

Évaluation du transfert radiatif dans un cœur de Réacteur à Eau Pressurisée (REP) lors de la phase de renoyage d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP)

Jonathan GERARDIN^{1,2}, Pascal BOULET^{1*}, Pierre RUYER², Nathalie SEILER²

¹LEMETA, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
ENSEM, 2 avenue de Forêt de Haye, TSA 60604 - 54518 VANDOEUVRE CEDEX

²Institut de radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES, SEMIA, LIMAR, Cadarache,
St Paul-Lez-Durance, 13115, France

* (auteur correspondant : pascal.boulet@univ-lorraine.fr)

Résumé - Des études basées sur l'utilisation de la CFD ont été menées dans le contexte de la phase de renoyage d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) d'une centrale nucléaire. Le logiciel Neptune_CFD permet de simuler des écoulements diphasiques avec transfert de masses et d'énergie. Le transfert radiatif entre les crayons du cœur du réacteur nucléaire et le milieu environnant, formé de vapeur et de gouttelettes, a notamment été étudié à l'aide d'une méthode IDA, dérivée de l'approximation P1. Ces études ont permis de montrer que, dans les configurations étudiées, le transfert radiatif contribue à hauteur d'environ 20% aux transferts de masse et d'énergie.

1. Introduction

L'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) est un cas de référence pour les études de sûreté des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP). Suite à une brèche sur le circuit primaire du réacteur, le cœur peut se retrouver asséché. Les crayons combustibles étant insuffisamment refroidis, ils montent en température, induisant donc un risque de fusion du cœur. Des systèmes de sécurité permettent l'injection d'eau borée dans la cuve du réacteur. Un milieu de vapeur et de gouttelettes va alors s'écouler autour des crayons combustibles et les refroidir. Le transfert de chaleur est lié aux phénomènes de convection turbulente, aux impacts des gouttelettes sur les crayons et au transfert radiatif. Des codes globaux permettent de faire des simulations du refroidissement à l'échelle d'un réacteur afin de dimensionner les systèmes de sécurité. Toutefois, à une échelle locale, on peut observer de forts gradients de température et de concentration de gouttelettes, influant fortement les transferts de chaleurs. Ces gradients sont mal modélisés dans les codes globaux, il est donc nécessaire de faire des études à des échelles locales (échelle de la CFD) pour vérifier le niveau de précision des modèles globaux, voire les améliorer. L'étude à l'échelle de la CFD se fait ici à l'aide du logiciel Neptune_CFD, développé dans le cadre du projet NEPTUNE cofinancé par le commissariat à l'énergie atomique (CEA), Electricité de France (EDF), l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), et AREVA-NP [1]. Ce logiciel de CFD possède des modules dédiés pour la modélisation de la turbulence d'un milieu vapeur-gouttelettes, l'impact des gouttelettes sur les crayons combustibles et le transfert radiatif à travers un milieu vapeur-gouttelettes. L'objectif de notre contribution est d'évaluer le rôle des différents modes de transfert dans un cas type, en particulier l'influence du rayonnement récemment intégré dans Neptune_CFD. Les méthodes numériques utilisées sont détaillées dans [2] et l'accent est mis ici sur l'application et l'analyse des résultats du code.

2. Transfert radiatif en APRP

Le problème du transfert radiatif peut se décomposer en deux sous problèmes, l'un concernant l'évaluation des propriétés radiatives du milieu et le second concernant la résolution du transfert radiatif proprement dit à travers un milieu.

2.1. Propriétés radiatives du milieu

Les propriétés radiatives des gouttelettes sont déterminées par la théorie de Mie en utilisant les indices optiques de l'eau provenant de Hale et Querry [3]. Le modèle C-k a été utilisé pour déterminer les propriétés radiatives de la vapeur d'eau [4].

