

Simulation des Grandes Echelles du faïençage thermique dans un Té de mélange

Frédéric AULERY¹, Adrien TOUTANT^{1*}, Raphaël MONOD², Guillaume BRILLANT²,
Françoise BATAILLE¹

¹Laboratoire PROMES, UPR CNRS 8521,
Rambla de la thermodynamique, Technosud, 66100 Perpignan, France.

²Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire,
BP 3, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex, France.

* (Adrien.Toutant@univ-perp.fr)

Résumé - L'augmentation de l'efficacité des centrales thermiques passe par l'utilisation de niveaux de températures très élevés. Un écart important de température est donc attendu entre les écoulements turbulents de caloporteurs qui convergent au niveau de certains Tés de mélange. L'équilibre thermique ne s'effectuant pas instantanément, des fluctuations de température peuvent se développer et induire des fissurations dans les canalisations par fatigue thermique. Afin d'étudier ces phénomènes, nous utilisons une approche numérique et en particulier la Simulation des Grandes Echelles. Ces travaux ont permis d'obtenir les cartes de fluctuations thermiques au niveau d'un Té de mélange de la centrale Phénix. Nous avons mis en exergue le rôle ainsi que l'importance de la prise en compte de la conduction dans les parois. Enfin, nous avons estimé le risque de faïençage thermique en étudiant les fréquences caractéristiques résultantes de ces fluctuations.

Nomenclature

| | | | |
|----------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| D | diamètre m | Φ_i | flux de chaleur $W.m^2$ |
| x | distance au centre de l'injection m | u_τ | Vitesse de frottement $m.s^{-1}$ |
| T | température, K | $y^+ = y \frac{u_\tau}{\nu}$ | Distance adimensionnée à la paroi |
| P_{rt} | Prandtl turbulent | <i>Indices et exposants</i> | |
| Q | débit de caloporteur, $kg.s^{-1}$ | c | chaud |
| ν | Viscosité cinématique $s.m^{-2}$ | f | froid |

1. Introduction

Alors que la consommation énergétique mondiale atteint des valeurs inégalées, l'utilisation de centrales électriques plus performantes devient indispensable. L'augmentation de l'efficacité des centrales passe par l'utilisation de niveaux de températures plus élevés. Dans ces centrales, des Tés de mélange sont présents ; ils joignent deux arrivées de caloporteur présentant parfois un important écart de température. L'équilibre thermique ne s'effectuant pas instantanément, des fluctuations thermiques se développent et peuvent induire des fissurations dans les canalisations par fatigue thermique. C'est le faïençage thermique. La prédiction du problème de faïençage thermique est donc indispensable à l'avenir des centrales à haut rendement de conversion. Les contraintes subies par les matériaux dépendent de l'amplitude et de la fréquence des fluctuations thermiques. En fonction des contraintes, on distingue 3 types de faïençage thermique :

- Apparition de fissures importantes en 1/4 de cycle thermodynamique;
- Apparition de fatigue thermique de faible cyclage qui induit des déformations et des fissures en moins de 50000 cycles ;
- Apparition de fatigue thermique de fort cyclage qui produit des fissures pour un nombre de cycles supérieur à 50 000.

Les effets de la fatigue thermique sont gouvernés par la capacité du solide à résister aux contraintes thermomécaniques et par la propension du fluide à générer et transporter les fluctuations thermiques à la paroi. Un fluide caloporteur intéressant, pour la conversion énergétique, le stockage et ses propriétés de conductivité thermique importante, est le sodium liquide. Cependant, les problèmes de fatigue thermique sont amplifiés par l'utilisation du sodium car celui-ci permet un transfert des fluctuations de température du fluide aux parois avec une très faible atténuation. De plus, une fuite de sodium doit absolument être évitée car sa réaction avec l'air ou l'eau est très forte et peut induire de gros dommages aux structures environnantes (comme observé à la plateforme solaire d'Almeria en 1986 [1]).

La prévision de la fatigue thermique se base sur l'évaluation des conditions thermo-hydrauliques à travers des expériences ou des simulations de type CFD (Computational Fluid Dynamics). Différentes méthodes sont possibles pour réaliser les calculs numériques. Plusieurs configurations de Té de mélange ont été résolues en utilisant les méthodes RANS (Reynolds Average Navier Stokes – [2], [3]), les méthodes de SGE (Simulation des Grandes Echelles – [4], [5], [6]) et par SND (Simulation Numérique Directe – [7]) mais ces études ne tiennent pas compte de la totalité de la géométrie et/ou des transferts thermiques dans les parois.

