

Convection mixte à travers un réseau de tubes de grande dimension – Expérience et interprétation.

Bernard DURET^{1*}, Jean Claude BONNARD¹, Sophie BOURNAUD²

¹Laboratoire de Thermohydraulique Gaz et Diphasique -CEA Grenoble 17, rue des Martyrs 38054 Grenoble Cedex 9, * (auteur correspondant : bernard.duret@cea.fr)

²EDF R&D, Dept. MFEE, 6 Quai Watier BP 49, F-78401 Chatou Cedex,

Résumé - L'expérimentation menée sur l'installation VALIDA a permis d'obtenir une base de données évaluant le refroidissement sous air d'un réseau de 7 rangées de tubes (diamètre 0.64m et hauteur 2m) en quinconce, verticaux et chauffants traversé par l'écoulement transverse d'une veine aéraulique conçue spécialement à cet effet (longueur: 12m et largeur: 2m13). Pendant les essais, le débit d'air et la densité de puissance sont contrôlés. Pour chaque régime permanent étudié le profil de vitesse d'entrée est connu, on présente les températures locales des cylindres ainsi qu'une visualisation des panaches d'air chaud par des isothermes pour différents plans de la veine. Les essais où prédomine la convection forcée transverse et les autres où c'est la convection naturelle sont identifiés.

Nomenclature

D	Diamètre des cylindres, m	V	Vitesse, $m.s^{-1}$
Gr*	Nombre de Grashof ($g\beta P s x^4/\lambda\nu^2$)	<i>Symboles grecs</i>	
H	Hauteur cylindre, m	β	Coefficient d'expansion thermique, K^{-1}
h	Coefficient d'échange thermique, $W.m^{-2}K^{-1}$	λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}K^{-1}$
P	Pas du réseau, m	ν	Viscosité cinématique, $m^2 s^{-1}$
Pr	Nombre de Prandt	<i>Indices et exposants</i>	
Ps	Densité de puissance, $W.m^{-2}$	f	fluide
Re	Nombre de Reynolds ($Re= D V/ \nu$)	moy	moyen
Ri	Nombre de Richardson ($Ri= g\beta\Delta TL /V^2$)	x	valeur locale
T	Température, C		

1. Introduction

Ce travail a été développé dans le cadre du programme Français sur l'Entreposage Longue Durée des déchets radioactif à vie longue [1]. Un des concepts considéré est un grand hall où les cylindres contenant la matière radioactive sont positionnés verticalement et refroidis par une ventilation naturelle d'air. Dans de tels concepts, on doit démontrer que les températures des parois environnantes ne dépassent pas des valeurs limites choisies préalablement.

Les évaluations thermiques-aérauliques exigent selon les besoins, des calculs à plusieurs niveaux de sophistication : du calcul filaire le plus simple, en passant par une approche type milieu poreux [2] pour finir à des calculs 3D globaux et locaux CFD (RANS ou LES) [3]. Quelle que soit l'approche, ces calculs exigent des données expérimentales fiables sur des expériences représentant au mieux les phénomènes physiques intervenant. Les cartes d'écoulement de températures sont nécessaires pour connaître les transferts thermiques locaux en régime permanent, mais sur ce sujet peu de travaux existent surtout dans le cas de la convection mixte en régime turbulent.

2. Choix des conditions aux limites

Par une approche adimensionnelle, et à partir des équations de base de la thermohydraulique on aboutit pour ce type de problème à des groupes de similitude,

caractéristiques de la convection mixte : Re , Pr et Ri nombre de Richardson représentant le rapport des forces ascensionnelles sur les forces d'inertie. Une difficulté vient d'abord que la dimension caractéristique n'est pas la même pour Re et Ri et que Ri qui fait intervenir ΔT écart de température (entre colis et air) est a priori inconnu avant l'essai. C'est la raison pour laquelle certains utilisent un Richardson ($Ri = g\beta\Delta TL / V^2$) global basé sur l'échauffement à travers la section d'essai (ΔT) et une longueur caractéristique L correspondant à la hauteur de la salle. C'est le cas pour les essais réalisés au CRIEPI [4] avec des colis de petite dimension, ils avaient montré que lorsque $Ri < 3$ (Ri global); le régime en convection forcée est prépondérant et les corrélations classiques d'échanges à travers des réseaux peuvent être appliquées. Les conditions des essais sont choisies pour couvrir ces deux grands domaines.