Un milieu équivalent au milieu vapeur-gouttelettes est obtenu par simple additivité des propriétés radiatives des gouttelettes et de la vapeur. Cela forme un milieu absorbant, diffusant anisotrope, émissif, non gris et non homogène. La température radiative de ce milieu équivalent est telle qu'il soit aussi émissif que la somme de ces éléments constitutifs : vapeur et gouttelettes. La résolution spectrale du milieu, initialement construite sur 38 bandes de longueurs d'onde, peut être ramenée sur 6 bandes larges afin de réduire le temps de calcul pour une perte de précision relativement faible. Enfin, une base de données a été créée pour interpoler les propriétés radiatives du milieu en fonction du diamètre et de la fraction volumique des gouttelettes, ainsi que de la température et de la pression de la vapeur. De plus amples détails sur les propriétés radiatives du milieu ainsi que sur le niveau de précision des différentes résolutions spectrales sont donnés dans un papier dédié [2].

2.2. Résolution du transfert radiatif

La résolution du transfert radiatif à travers ce milieu peut être réalisée à l'aide de l'approximation P1 ou de l'IDA (Improved Differential Approximation). Du fait des propriétés radiatives complexes du milieu considéré, le choix de la méthode de résolution du transfert radiatif est une question à part entière.

L'approximation P1 permet une résolution rapide du transfert radiatif à l'aide d'une simple équation différentielle, mais elle peut être imprécise pour des cas où le transfert radiatif est fortement directionnel (ce qui peut être le cas dans le contexte considéré, notamment lorsque la température varie fortement le long des crayons).

L'IDA permet de combler ces manquements en calculant le transfert radiatif en deux parties, l'une provenant des parois et étant atténuée par le milieu, l'autre part provenant uniquement du milieu. Les mises en équations de ces deux méthodes ainsi que leurs niveaux de précision sont détaillés dans une étude dédiée [5].

3. Etude sur un écoulement de type APRP

Lors d'un APRP de type grosse brèche, les propriétés du milieu vapeur gouttelettes peuvent évoluer dans les gammes indiquées par le tableau 1, la plage de variation étant relativement importante. Les parois des crayons de combustible sont à une température inférieure à 1200°C (qui est une température maximale limite en terme de conséquences d'un APRP). L'émissivité de ces parois en Zircaloy oxydé vaut 0.8, [6]. Dans la suite de ce papier nous étudions un écoulement au sein de la zone asséchée du cœur d'un réacteur pendant la phase de renoyage lors d'un APRP.

	Vitesse	Température	Pression	Diamètre	Fraction volumique
	m/s	°C	bar	µm	m ³ /m ³
Vapeur	1-20	100-800	1-3	-	0.99-0.9999
Gouttelettes	1-20	100	-	50-1000	10 ⁻⁴ -10 ⁻²

Tableau 1 : Étendue des propriétés du milieu vapeur gouttelettes en APRP

3.1. Géométrie

Le milieu vapeur gouttelettes s'écoule vers le haut dans un sous canal inclus entre quatre crayons combustibles. Les crayons ont un diamètre de 9.5mm et sont espacés de 3.1mm. La hauteur du domaine étudié est de 30cm soit une distance représentative de l'espacement entre deux grilles de maintien des crayons.

