

5.1

Bains de corium au fond de la cuve d'un réacteur à eau sous pression (REP) lors d'un accident grave

La formation d'un bain de corium⁽¹⁾ au fond de la cuve est une étape critique d'un d'accident de fusion du cœur d'un réacteur à eau sous pression (REP). En effet, le flux de chaleur à l'interface entre le bain et la cuve nécessaire pour évacuer la puissance résiduelle peut dépasser 1 MW/m^2 dans cette situation, ce qui menace directement l'intégrité de la cuve, même en cas de refroidissement par l'extérieur. On rappelle cependant que certaines études de sûreté ont montré que de tels flux ne peuvent être atteints pour des réacteurs de puissance inférieure à 600 MWe (AP600, VVER 440) car il est alors possible de refroidir la cuve par l'extérieur.

Les risques de perte d'intégrité de l'enveloppe deviennent importants après rupture de la cuve : ablation du béton du puits de cuve par le corium, échauffement rapide de l'atmosphère et dispersion des éléments radioactifs.

Les bains de corium ont fait l'objet de recherches et d'études depuis la fin des années 70, et restent un sujet d'actualité, malgré des progrès remarquables dans la compréhension et la modélisation des phénomènes physiques et chimiques mis en jeu. Les processus qui conduisent à la formation d'un bain fondu et à l'attaque de la cuve sont assez complexes et seulement partiellement compris à l'heure actuelle et s'avèrent aussi difficiles 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 obtenu 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 thermochimiques au sein du bain. Ces lacunes dans la compréhension des phénomènes conduisent à de nombreuses incertitudes sur l'évaluation de la sûreté de certains nouveaux concepts de réacteurs (AP1000, VVER640) pour lesquels on cherche à garantir la rétention du corium à l'intérieur de la cuve⁽²⁾.

Dans la suite de cet article, un rapide état des connaissances sur le comportement du corium dans la cuve est fait, en décrivant l'arrivée du corium au fond de la cuve et la formation du bain fondu, puis en détaillant plus particulièrement les transferts de chaleur et de masse dans le bain. Une dernière partie résume les éléments importants.

L'arrivée du corium et l'évolution vers le bain fondu

On suppose en général que, lorsque le corium arrive de la zone du cœur vers le fond de la cuve, celui-ci est rempli d'eau liquide. Selon toute vraisemblance, le corium contient une fraction importante de zircaloy non oxydé (matériau de gainage) – il est dit sous-stœchiométrique tant qu'il n'a pas atteint la composition

(1) On appelle « corium » le mélange de matériaux fondus (UO_2 , ZrO_2 , Zr, acier) qui se forme lors de la fusion des crayons combustibles et des barres de contrôle.

(2) Ce n'est pas le cas du réacteur EPR.

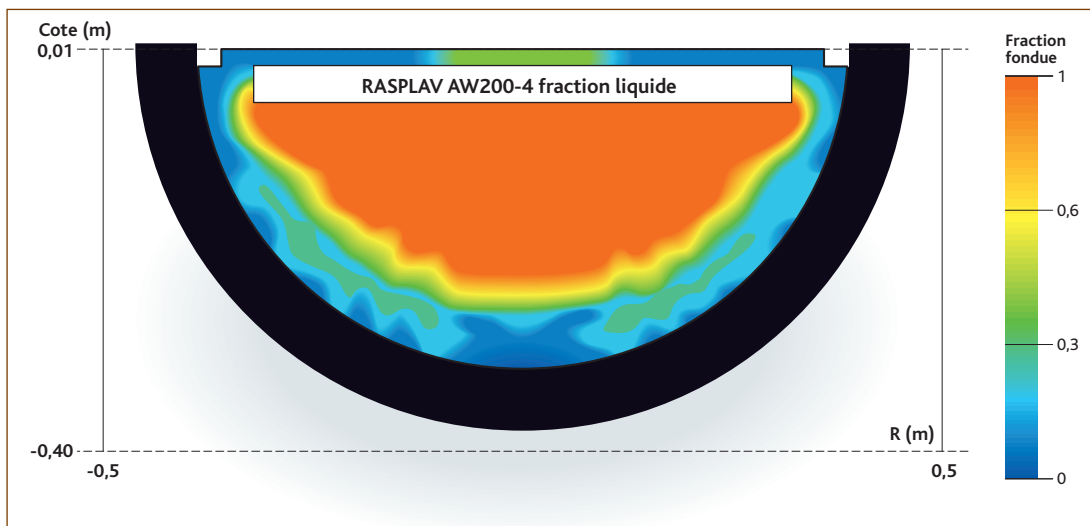


Figure 1 : Résultats de l'essai RASPLAV AW-200-4 avec le code ICARE : formation d'un bain à partir de débris (l'échelle représente la fraction volumique de matériaux fondus, du bleu - débris - au rouge - bain).

