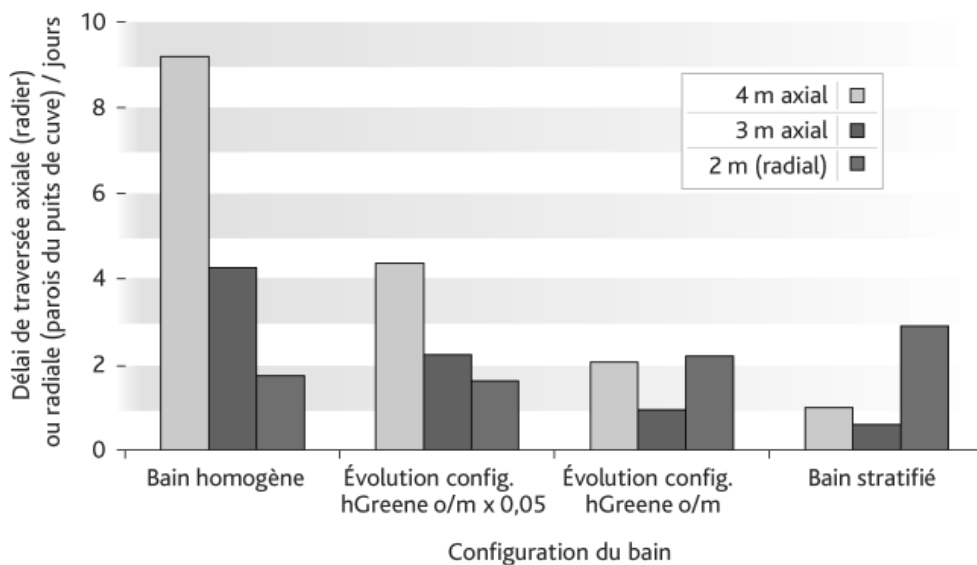


Figure 5.45. Délai de traversée du radier et des parois du puits de cuve selon la configuration du bain (bain homogène (voir la figure 5.42), bain stratifié (voir la figure 5.43), évolution de la configuration du bain pour un calcul réalisé avec le coefficient d'échange par convection entre les couches d'oxydes et de métaux déduit de la corrélation de Greene ($h_{\text{Greene}} \text{ o/m}$, voir la figure 5.44), évolution de la configuration du bain pour un calcul réalisé avec un coefficient d'échange réduit d'un facteur 20 par rapport à celui donné par la corrélation de Greene ($h_{\text{Greene}} \text{ o/m} \times 0,05$) et les transferts de chaleur par convection entre les couches d'oxydes et de métaux.

a lieu avant la traversée axiale dans les cas d'érosion axiale lente à modérée et ralentit l'érosion axiale ultérieure par réduction de l'inventaire de corium présent dans le puits de cuve.

Il est à noter enfin que l'érosion axiale est plus lente pour un béton silico-calcaire que pour un béton siliceux :

- la vitesse des gaz est plus grande pour un béton silico-calcaire en raison de la teneur en gaz élevée du béton, ce qui a pour effet de réduire la durée pendant laquelle une stratification est possible ;
- l'enthalpie d'érosion est plus élevée, ce qui ralentit les vitesses d'érosion axiale et radiale en configuration homogène.

5.3.6. *Bilan et perspectives*

Les résultats des expériences et les calculs réalisés pour un réacteur de puissance avec les logiciels MEDICIS et TOLBIAC-ICB mettent en évidence les principaux sujets d'incertitudes suivants [31] :

- la nature et les propriétés des interfaces du bain de corium : température de solidification du bain et transferts de chaleur et de masse aux interfaces corium-béton ;
- la répartition 2D (en axial et en radial) des flux de chaleur par convection dans un bain homogène ;
- les transferts de chaleur et de masse entre les couches de métaux et d'oxydes dans une configuration stratifiée ;
- l'évolution de la configuration du bain (stratification).

La connaissance de la structure des interfaces a progressé ces dix dernières années mais demeure insuffisante. En effet l'analyse des expériences ARTEMIS 1D réalisées avec un bain homogène et une interface horizontale montre que le modèle de ségrégation de phases à l'équilibre thermodynamique (avec une température d'interface bain-croûtes voisine de la température liquidus) s'applique bien en cas d'érosion lente du béton et de faible vitesse des gaz, situation pouvant correspondre à la phase à long terme pour le cas d'un réacteur de puissance ; cependant la forte viscosité du bain dans cette phase ralentit la diffusion des espèces et peut conduire à un écart de composition à l'interface par rapport à l'équilibre thermodynamique. En cas d'érosion plus rapide, situation qui correspond aux phases à court et moyen termes pour le cas d'un réacteur de puissance, le modèle de ségrégation de phases n'est plus adapté en raison d'un fort déséquilibre thermodynamique. Par ailleurs, l'analyse des essais d'ICB 2D réalisés avec des matériaux réels montre aussi que le bain est souvent pâteux et la température d'interface bain-croûtes inférieure à la température liquidus, notamment pour un béton siliceux [29], de plus, les examens associés ne mettent pas en évidence de croûte quelle que soit l'interface corium-béton, y compris l'interface horizontale, contrairement à ce qui est observé lors des essais avec des matériaux simulants (essais ARTEMIS 1D).