Appellation	P_s moy (W/m^2)	V_{moy} (m/s)	Re	Gr^*	Ri global $H=3m$	Ri global $H=2m$
Multi300V1	300	1	42000	$2,1E+13$	0,3	0,2
Multi600V1	600	1	42000	$3,6E+13$	0,6	0,4
Multi300V0p5	300	0,5	21000	$2,1E+13$	2,4	1,6
Multi600V0p5	600	0,5	21000	$3,6E+13$	4,8	3,2
Multi300V0p25	300	0,25	11000	$2,1E+13$	20	13
Multi600V0p25	600	0,25	11000	$3,6E+13$	38	25

Tableau 1 : Grille des essais choisis

Remarques :

- Selon la hauteur du plafond l'essai *Multi300V1* sera appelé *Hp2m300V1* ou *Hp3m300V1*
- Dans notre cas, après chaque essai on peut calculer un écart moyen ΔT entre colis et air, et ainsi calculer le nombre de Richardson d'une façon plus classique $Ri = g\beta\Delta TH / V^2$.

3. Dispositif expérimental

La maquette VALIDA est avant tout une veine aéraulique (longueur 12m, largeur 2m13 et hauteur variable jusqu'à 3m) permettant d'imposer un débit connu et une vitesse uniforme à une section d'essai dégageant une puissance électrique également contrôlée. La conjonction des vitesses incidentes et des puissances données dans le tableau précédent, permet de représenter les différentes conditions d'écoulement des halls d'entreposage qui nous intéressent.

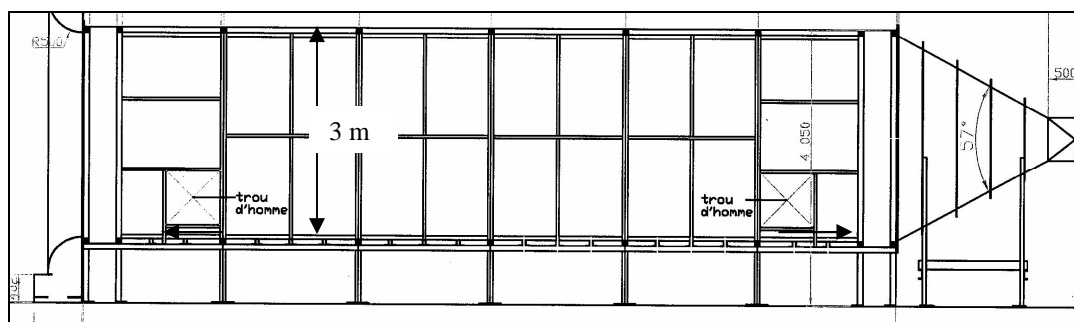


Figure 1 : Veine d'air VALIDA

La vitesse d'air la plus uniforme possible a été obtenue en créant une perte de charge importante grâce à deux grilles métalliques placées à l'entrée de la veine. La turbulence est ensuite diminuée par l'adjonction de plusieurs toiles de nylon permettant d'atteindre un taux de turbulence de l'ordre de 2 à 3%. Après avoir étudié un cylindre chauffant seul [5], un réseau de tubes chauffants (diamètre 0.64m et hauteur 2m) a été placé dans la veine et étudié pour différentes hauteurs de plafond. Un réseau de 7 rangées a été réalisé en utilisant 10 cylindres et 8 demi-cylindres. Les 18 colis placés en quinconce avec un pas triangulaire fixe

($P/D = 1.66$) ont été fabriqués spécialement. Pour les colis chauffants, la paroi interne est équipée de cordons chauffants régulièrement positionnés pour obtenir la densité de puissance recherchée. Leur surface externe est polie « miroir » pour éliminer au mieux les échanges radiatifs.