(U-Zr)O₂, et est donc susceptible d'être oxydé. L'interaction d'un corium à plus de 2500 K avec de l'eau à saturation conduit à la fragmentation plus ou moins fine du jet de corium en particules solides et à une production intense de vapeur pouvant conduire à une montée en pression importante dans le circuit primaire. Des programmes expérimentaux comme FARO [1] (ISPRA) ont permis de quantifier ce phénomène. L'interaction produit des particules dont la taille varie entre 1 et 5 millimètres. L'une des questions importantes qui se pose, outre la taille des particules formées, est de savoir si le corium est également oxydé lors de sa fragmentation. Cela détermine la production d'hydrogène associée à la réaction d'oxydation et conditionne la suite de l'évolution du corium, comme on le verra dans la partie 4. Seuls les essais ZREX [2] (SNL) ont permis de donner une réponse partielle à cette question. Il semble qu'en l'absence d'explosion de vapeur, la fragmentation ne soit pas assez fine pour conduire à une oxydation significative des débris. Mais il y a eu trop peu d'essais pour bien quantifier le phénomène : ce type d'étude n'a cependant pas été refait à cause des risques trop importants qui lui sont associés.

La modélisation du processus de fragmentation est très complexe et reste relativement empirique. Il s'agit donc d'une étape assez peu prévisible de l'accident. Lorsque le corium, partiellement fragmenté, s'est accumulé au fond de la cuve, il vaporise progressivement l'eau résiduelle. En supposant qu'il n'y ait pas d'apport d'eau complémentaire ou que la configuration des débris soit telle qu'ils ne soient pas refroidissables, la température des matériaux remonte progressivement jusqu'aux environs de 1700 K, température de fusion de l'acier. Une quantité importante d'acier fondu provenant des nombreuses structures (plaques ou tubes) disposées dans le fond de la cuve est progressivement incorporée au corium. Bien que les interactions entre l'acier liquide et un corium (U-Zr)O₂ soient étudiées depuis longtemps, ce n'est que récemment, dans le cadre du projet OCDE MASCA [3] en particulier, que l'on a pris conscience de l'impact de ces interactions sur l'évolution du corium au fond de la cuve. Cet aspect sera détaillé dans la partie 4. Le zircaloy puis les oxydes métalliques fondent au fur et à mesure de l'élévation de la température et s'accumulent pour former un bain. Compte tenu des

5.1

résultats des essais ACRR-MP [4], PHEBUS FPT4 [5] et RASPLAV AW-200 [6], ce phénomène est maintenant assez bien connu et modélisé. À titre d'illustration, la *figure 1* (page 5) montre le résultat du calcul, effectué avec le code ICARE2 [7], de la formation d'un bain à partir de débris (UO_2 , ZrO_2 , Zr). La comparaison avec les observations et mesures expérimentales est très satisfaisante.