Des incertitudes majeures existent aussi sur les trois derniers points mentionnés ci-dessus, à savoir la distribution des flux de chaleur aux interfaces du bain, les transferts de chaleur entre les couches de métaux et d'oxydes en configuration stratifiée et l'évolution de la configuration du bain. En particulier, l'amélioration des connaissances relatives aux transferts de chaleur entre les couches de métaux et d'oxydes et aux types de configuration du bain et à leurs évolutions permettrait de réduire fortement les incertitudes concernant les vitesses d'érosion axiale et radiale pour une configuration de bain stratifiée, qui restent considérables [33].

En 2013, la poursuite des programmes expérimentaux VULCANO ICB avec des matériaux prototypiques d'un corium de réacteur de puissance et des travaux associés tels que l'interprétation des essais et les exercices de comparaison de résultats obtenus avec différents logiciels visent à progresser dans la compréhension des phénomènes physiques régissant la structure des interfaces et à compléter les connaissances sur la répartition 2D des flux de chaleur pour une configuration de bain homogène. Les essais VULCANO-ICB pour des configurations de bain stratifié ont pour objectif de contribuer à réduire les incertitudes restantes en fournissant des résultats sur les transferts de chaleur entre les oxydes et les métaux et sur l'évolution de la configuration du bain.

En matériaux simulants, le programme CLARA qui s'est achevé en 2012 vise à une meilleure compréhension de l'érosion 2D pour une configuration de bain homogène en étudiant en détail les transferts de chaleur par convection entre un bain chauffé et une paroi poreuse traversée par un écoulement de gaz en situation 2D avec des conditions aux limites simplifiées (sans érosion) et ce pour un large domaine de viscosité du bain.

En raison d'effets d'échelle probables sur la convection de la chaleur et sur la structure des interfaces corium-béton, une qualification sur un essai à grande échelle serait nécessaire. Un tel essai, avec une taille initiale du bain de l'ordre du mètre, a été envisagé en Russie dans le cadre des programmes de l'International Science and Technology Centre (ISTC) en 2011 mais le projet n'a pas pu aboutir en raison de difficultés administratives.

Les critères de stratification du bain devront être également précisés et mieux validés, en particulier le seuil de vitesse superficielle des gaz et l'épaisseur de métal maximale en dessous desquelles une stratification stable du bain apparaît.

Par ailleurs, un programme d'études complémentaires visant à réduire les incertitudes sur les propriétés thermochimiques du corium est en cours dans le cadre du programme ISTC (projet PRECOS) et concerne principalement la détermination de diagrammes de phases de certains mélanges d'oxydes et de métaux de compositions choisies dans un domaine où les données thermochimiques sont insuffisantes ou incertaines. L'analyse des résultats expérimentaux associés doit permettre de compléter les bases de données thermochimiques utilisées par les logiciels utilisés pour le calcul des grandeurs thermodynamiques du corium (GEMINI2 [32] par exemple).

Références

- [1] S.S. Kutateladze, Boiling and bubbling heat transfer under free and forced convection of liquid, *Int. J. Heat Mass Transfer* **22**, 1979.
- [2] M.R. Duignan, G.A. Greene, T.F. Irvine Jr, Heat transfer from a horizontal bubbling surface to an overlying water pool, *Chem. Eng. Comm.* **87**, 1990.
- [3] J.M. Bonnet, Thermal-hydraulic phenomena in corium pools for ex-vessel situations: the BALI experiments, *8th Int. Conf. On Nuclear Engineering*, 2000.
- [4] D.K. Felde, H.S. Kim, S.I. Abdel-Khalik, Convective heat transfer correlations for molten core debris pools growing in concrete, *Nuclear Engineering and Design* **58**, 1980.
- [5] B. Tourniaire, O. Varo, Assessment of two-phase flow heat transfer correlations for molten-core concrete interaction study, *Nuclear Technology* **164**, 2008.
- [6] M. Amizic, E. Guyez, J-M. Seiler, Experimental investigation on heat transfer for two-phase flow under gas-driven convection, *Proceedings of ICONE20-PWER2012, 20th Int. Conf. on Nuclear Engineering*, July 30-August, 2012, Anaheim, California, USA.
- [7] G.A. Greene, Heat, mass and momentum transfer in a multi-fluid bubbling pool, *Advances in Heat Transfer* **21**, 1991.
- [8] H. Werle, Enhancement of heat transfer between two horizontal liquid layers by gas injection at the bottom, *Nuclear Technology* **59**, 1982.
- [9] J. Excoffon, Rapport d'essais ABI- Gallium, Rapport CEA/ DEN/DTN/SE2T/ LPTM/ RT/008-312a – 2008 - Référence non publique.
- [10] J.M. Veteau, ARTEMIS program: investigations of MCCI by means of simulating materials experiments, *Proceedings of ICAPP '06*, Reno, NV USA, June 4-8, 2006.
- [11] M. Guillaumé, H. Combeau, J.-M. Seiler, An improved interface model for MCCI for LCS or Limestone concrete, *Nuclear Engineering and Design* **239** (6), 1084-1094, 2009.
- [12] B. Michel, M. Cranga, Interpretation and calculations for the first series of tests for the ARTEMIS program (corium-concrete interaction with simulating materials), *Nuclear Engineering and Design* **239** (3), 600-610, 2009.
- [13] M. Epstein, D.J. Petrie, J.H. Linehan, G.A. Lambert, D.H. Cho, Incipient stratification and mixing in aerated liquid-liquid or liquid-solid mixture, *Chem. Eng. Science* **36**, 1981.
- [14] J.L. Casas, M.L. Corradini, Study of void fractions and mixing of immiscible liquids in a pool configuration by an upward gas flow, *Nuclear Technology* **99**, 1992.
- [15] B. Tourniaire, J.M. Bonnet, Study of the mixing of immiscible liquids by sparging gas: results of the BALISE experiments, *10th NURETH*, 2003.