Une première approche, utilisant des simulations RANS, a déjà été réalisée [8]. Dans ce travail, nous utilisons le code Fluent avec un modèle de turbulence de type SGE (Simulation des Grandes Echelles) pour réaliser la simulation d'un écoulement de sodium dans un Té de mélange. Dans un premier temps, nous décrivons la configuration étudiée et les conditions numériques associées. Après la présentation de la génération de la turbulence en entrée de conduite, nous discuterons les résultats en nous concentrant sur les fluctuations thermiques obtenues.

2. Configuration étudiée

La fatigue thermique est la conséquence des fluctuations thermiques. Dans le but d'analyser ces fluctuations, nous utilisons un modèle de turbulence de type SGE. Les simulations sont réalisées avec le logiciel Fluent.

2.1 Description du Té de mélange.

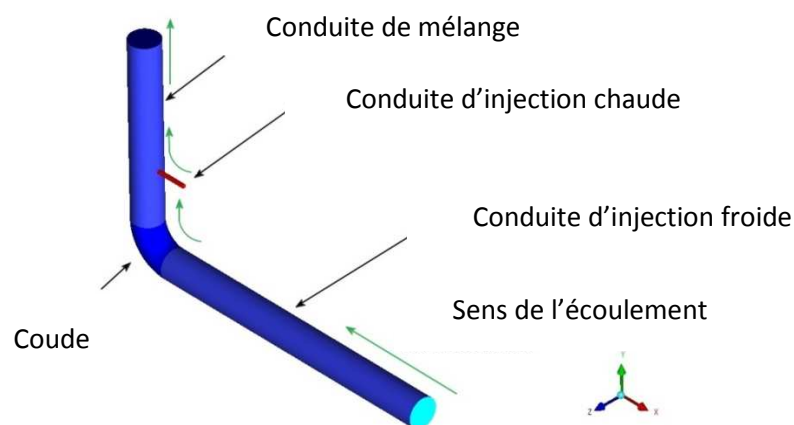


Fig. 1. Géométrie du Té de mélange

La figure 1 représente le Té de mélange de la centrale Phenix pour lequel des données sont disponibles dans la littérature [9]. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Une conduite d'injection de fluide froid d'un diamètre de 494 mm et long de 5 m. Le débit de fluide est de 800 kg.s^{-1} pour une température de 613K,
- Un coude qui fait la jonction entre la conduite d'injection froide et la conduite de mélange,
- Une conduite de mélange (3m) qui a le même diamètre que la conduite froide,
- Une conduite d'injection de fluide chaud (68 mm de diamètre et 0,5 m de long). Cette conduite est fixée à 0,9 m au dessus du coude. Le débit de fluide chaud est de 7 kg.s^{-1} pour 703K.
- Le fluide est du sodium liquide.
- Les parois sont faites en acier inoxydable AISI 304, avec une épaisseur de 7 mm.

2.2 Paramètres numériques de simulation.

Pour réaliser nos simulations, nous avons utilisé plusieurs maillages. Dans le cadre de cet article, nous présentons la simulation la plus précise, comprenant un maillage de 4,8 millions de mailles. La paroi de la conduite principale est maillée (7 mailles dans l'épaisseur) ; ce qui va nous permettre un couplage entre la thermique du solide et du liquide. Le maillage est fortement raffiné près des parois, afin d'obtenir un $y^+ \cong 2$. L'obtention d'un $y^+ = 1$ demanderait un raffinement beaucoup trop important à cause des très petites échelles de turbulences.

Nous utilisons un modèle de turbulence de type SGE avec un modèle sous maille dynamique WALE (Wall Adaptative Local Eddy-viscosity – [10]) et un modèle sous maille thermique à nombre de Prandtl turbulent constant ($P_{rt} = 0,85$). Ce modèle nous assure un comportement très réaliste en proche paroi (Brillant *et al.* [11-13]) et donc dans la zone directement liée au faïencage thermique. Les conduites sont calorifugées ce qui est modélisé par une condition de flux de chaleur nul à l'extérieur de la paroi. Le calcul est initialisé à partir des valeurs d'un précédent calcul résolu par modèle RSM (Reynolds Stress Model). Pour avoir une turbulence pleinement développée, nous utilisons la méthode des vortex associée à des profils de vitesse (obtenus en RSM) comme conditions d'entrées [14].