Régimes d'écoulement et transferts de chaleur dans un bain fondu

Le bain étant refroidi au contact de la cuve et par sa surface supérieure par rayonnement ou contact avec l'eau, des mouvements de convection naturelle ont lieu. Les premières études sur les bains fondus ont porté essentiellement sur la caractérisation des régimes convectifs et l'estimation des échanges de chaleur avec la cuve. De nombreux dispositifs expérimentaux allant quasiment jusqu'à l'échelle 1, mais sur une tranche hémicylindrique, ont permis de corrélérer le flux de chaleur au nombre de Rayleigh⁽³⁾ interne du bain pour toutes les configurations d'intérêt lors de l'étude des accidents graves. Ce sont les expériences avec matériaux simulants qui se sont avérées les plus intéressantes car elles permettent d'atteindre des nombres de Rayleigh élevés avec une instrumentation fiable et complète. Cela a aussi permis de caractériser expérimentalement les processus de transferts turbulents intervenant dans des bains de grande taille. La structure de l'écoulement dans un bain de corium est caractérisée par trois zones caractéristiques qui sont schématisées sur la *figure 2*. Une couche limite le long de la cuve est le siège d'un écoulement descendant. Cette couche, très fine en haut du bain, s'élargit progressivement vers le bas. Elle est caractérisée par un très fort gradient de température dans la direction perpendiculaire à l'écoulement. La région centrale du bain est le siège d'un écoulement ascendant de très faible vitesse (en moyenne) pour lequel le mode de transport prédominant est la diffusion turbulente à petite échelle. Le champ de température est stratifié axialement dans cette région. Cela induit une variation axiale du flux de chaleur sur la cuve, le maximum étant localisé en haut de cette région. Sous l'effet du refroidissement de la surface supérieure, une couche de plusieurs dizaines de centimètres en haut du bain est le siège d'instabilités à grande échelle de type Rayleigh-Bénard. Dans cette couche, le transport par les cellules de convection est important et on le considère souvent comme isotherme, à part une fine couche limite à la surface supérieure. Le flux de chaleur au bord de cette région est donc relativement uniforme.

(3) Le nombre de Rayleigh est défini par la formule

$$\text{Ra}_R = \frac{g \beta_l q_l R^5}{\alpha_l \nu_l \lambda_l}$$

où R est le diamètre du bain, q_l la puissance volumique, β_l le coefficient d'expansion thermique du mélange, λ_l et α_l respectivement la conductivité et la diffusivité thermiques et ν_l la viscosité cinématique.

Ce nombre sans dimension caractérise l'importance du travail des forces d'Archimède par rapport à la dissipation d'énergie par viscosité et diffusion thermique.

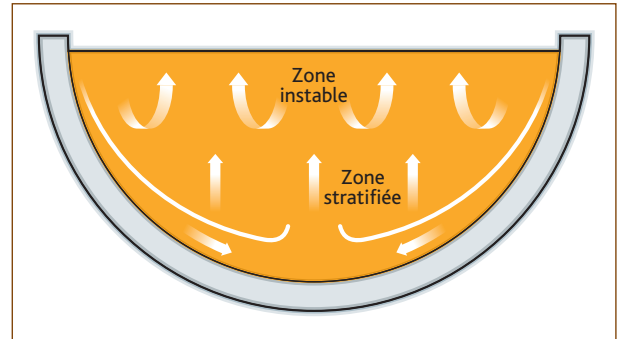


Figure 2 : Schéma des mouvements convectifs dans un bain turbulent.

De nombreux programmes expérimentaux ont été menés sur ce thème : Asfia & Dühr [8], ACOPO [9] en géométrie hémisphérique et COPO [10], SIMECO [11], RASPLAV [6], BALI [12] en tranche hémicylindrique.

Il faut noter qu'il existe des divergences entre les différentes corrélations de transfert de chaleur, qui deviennent assez significatives pour des nombres de Rayleigh élevés. Il faut donc être très attentif au choix des corrélations et privilégier les corrélations récentes proposées par certains auteurs [13] qui ont tenté de faire une synthèse des résultats expérimentaux à grande échelle. Malgré cela, des différences d'un facteur 2 à 4 sur les coefficients d'échange persistent. La plupart des études de sûreté doivent cependant s'appuyer sur ces corrélations, qui permettent d'avoir le bon ordre de grandeur des flux de chaleur. On verra dans la section suivante qu'il peut exister plusieurs couches stratifiées de matériaux au lieu d'un seul bain homogène. Toutefois, il faut noter qu'il n'existe, à part SIMECO, pratiquement pas d'essais sur des bains stratifiés à 2 ou 3 couches et que les premiers résultats ne semblent pas justifier l'application des corrélations obtenues sur des bains homogènes. Cet aspect reste donc à approfondir sur le plan expérimental.

Transferts de masse et interactions chimiques dans un bain fondu

La complexité du comportement des bains fondus est accrue par les nombreuses interactions chimiques entre matériaux à haute température, qui peuvent modifier radicalement l'état et les transferts de ces matériaux. Il en résulte une grande difficulté à prédire les mouvements de matériaux dans la cuve et donc la répartition de puissance. L'influence des matériaux réels a pu être étudiée récemment, au cours des programmes OCDE RASPLAV [6] et MASCA [14]. On a alors constaté que dans certaines conditions, des transferts importants ont lieu au sein du bain, ce qui conduit à des configurations stratifiées qui sont rarement prises en considération par l'approche « enveloppe » classique. Ceci sera abordé dans les paragraphes suivants.