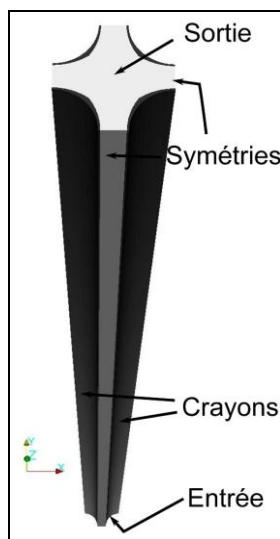


Figure 1 : Géométrie

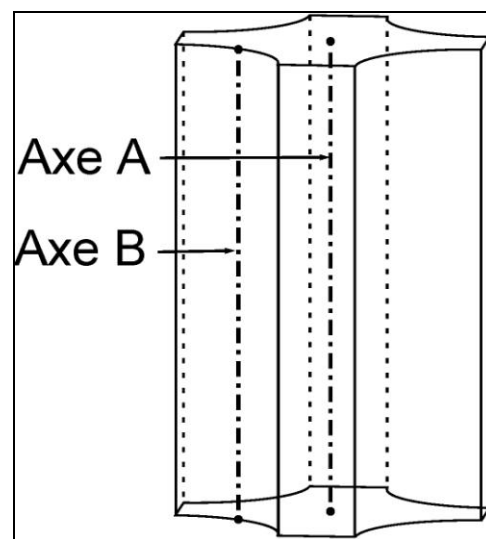


Figure 2 : Axes de présentation des résultats

3.2. Propriétés du milieu vapeur-gouttelettes et des crayons combustibles

Les propriétés du milieu vapeur gouttelettes imposées en conditions aux limites en entrée du domaine sont données dans le tableau 2. En sortie du domaine, une pression de 1 bar est imposée. La température de paroi des crayons varie linéairement entre 700°C en bas de la géométrie et de 1100°C en haut de la géométrie.

	Vitesse	Température	Diamètre	Fraction volumique
	m/s	°C	µm	m ³ /m ³
Vapeur	3	600	-	0.995
Gouttelettes	2	100	50	5.10 ⁻³

Tableau 2 : Propriétés de l'écoulement vapeur-gouttelette étudié

3.3. Écoulement

La figure 3 donne la température de la vapeur et des gouttelettes le long des deux axes représentés sur la figure 2. On peut remarquer que les gouttelettes sont toujours à la température de saturation. En bas du domaine (sur les premiers centimètres), la vapeur subit une chute de température quel que soit l'axe. En effet, la vapeur va fournir de l'énergie pour évaporer les gouttelettes qui sont fortement concentrées en bas de la géométrie. Sur l'axe A (au centre), la température de vapeur va même chuter jusqu'à la température de saturation. Sur l'axe B (près de la paroi), la température de vapeur va ensuite remonter progressivement et son écart avec la température de paroi va se stabiliser.

La vitesse des deux phases est présentée sur la figure 4. On remarque très clairement une accélération du milieu vapeur-gouttelettes entre le bas et le haut de la géométrie. Cela est dû au fait que les gouttelettes s'évaporent, ce qui engendre donc une augmentation du débit de vapeur. La vapeur s'accélère et entraîne les gouttelettes. On remarque bien évidemment des vitesses plus importantes au centre de la géométrie que près des crayons où s'exercent les frottements pariétaux.

Enfin, la figure 5 détaille l'évolution de la fraction volumique des gouttelettes. En s'élevant les gouttelettes vont s'évaporer et également se concentrer au centre de la géométrie (migration sous l'effet de la force de portance). Ainsi, on remarque sur l'axe B (près de la paroi) que la fraction volumique des gouttelettes chute très fortement sur les cinq premiers centimètres de l'écoulement et tend vers une valeur proche de 0. Au centre de la géométrie, les gouttelettes vont se concentrer sur les 5 à 10 premiers centimètres, provoquant une hausse de la fraction volumique malgré les effets d'évaporation. Ensuite, la concentration des gouttelettes va diminuer progressivement par évaporation.