3. Résultats

3.1 Profil moyen de température.

La figure 2 représente le profil moyen de température le long de la paroi après l'injection de fluide chaud. La courbe continue (—) est celle obtenue par notre calcul RANS et qui a servi à initialiser le calcul. La courbe discontinue (--) est la SGE réalisée pour cette étude. Les triangles sont des points obtenus expérimentalement [9]. Enfin, la courbe pointillée (---) est celle donnée par une pseudo-DNS avec le code Dinus-3 (Muramatsu *et al.* [9]). Cette simulation de la littérature est celle dont les résultats approchent le mieux l'expérience

L'ensemble des profils de température suivent une décroissance rapide. Ceci s'explique par le débit de fluide chaud qui est plus de 100 fois inférieur à celui du fluide froid. La distance de retour à l'équilibre thermique est donc très petite. Nous pouvons observer que l'utilisation d'un modèle SGE donne un résultat différent du modèle RANS et nous permet d'obtenir des résultats proches de l'étude expérimentale. De la même façon, notre calcul diffère de la pseudo-DNS mais semble plus proche de l'expérience. Ceci peut s'expliquer par le fait que la paroi est maillée dans notre cas, ce qui donne une meilleure précision du champ de température. On remarque qu'entre $\frac{x}{D_c} = 2$ et $\frac{x}{D_c} = 5$, la courbe s'écarte légèrement des résultats expérimentaux. Cette zone est celle comprenant la plus forte intensité turbulente. Il serait

nécessaire de mailler plus finement à cette partie du domaine pour obtenir un champ parfaitement résolu. Finalement, le calcul par SGE fournit des grandeurs moyennes en très bon accord avec l'expérience.

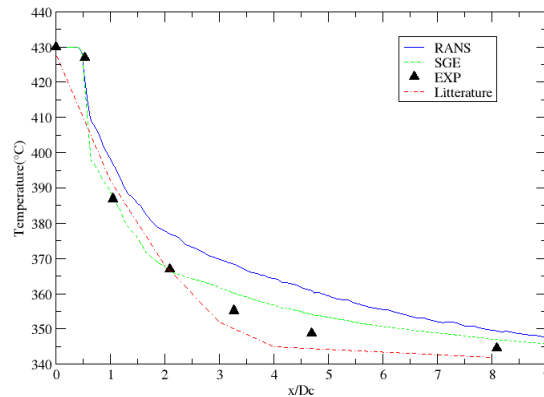


Fig. 2. Profils de température moyenne le long de la paroi

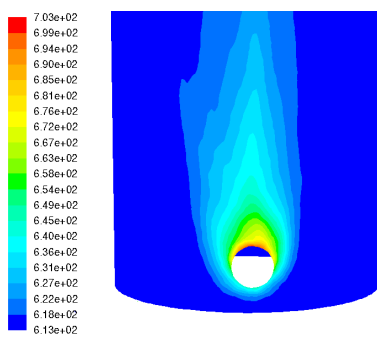


Fig. 3. Température moyenne à l'interface (K)

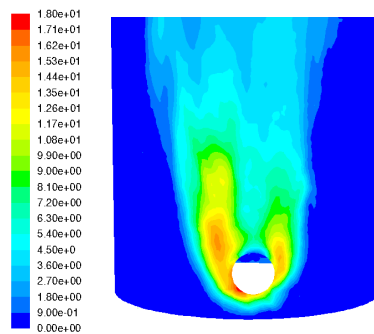


Fig. 4. Fluctuation moyenne de la température à l'interface (K)

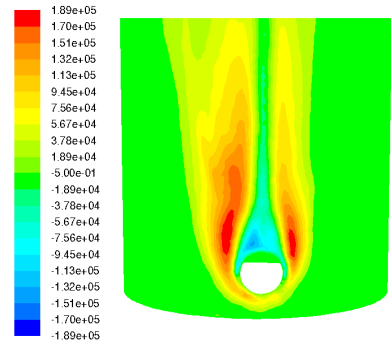


Fig. 5. Flux de chaleur à l'interface liquide/solide (W/m²)

En comparant les figures 3 et 4 où sont représentés respectivement, les champs de température moyenne et de fluctuation de température, on s'aperçoit que les zones de températures moyennes hautes ne correspondent pas aux zones de grandes fluctuations thermiques. La turbulence présente dans ces zones permet un échange convectif important entre le fluide et la paroi. Le flux de chaleur local étant de 19000 W/m² en moyenne (voir figure 5), la température de paroi varie avec le renouvellement de la couche limite par du fluide froid ce qui provoque des fortes fluctuations de la température.