Parmi les conclusions importantes de MASCA [14] il faut retenir que l'ajout à un corium sous-stœchiométrique U-Zr-O d'une quantité d'acier

dans une proportion inférieure à 20 % conduit à la formation de deux liquides non miscibles, avec une phase métallique plus dense que la phase oxyde. Il s'avère que la couche métallique contient en fait une proportion non négligeable de zircaloy et d'uranium, ce dernier modifiant sensiblement la densité du mélange. Ce résultat, bien que tout à fait explicable et même prévisible, n'a été que rarement pris en compte lors des études antérieures sur la tenue de la cuve. L'un des paramètres déterminant la densité de la phase métallique formée est la proportion initiale de zirconium non oxydé, c'est-à-dire la sous-stœchiométrie du corium initial. La densité du métal formé est une fonction décroissante de la sous-stœchiométrie initiale. Il est donc important de noter que les phénomènes de stratification « inverse » n'ont été observés que pour des essais réalisés en atmosphère inerte. On peut facilement imaginer que la sous-stœchiométrie du corium diminuerait en atmosphère oxydante, ce qui aurait pour effet de réduire la densité de la phase métallique et de la rendre éventuellement plus légère que l'oxyde. Le programme MASCA-2 actuellement en cours a pour objectif d'étudier le comportement d'un bain de corium (et aussi de débris) sous atmosphère oxydante. Mais il n'existe pas encore de résultats suffisamment analysés pour présenter des conclusions sur ce point à ce jour.

Il faut signaler que le programme MASCA [14] a contribué à l'amélioration de la base de données thermochimiques NUCLEA [15] développée à l'initiative de l'IRSN. On dispose à l'heure actuelle de données assez précises pour calculer les compositions des phases oxyde et métal en équilibre dans le domaine de non-miscibilité. Ces compositions jouent un rôle clé dans la modélisation d'un bain stratifié où l'on doit considérer que l'interface métal/oxyde est à l'équilibre thermochimique. Les modélisations précédentes ne prenaient en compte que l'équilibre thermique à l'interface. On peut ainsi considérer que les connaissances récentes acquises lors de programmes expérimentaux sur les interactions des matériaux à haute température ont conduit à une évolution significative de la modélisation d'un bain fondu.

Études de sûreté et modélisation

La tendance la plus souvent suivie dans les études de sûreté a consisté à simplifier le problème en se ramenant à un ensemble de situations « enveloppes » assez simples, à partir desquelles il serait possible d'estimer, de manière conservatrice, les contraintes thermiques imposées à la cuve. Il est généralement admis dans ce type d'études [16,17] que le corium, après fragmentation, se trouve dans le fond de cuve sous forme d'un lit de débris et d'une masse non fragmentée (bain) dont les proportions relatives peuvent varier dans une gamme assez large. De même, le taux d'oxydation des débris et du corium après fragmentation est supposé varier dans un intervalle assez large (entre 30 % et 100 %). Partant de l'hypothèse que les flux de chaleur les plus importants sont obtenus lorsque tous les matériaux sont fondus, la période transitoire de formation du bain proprement dit est souvent modélisée de manière très simplifiée.

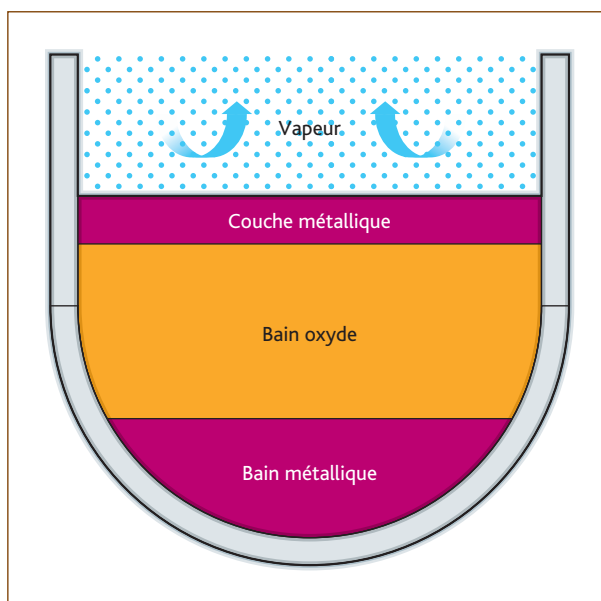


Figure 3 : Schéma d'une configuration transitoire susceptible de s'établir lors de l'évolution d'un bain de corium en fond de cuve.