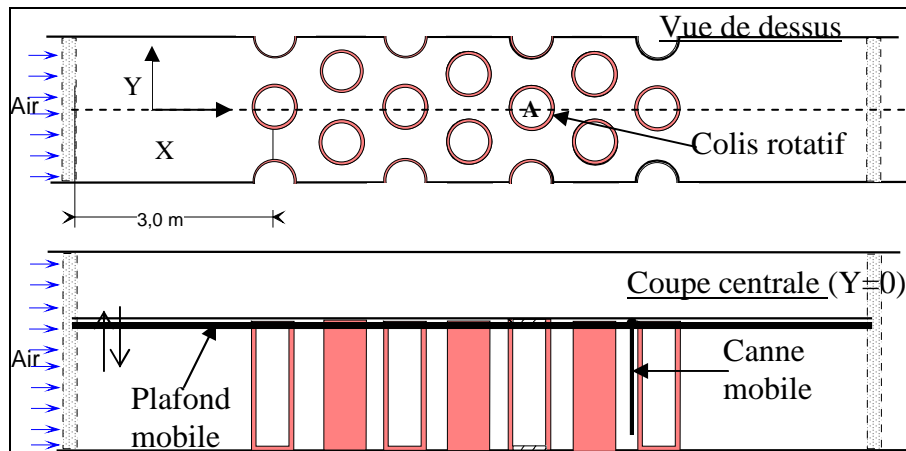


Figure 2 : Section d'essais étudiée

Un cylindre spécial a été équipé d'une génératrice de 10 thermocouples placés dans l'épaisseur de la paroi en acier de 5mm. Ce dispositif combiné à la rotation du cylindre sur son axe permet de connaître la distribution de température du cylindre complet. Une canne munie de 10 thermocouples est suspendue au plafond, grâce à deux moteurs elle peut être déplacée dans toute la veine. Ces Tc type K de diamètre 0.5mm sont munis sur les derniers centimètres d'une couche d'or afin de minimiser l'influence radiative des colis chauds. En résumé, l'instrumentation comprend 96 Tc (thermocouples) de paroi (84 sur les cylindres et 12 sur les murs), et 18 dans l'air. La veine est équipée de 2 systèmes de vélocimétrie laser : LDV et PIV qui permettent de vérifier l'uniformité de la vitesse d'air en entrée de veine.

4. Description des essais

Pour les deux hauteurs de plafond étudiées (2 et 3m), on impose la densité de puissance souhaitée (300 ou 600W/m²) et la vitesse amont (0.25 m/s à 1 m/s). On mesure l'évolution des températures de la génératrice équipée du colis A (brutalement perturbées à chaque rotation).

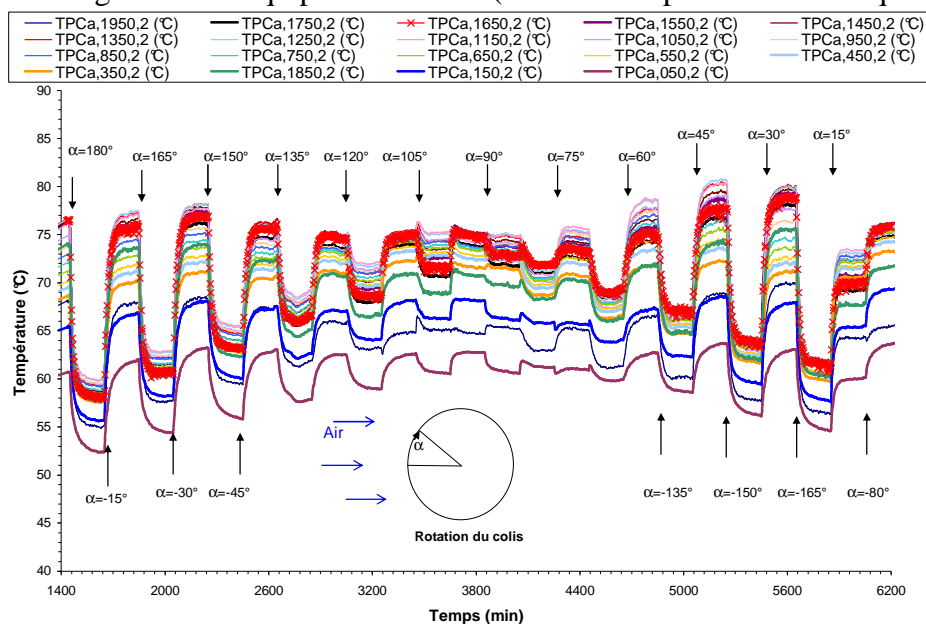


Figure 3 : Evolution des T_{paroi} du colis rotatif (cas $P=600Wm^2$ $V=1m/s$ et $h_{plafond}=2m$)

Différentes positions angulaires du colis rotatif sont explorées pour des durées de stabilisation de 3 à 4h. L'essai couvrant 32 positions angulaire dure environ 5 jours. A partir des régimes permanents obtenus des cartes de températures du colis sont tracées (les températures mesurées sont translatées en supposant une température d'entrée de 20°C).