Dans le même temps, le fluide de la zone chaude (figure 4) transfère beaucoup de chaleur à la paroi (figure 5). Un flux interne à la paroi de l'ordre de 30 000 W/m² (non représenté) transfère la chaleur latéralement vers les zones de hautes fluctuations. La chaleur transmise par le fluide de la zone chaude (θ_1) est donc évacuée par la paroi (θ_2) avant d'être retransmise au fluide froid (θ_3) dans la zone de grandes fluctuations (figure 6).

Les deux zones de grandes fluctuations correspondent à la localisation expérimentale des fissures. En effet, les fissures sont apparues de part et d'autre de la jonction [9]. Ainsi, notre simulation permet de mettre en évidence des zones de fortes fluctuations de température dont les ΔT et flux de chaleur sont suffisamment importants pour provoquer le faïençage thermique.

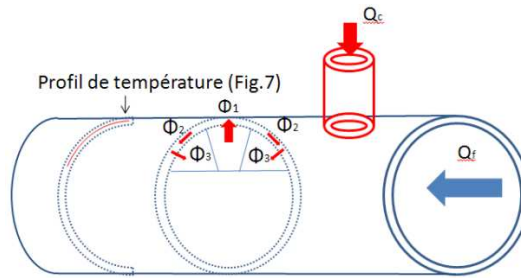


Fig. 6. Circulation du flux de chaleur dans le Té de mélange

3.3 Densité de puissance spectrale des intensités turbulentes.

La densité spectrale de puissance (PSD pour Power Spectrum Density) donne la répartition de l'amplitude des fréquences obtenues par transformation de Fourier d'un signal. La figure 7 représente la densité spectrale de puissance de la température dans une zone de fortes fluctuations thermiques et dans une zone de faibles fluctuations thermiques.

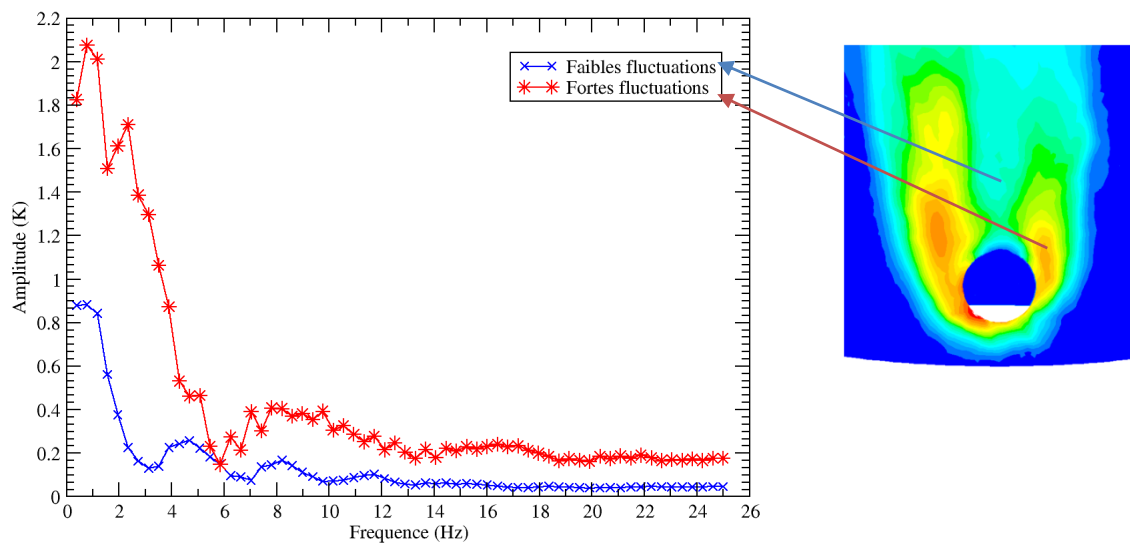


Fig. 7. Densité spectrale de puissance d'un spot de fluctuation.

On notera que le spectre « fortes fluctuations » comporte plus de hautes fréquences avec une largeur de spectre sur le premier pic deux fois plus importante. Il est intéressant d'observer que les fréquences remarquables obtenues en zone fortement fluctuante sont à peu près le double des fréquences remarquables de la zone de faibles fluctuations mais qu'une corrélation aussi simple n'est pas possible pour les amplitudes.

Dans la littérature [9], des modèles mécaniques ont été utilisés avec des fréquences propres similaires aux deux jeux de fréquences obtenus et ont montré la possibilité de développer des fissures avec des caractéristiques en taille et en temps identiques aux relevés expérimentaux. Il est alors possible d'affirmer que la simulation réalisée prévoit une fatigue thermique de type fort cyclage dans les zones de hautes fluctuations.