Ce choix semble raisonnable à première vue, mais il faut avoir conscience qu'il implique aussi de négliger le transport d'acier liquide dans les débris oxydés et l'interaction des métaux avec les débris pendant leur fusion. Or, on a vu que ce sont justement ces interactions qui conduisent à des configurations stratifiées rarement prises en considération dans l'approche « enveloppe » classique où l'on considère presque toujours que la couche métallique flotte au-dessus de l'oxyde. Ce dernier cas est le plus pénalisant car il induit une augmentation locale du flux de chaleur (*focusing effect*) sur la cuve lorsque l'épaisseur de la couche de métal diminue. C'est pour cette raison que dans les modèles classiques de fond de cuve l'acier ne se mélange pas au corium et forme systématiquement une couche sur le dessus du bain d'oxydes.

Ainsi, les transferts de masse qui s'effectuent pendant la formation du bain et au cours de la fusion des structures en acier induisent la possibilité de situations transitoires au cours desquelles les flux de chaleur sur la cuve pourraient être supérieurs à ceux estimés pour les situations « enveloppes ». On peut ainsi imaginer des scénarios où l'arrivée progressive d'acier fondu (provenant de la fusion des structures du plénum inférieur) dans le bain conduirait d'abord à former une couche métallique sous le bain d'oxydes. La proportion d'acier augmentant, cette couche deviendrait ensuite moins dense et remonterait à la surface supérieure du bain. Ce type de configuration transitoire est représenté sur la **figure 3** où une couche métallique fine apparaît temporairement sur le dessus du bain d'oxydes, induisant un risque d'augmentation locale du flux de chaleur (*focusing effect*).

L'approche « enveloppe » classique est donc sérieusement remise en cause à l'heure actuelle. On s'oriente, autant à l'IRSN que dans d'autres organismes, vers une modélisation plus détaillée des phénomènes en traitant

simultanément les transferts de masse et de chaleur dans le bain, contrairement à l'hypothèse classique d'absence d'interaction entre les matériaux. De plus, des modèles sont développés pour traiter de l'évolution des matériaux au cours du temps et non plus d'un hypothétique « état final » en régime stationnaire. Cette évolution dans l'approche est particulièrement utile pour l'étude des REP français du parc actuel. En effet, dans la mesure où la cuve ne peut pas être refroidie suffisamment par l'extérieur, elle casserait vraisemblablement avant la fusion complète des matériaux et l'établissement d'un régime stationnaire. L'objectif des études est alors de prédire les conditions de la rupture de la cuve (instant, localisation) ainsi que la masse, la température et la composition du corium sortant de la cuve.

Il faut effectuer une simulation numérique 2D ou 3D de l'écoulement (codes CFD⁽⁴⁾), en tenant compte de la turbulence, si on veut gagner en précision sur le calcul des flux de chaleur. La modélisation existante des écoulements turbulents en convection naturelle d'un fluide générant une puissance en son sein est notoirement insuffisante, en particulier à cause de la difficulté d'inclure dans les modèles de turbulence classiques (c'est-à-dire isothermes) l'effet des termes de gravité sur la génération ou la réduction d'énergie cinétique turbulente. Cela est particulièrement vrai pour les modèles simples comme k-ε. À ce jour, aucun modèle existant ne semble utilisable dans un code mécaniste de simulation d'accident grave : les modèles qui permettent d'obtenir des résultats précis

requièrent un temps de calcul prohibitif. On peut cependant noter que certains organismes étrangers en Russie et au Japon utilisent déjà des codes CFD pour les études de réacteurs en n'étudiant que le fond de cuve, indépendamment du reste de la cuve. La précision et la validité de ces modèles restent à démontrer.

■ Conclusion

À la suite de nombreuses études expérimentales, la formation d'un bain au fond de la cuve, la thermohydraulique du bain et les interactions entre matériaux ont pu être comprises et plus ou moins bien modélisées. À l'heure actuelle, une sérieuse remise en question de l'approche « enveloppe » classique a conduit à utiliser de nouveaux modèles capables de calculer l'évolution transitoire d'un bain pour aborder le problème. C'est le cas des modèles actuellement en cours de développement dans ASTEC [18] et dans ICARE/CATHARE [19]. Ces modèles se distinguent aussi des précédents par le traitement du couplage entre les phénomènes thermohydrauliques et thermochimiques, ce qui est rendu possible en particulier grâce à une amélioration significative de la qualité des bases de données thermochimiques.