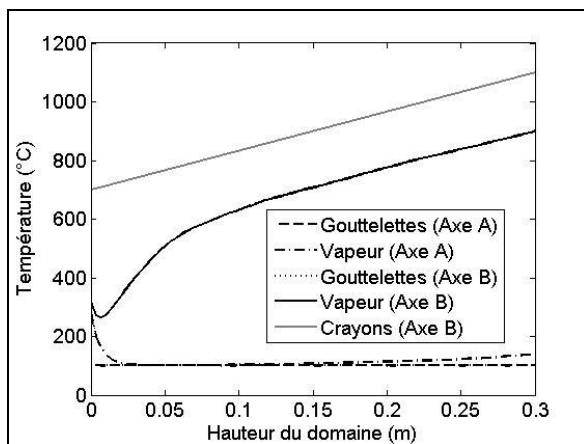


Figure 3 : Température des deux phases

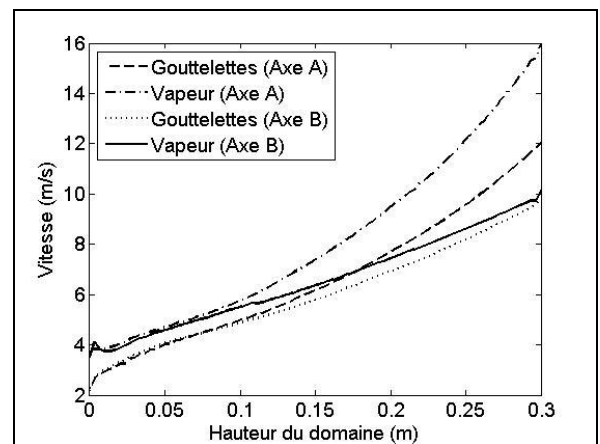


Figure 4 : Vitesse des deux phases

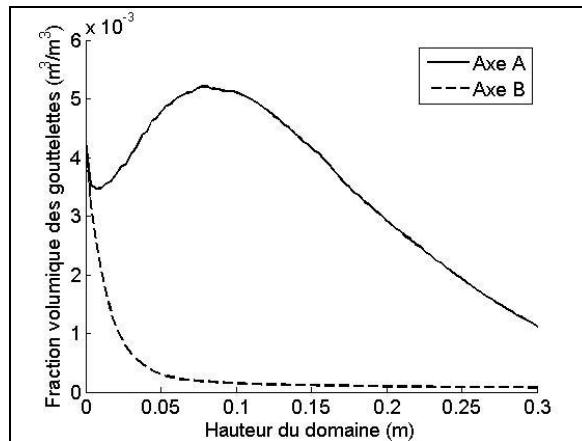


Figure 5 : Fraction volumique des gouttelettes

3.4. Transfert de chaleur

Nous allons maintenant nous intéresser au transfert de chaleur entre les crayons de combustible et le milieu vapeur-gouttelettes.

La figure 6 regroupe les flux de chaleur sur la paroi du crayon (axe B). On retrouve ainsi la part du flux convectif, radiatif et le flux échangé par impact de gouttelettes dans le flux total. On remarque que le flux convectif est le mode de transfert majoritaire, représentant environ 75% du flux total. Le flux radiatif compte pour un peu plus de 20% du flux total tandis que l'impact de gouttes a une influence uniquement en bas de la géométrie, lorsque la concentration en gouttelettes près des parois est élevée. Le flux convectif a tendance à augmenter avec la hauteur dans le domaine bien que l'écart de température entre la vapeur en proche paroi et les crayons reste relativement constant (voir figure 3). En effet, l'accélération de la vapeur augmente le coefficient de convection et induit ce flux croissant. Le flux radiatif est homogène suivant la hauteur, bien que les crayons soient plus chauds en haut qu'en bas de la géométrie. Ils émettent plus d'énergie en haut qu'en bas, mais le milieu est plus absorbant en bas de la géométrie qu'en haut. Les crayons ont donc tendance à rayonner entre eux en haut du domaine.

La figure 7 illustre la divergence de flux radiatif, représentant, pour chaque phase, la différence entre l'énergie radiative absorbée et l'énergie radiative émise. Près des parois, le milieu va recevoir relativement peu d'énergie radiative (le milieu est plus chaud près des crayons et émet donc pratiquement autant d'énergie radiative qu'il n'en absorbe). Les gouttelettes vont toutefois absorber beaucoup de rayonnement sur les premiers centimètres du fait de leur forte concentration (corrélation entre la courbe de divergence de flux et de fraction volumique des gouttelettes sur l'axe B). Au centre de la géométrie, on remarque que les gouttelettes jouent un rôle important dans le transfert radiatif puisqu'elles absorbent la majorité du rayonnement thermique, notamment émis par les crayons. Le transfert radiatif va donc contribuer à l'évaporation des gouttelettes.