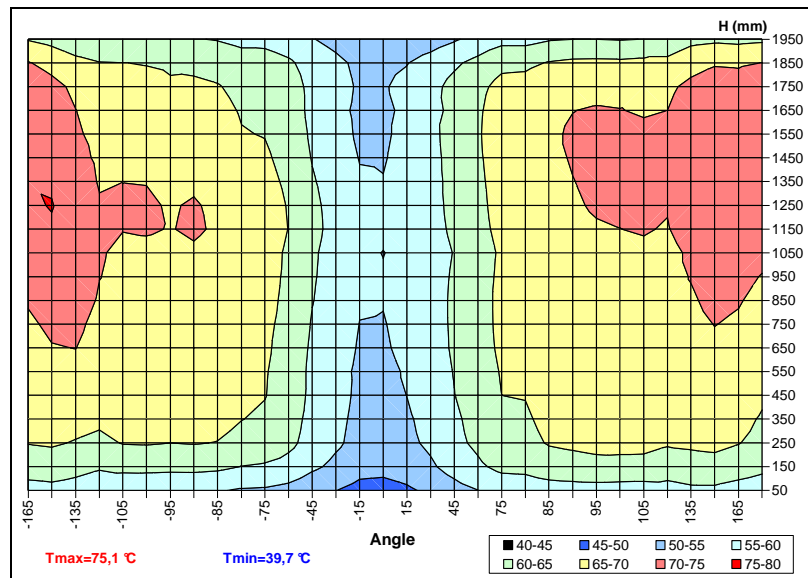


Figure 4 : Obtention des températures locales du colis rotatif ($P=600Wm^2$ $V=1m/s$ et $h_{plafond}=2m$)

Les échanges thermiques plus faible sur le côté ou à l'arrière sont ainsi directement visible. Par ailleurs, la canne support de thermocouples se déplace de 2 façons : elle parcourt toute la veine mais elle peut aussi effectuer une rotation autour du colis A en respectant les mêmes 32 positions angulaires à une distance variable de la paroi du colis. De cette façon, pour chaque condition aux limites, on obtient les répartitions des températures en régime établi de l'air et des colis chauds. Grâce à des acquisitions rapides (jusqu'à 100Hz), on peut obtenir des données sur des fréquences caractérisant l'écoulement en différents points du réseau de tubes.

5. Synthèse et perspectives

Les six conditions du tableau ont été réalisées avec une hauteur de plafond de 3m, seulement cinq ont été réalisés lorsque le plafond affleurait les colis de 2m. Un exemple de cartographie comparative des températures d'air est donné en figure 5. A partir des températures mesurées (à la paroi et dans l'air) et du flux électrique, on a calculé dans chaque cas les coefficients d'échanges ceci pour tous les colis (précision $\pm 10\%$). Pour le colis rotatif, nous fournissons ci-après, les températures minimales et maximales ainsi que la valeur minimale (au col) des coefficients d'échanges en $W/m^2°C$ puis la valeur moyennée sur la surface du colis.

Appellation	$H_{plafond} = 3 m$				$H_{plafond} = 2 m$			
	T_{min}	T_{max}	h_{min}	h_{moy}	T_{min}	T_{max}	h_{min}	h_{moy}
Multi300V1	40	57	8	10	30	48	12	15
Multi600V1	54	88	9	11	40	75	13	15
Multi300V0p5	42	67	6,5	8	42	66	8	10
Multi600V0p5	59	108	7	9	59	108	8	10,5
Multi300V0p25	43	71	6	7	46	86	6	8
Multi600V0p25	59	115	6	8,5				