Le sujet fait encore l'objet de recherches expérimentales dans le cadre de projets comme MASCA [14] (deuxième phase) qui a pour objectif d'étudier le comportement d'un bain de corium sous atmosphère oxydante ou SIMECO [11] dont l'objectif est d'étudier la thermohydraulique des bains stratifiés.

(4) CFD : *Computational Fluid Dynamics* - Dynamique computationnelle des fluides.

Références

- [1] D. Magallon. The FARO program recent results and synthesis. Proceedings of (CSARP) Meeting, Bethesda (USA), 1997.
- [2] D.H. Cho, D.R. Armstrong, W.H. Gunther, S. Basu. Experiments on interactions between zirconium-containing melt and water (ZREX): hydrogen generation and chemical augmentation of energetics. Proceedings of JAERI Conference, 97-011, (Japan), 1997.
- [3] F. Fichot, J.-M. Seiler, V. Strizhov. Applications of the OECD MASCA project results to reactor safety analysis. MASCA Application Report, OECD-NEA, 2003.
- [4] B.D. Gasser, R.O. Gaunt, S. Bourcier. Late phase melt progression experiment MP-1. Results and Analyses, NUREG/CR-5874, SAND92-0804, 1992.
- [5] P. Chapelot, A.C. Grégoire, G. Grégoire. Final FPT4 Report, DPAM-DIR 2004-0135, PH-PF IP-04-553, 2004.
- [6] V. Asmolov, *et al.* RASPLAV Application Report. OECD RASPLAV Seminar, Munich (Germany), 2000.
- [7] F. Fichot, V. Kobzar, Yu. Zvonarev, P. Bousquet-Mélou. The use of RASPLAV results in IPSN severe accident research program. RASPLAV Seminar 2000, Munich (Germany), 2000.
- [8] F. Asfia et V.K. Dühr. An experimental study of natural convection in a volumetrically heated spherical pool bounded on top with a rigid wall. Nuclear Engineering and Design, 163, 1996.
- [9] T.G. Theofanous, M. Maguire, S. Angelini et T. Salmassi. The first results from the ACOPO experiment. Nuclear Engineering and Design, 169, 1997.
- [10] O. Kymäläinen, O. Hongisto et E. Pessa. COPO experiments on heat transfer from a volumetrically heated pool. IVO Process Laboratory, DLV1-G380-0377, 1993.
- [11] A.A. Gubaidullin, T.N. Dinh, B.R. Sehgal. Analysis of natural convection heat transfer and flows in internally stratified liquid. Proceedings of 33rd National Heat Transfer Conference, Albuquerque (USA), 1999.
- [12] J.M. Bonnet, J.M. Seiler. Thermalhydraulic phenomena in corium pools: the BALI experiments. Proc. of 7th Int. Conf. on Nuclear Engineering, Tokyo (Japan), 1999.
- [13] J.M. Bonnet, J.M. Seiler. In-vessel corium pool thermalhydraulics for the bounding cases. NT SETEX/LTEM/01-247, CEA Grenoble, 2001.
- [14] V. Asmolov *et al.* MASCA Synthesis Report, OECD Report, 2005.
- [15] V. Chaud, P.Y. Chevalier, B. Cheynet, E. Fischer, P. Mason, M. Mignaneli. Contributions in final ENTHALPY report, ENTHA(03)-P018, EC 5th Framework Program, 2003.
- [16] O. Kymäläinen, H. Tuomisto, T.G. Theofanous. In-vessel retention of corium at the Loviisa plant. Nuclear Engineering and Design, 169 pp. 109-130, 1997.
- [17] R.E. Henry, H.K. Fausske. External cooling of a reactor vessel under severe accident conditions. Nuclear Engineering and Design, 139, pp. 31-43, 1993.
- [18] S. Pignat, G. Guillard. Modeling of severe accident sequences with the new modules CESAR and DIVA of the ASTEC system code. NURETH-10, Seoul (South-Korea), 2003.
- [19] M. Salay, F. Fichot. Modelling of corium stratification in the lower plenum of a reactor vessel. MASCA Seminar, Aix-en-Provence (France), 2004.