- [16] M.T. Farmer, S. Lomperski, S. Basu, A summary of findings from the melt coolability and concrete interaction (MCCI) program, *Proceedings of ICAPP07*, Nice, France, May 13-18, 2007.
- [17] C. Journeau, J.M. Bonnet, E. Boccaccio, P. Piluso, T. Sevón, P.H. Pankakovski, S. Holmström, J. Virta, Current European Experiments on 2D Molten Core Concrete Interaction: HECLA and VULCANO, *Proc. ICAPP'08*, Anaheim, California, 2008.
- [18] M. Farmer, S. Lomperski, The results of the CCI2 reactor material experiment investigating 2-D core-concrete interaction and debris coolability, *11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics (NURETH-11)*, Avignon, France, 2005.
- [19] H. Alsmeyer, BETA experiment in verification to the WECHSL code: experimental results on the melt concrete interaction, *Nuclear Engineering and Design* **103**, 1987.
- [20] C. Journeau, P. Piluso, J. F. Haquet, E. Boccaccio, S. Saretta, J.M. Bonnet, Oxide-Metal Corium-Concrete Interaction Test in the VULCANO facility, *Proc. ICAPP'07*, Nice, France, 2007.
- [21] J.M. Seiler, K. Froment, Material effects on multiphase phenomena in late phases of severe accidents of nuclear reactor, *Multiphase Science and Technology* **12**, 2000.
- [22] Ch. Journeau, C. Jegou, J. Monerris, P. Piluso, K. Frolov, Phase macrosegregation during the slow solidification of prototypic corium, *10th NURETH*, 2003.
- [23] D.R. Bradley, Modelling of heat transfer between core debris and concrete, *ANS Proceedings of the 1988 Nat. Heat Transfer Conf.*, 1988.
- [24] B. Tourniaire, A heat transfer correlation based on a surface renewal model for molten core concrete interaction study, *Nuclear Engineering and Design* **236**, 2006.
- [25] F.G. Blottner, Hydrodynamics and heat transfer characteristics of liquid pools with bubbles agitation, NUREG Report CR-0944, 1979.
- [26] B. Spindler, B. Tourniaire, J.M. Seiler, K. Atkhen, MCCI analysis and applications with the TOLBIAC-ICB code based on phase segregation model, ICAPP'5, 2005.
- [27] M. Cranga, R. Fabianelli, F. Jacq, M. Barrachin, F. Duval, The MEDICIS code, a versatile tool for MCCI modelling, ICAPP'5, 2005.
- [28] M. Cranga, B. Michel, F. Duval, C. Mun, Relative impact of MCCI modeling uncertainties on reactor basemat ablation kinetics, *MCCI-OECD seminar*, Cadarache, St-Paul-lez-Durance, France, October 10-11, 2007.
- [29] M. Cranga, C. Mun, B. Michel, F. Duval, M. Barrachin, Interpretation of real material 2D MCCI experiments in homogeneous oxidic pool with the ASTEC/MEDICIS code, *Proc. ICAPP'08*, Anaheim, California, June 8-12, 2008.

- [30] D.R. Bradley, D.R. Gardner, J.E. Brockmann, R.O. Griffith, CORCON-MOD3: an integrated computer model for analysis of molten core concrete interactions, NUREG Report CR-5843, 1993.
- [31] B. Tourniaire, B. Spindler, V. Coulon, A.C. Augé, M. Cranga, Transfert de chaleur entre le bain de corium et le béton en cours d'interaction corium/béton – Analyse du groupe de travail CLARA, Rapport CEA/DEN/DTN/SE2T/LPTM/05-105 – 2005 – Référence non publique.
- [32] B. Cheynet, P.Y. Chevalier, E. Fischer, Thermo suite, *Calphad* **26** (2), 167-174, 2002.
- [33] M. Cranga, L. Ferry, J.F. Haquet, C. Journeau, B. Michel, C. Mun, P. Piluso, G. Ratel, K. Atkhen, MCCI in an oxide-metal pool: lessons learnt from VULCANO, Greene and BALISE experiments, *ERMSAR-10 Conference*, Bologne, Italy, May 11-12, 2010.