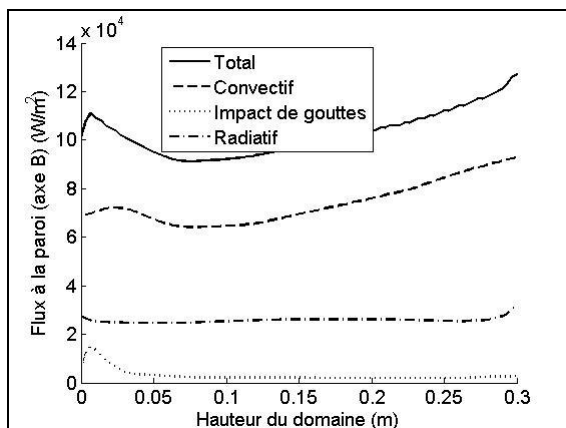


Figure 6 : Flux de chaleur sur le crayon

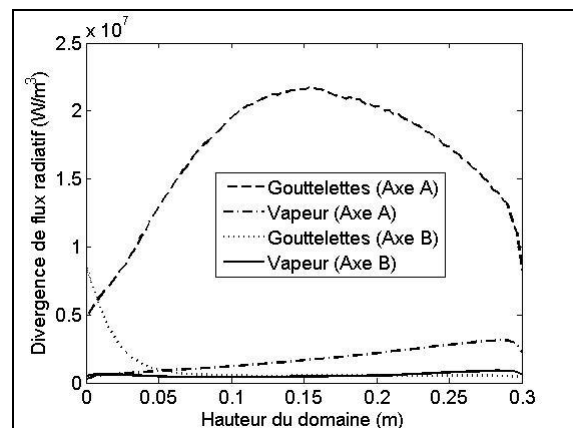


Figure 7 : Divergence de flux radiatif sur chaque phase

4. Influence du transfert radiatif

Nous avons étudié la sensibilité du transfert radiatif au diamètre ainsi qu'à la fraction volumique des gouttelettes en entrée. En outre, l'influence du transfert radiatif a pu être mesurée en effectuant des simulations avec ou sans prise en compte du transfert radiatif. La résolution du transfert radiatif a été effectuée avec l'IDA, utilisant une quadrature de type T_4 et en ayant une précision spectrale des propriétés radiatives du milieu sur 6 bandes. La comparaison entre ces différents calculs se fait sur la base de grandeurs intégrées sur l'ensemble du domaine de calcul telles que la masse des phases, le taux d'évaporation, la vitesse moyenne de chaque phase en sortie, ainsi que les puissances échangées entre les parois et l'écoulement selon les différents modes de transfert

Ainsi, la prise en compte du transfert radiatif induit une diminution des masses de vapeur et de gouttelettes (cf. tableau 3). En effet, le taux d'évaporation des gouttelettes est alors plus important. Le volume ainsi libéré pour la vapeur étant faible et la température de la vapeur étant globalement plus élevée en présence de transfert radiatif (ce qui diminue sa masse volumique), la masse de vapeur diminue également. La masse du milieu ayant diminué et le débit massique étant constant, la vitesse d'écoulement du milieu augmente, comme on peut le constater en sortie. Ces augmentations sont d'autant plus marquées que la concentration en gouttelettes est importante. On peut observer que les vitesses d'écoulement et le taux d'évaporation peuvent augmenter de presque 20% si l'on prend en compte le transfert radiatif. La masse de vapeur peut également diminuer de 10%.

Le tableau 4 donne les puissances échangées à la surface des crayons. Cette puissance va bien évidemment augmenter suite à la prise en compte du transfert radiatif, et ce de façon plus ou moins marquée en fonction de la concentration en gouttelettes (hausse du flux de chaleur total de 5% à 20% environ). La prise en compte du transfert radiatif va avoir une faible influence sur les autres modes de transfert. Ainsi, les phénomènes de convection sont légèrement diminués du fait d'une hausse de température de la vapeur en proche paroi, tandis que pour l'impact de gouttelettes, la plus faible concentration (induisant donc un nombre d'impact plus faible) est contrebalancée par l'augmentation de la vitesse des gouttelettes (augmentant ainsi les échanges à chaque impact).