4. Conclusion

L'évaluation du risque de faïençage thermique dans des zones de mélange où se rencontrent des écoulements à différentes températures nécessite des simulations thermo-hydrauliques précises. Dans cette étude, des simulations par SGE ont été réalisées sur la configuration d'un Té de mélange de la centrale Phénix pour laquelle des mesures expérimentales sont disponibles dans la littérature.

La comparaison des profils moyens de température avec l'expérience et avec des études numériques précédentes montre que le champ de température est bien calculé dans nos simulations. La prise en compte de la conduction de la chaleur dans la paroi de la conduite principale permet une meilleure résolution du champ thermique dans la zone de mélange. Les zones de fortes fluctuations sont celles où la paroi cède le plus de chaleur au fluide. Les cartes des fluctuations de température ont permis de localiser les zones possibles de faïençage avec une très bonne correspondance avec celles observées expérimentalement sur ce Té de mélange [9]. Enfin, l'analyse de ces fluctuations thermiques par transformation de Fourier a mis en évidence des fréquences caractéristiques dommageables pour la conduite.

Références

- [1] Luster, V.P. and K.F. Freudenstein, 1996, Feedback from Practical Experience with Large Sodium Fire Accidents, in Technical Committee Meeting on Evaluation of Radioactive Materials Release and Sodium Fires in Fast Reactors, O-aria, Ibaraki, Japan, November 11-14, 1996.
- [2] T. Frank, C. Lifante, H.-M. Prasser, F. Menter, Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using urans and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX. Nuclear Engineering and Design, Volume 240, Issue 9, September 2010, Pages 2313-2328
- [3] E. Marzari, H. Ninokata, E. Baglietto, Large eddy simulation of the flow in a T-junction, in: ICAPP 2009, Tokyo, Japan, 2009, p. 9463.
- [4] J.-P. Simoneau, H. Noe, M. Bernard, Large eddy simulation of sodium flow in a tee junction comparison of temperature fluctuations with experiments, in: ICONE 5, Nice, France, 1997.
- [5] W. Y. Zhu, T. Lu, P. X. Jiang, Z. J. Guo, K. S. Wang, Large eddy simulation of hot and cold fluids mixing in a T-junction for predicting thermal fluctuations, Applied Mathematics and Mechanics (English Edition) 30 (11) (2009) 1379-1392.
- [6] P. Coste, P. Quemere, P. Roubin, P. Emonot, M. Tanaka and H. Kamide, Large Eddy Simulation of a mixing-T experiment, *ICAPP Proceedings* June 4–8, 2006, Reno, NV, USA (2006).
- [7] Fukushima, N., Fukagata, K., Kasagi, N., Noguchi, H., Tanimoto, K., 2003. Numerical and Experimental Study on Turbulent Thermal Mixing in a T-junction Flow, ASMEJSME Thermal Engineering Joint Conference, March 16–20, 2003.
- [8] F. Aulery, A. Toutant, R. Monot, G. Brillant, F. Bataille, Numerical simulations of thermal fatigue due to turbulent fluctuations in a mixing tee, 16th International Solar Paces Concentrating Solar Power Symposium, 2010. Sept 21-24 2010.
- [9] O. Gelineau, M. Sperandio, J. P. Simoneau, J. M. Hamy, P. H. L. Roubin, Validation of fast reactor thermomechanical and thermohydraulic codes. Final report of a co-ordinated research project 1996-1999, Tech. Rep. tecdoc1318, IAEA (2002).
- [10] F. Nicoud and F. Ducros. Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor. *Flow, Turbulence, and Combustion*, 62(3):183–200, 1999.
- [11] G. Brillant, F. Bataille and F. Ducros. Large-eddy simulation of a turbulent boundary layer with blowing, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 17, n° 5-6, p. 433-443, 2004.
- [12] G. Brillant, F. Bataille and F. Ducros. Subgrid-scale diffusivity: wall behaviour and dynamic methods, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 73, n°3, p. 360-367, 2006.
- [13] G. Brillant, F. Bataille and F. Ducros. Study of the blowing impact on a hot turbulent boundary layer using Thermal Large Eddy Simulation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 51, Issues 7-8, pp. 1996-2005, 2008
- [14] E. Sergent. Vers une méthodologie de couplage entre la Simulation des Grandes Echelles et les modèles statistiques. PhD thesis, L'École Centrale de Lyon, Lyon, France, 2002.