Transfert radiatif	Diam. gouttes	Fv gouttes	Masse(mg)		Taux évap(mg/s)	Vitesses moyennes (m/s)	
			Vapeur	Gouttes	Gouttes	Vapeur	Gouttes
Sans	50µm	10-4 m ³ /m ³	5.85	0.399	33.40	9.31	11.45
Avec			5.79	0.385	33.47	9.44	11.59
Sans		5.10-3 m ³ /m ³	11.1	36.51	361.7	14.51	11.60
Avec			10.9	32.68	428.3	16.98	13.71
Sans	100µm	10-3 m ³ /m ³	8.03	12.10	204.5	13.95	10.24
Avec			7.90	11.48	215.4	14.96	10.83
Sans		5.10-3 m ³ /m ³	11.5	74.06	487.1	17.66	11.33
Avec			11.3	68.88	559.9	20.41	12.74

Tableau 3 : Masses, taux d'évaporation et vitesses moyennes dans les différents écoulements avec et sans prise en compte du transfert radiatif (indiqué en 1^{ère} colonne)

Transfert radiatif	Diam. gouttes	Fv gouttes	Flux total (W)	Convectif (W)	Impact gouttes (W)	Radiatif (W)
Sans	50µm	10 ⁻⁴	237.46	237.11	0.34	0
Avec			249.21	226.34	0.34	22.53
Sans		5.10 ⁻³	1008.0	988.50	19.4	0
Avec			1219.4	999.77	21.4	198.1
Sans	100µm	10 ⁻³	714.81	702.56	12.2	0
Avec			781.86	688.28	12.0	81.54
Sans		5.10 ⁻³	1349.4	1294.7	54.8	0
Avec			1590.6	1282.4	58.5	249.8

Tableau 4 : Puissance à la paroi pour les différents écoulements avec et sans prise en compte du transfert radiatif (indiqué en 1^{ère} colonne)

5. Conclusions

Nous avons testé et appliqué sur des situations d'APRP le code Neptune_CFD dans sa version intégrant un module de transfert radiatif. Les propriétés radiatives du milieu vapeur-gouttelettes sont évaluées en combinant théorie de Mie et modèle C-k, tandis que le transfert radiatif lui-même est résolu avec la méthode IDA.

L'écoulement a été analysé pour différentes conditions d'entrée permettant d'observer le rôle des gouttelettes et de leur évaporation. Les parts respectives d'échanges liés à la convection, à l'impact des gouttes et au rayonnement ont été quantifiées. Nous avons observé que la prise en compte du transfert radiatif modifie les transferts de masse et d'énergie d'environ 20%, ce qui confirme le rôle non négligeable joué par ce mode de transfert.

Références

- [1] A. Guelfi, D. Bestion, M. Boucker, P. Bourdier, Ph. Fillion, M. Grandotto, “NEPTUNE : a new software platform for advanced nuclear thermal hydraulics”, Nucl. Sci. Eng., 156, 2007, pp 281-324
- [2] J. Gerardin, N. Seiler, P. Ruyer, and P. Boulet, “Radiative transfer during the reflooding step of a LOCA”, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, In press : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.07.007>, 2012.
- [3] G. M. Hale and M. R. Querry, “Optical constants of water in the 200nm to 200 μ m wavelength region”. Applied Optics, 12, 1973, pp 555-563.
- [4] A. Soufiani, J. Taine, “High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow-band model for H₂O, CO₂ and CO, and correlated-k model for H₂O and CO₂”, Int. J. Heat Mass Transfer, 40(4), 1997, pp 987-991.
- [5] J. Gerardin, N. Seiler, P. Ruyer, L. Trovalet, P. Boulet, P1 approximation, MDA and IDA for the simulation of radiative transfer in a 3D geometry for an absorbing scattering medium. J. Quant. Spec. & Radiat. Transfer, 113(2), 2012, pp 140-149
- [6] IAEA, “Thermophysical properties of materials for water cooled reactors”, Technical report, 1999.