Tableau 2 : Principaux résultats au niveau du rang 5

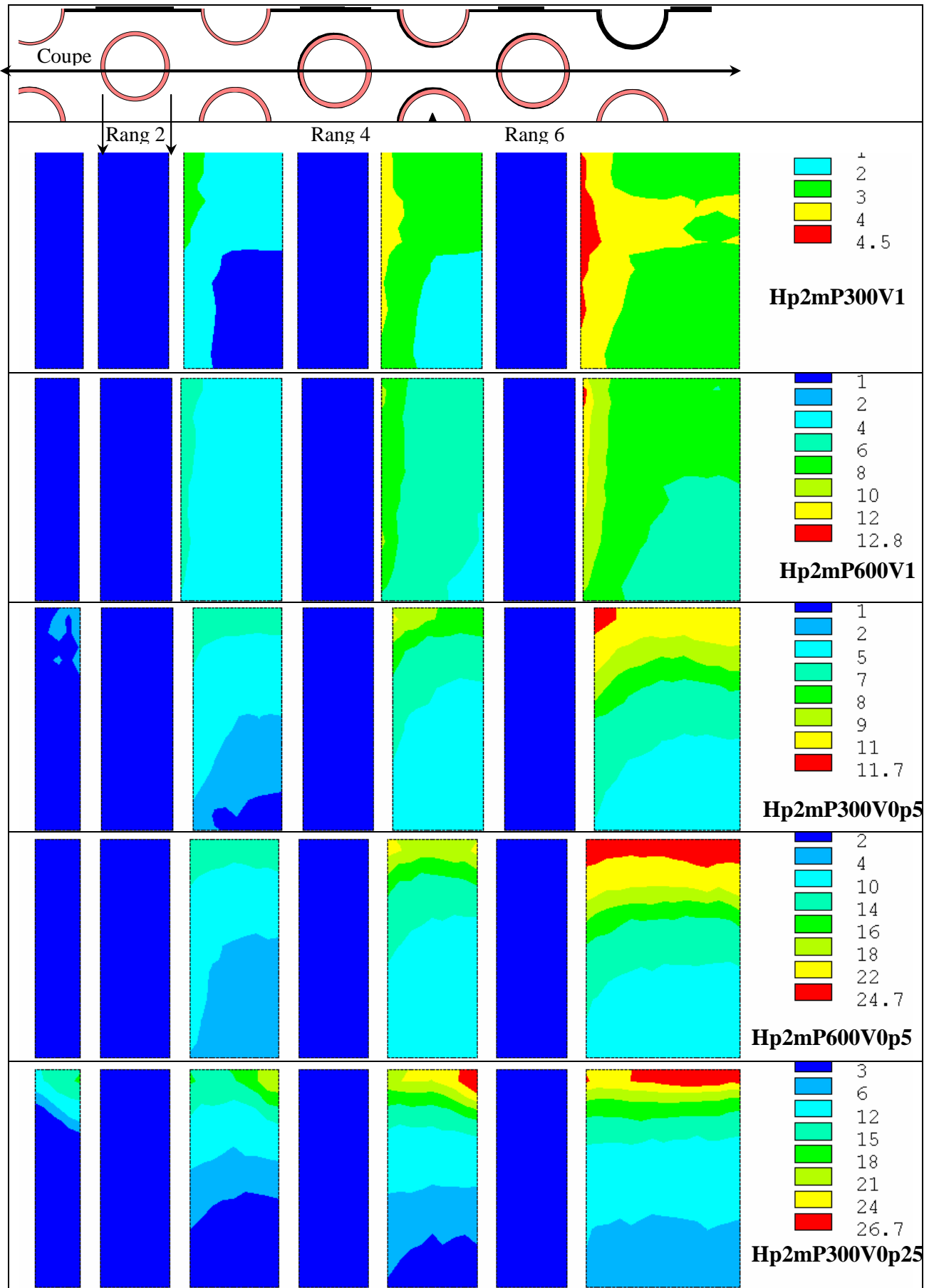


Figure 5 : Visualisation des échauffements de l'air (Y=527mm)

Les valeurs locales du coefficient d'échange sont accessibles pour tous les colis. Lorsqu'on analyse ceux du colis A, il apparaît que leur profils dépendent du régime thermohydraulique.

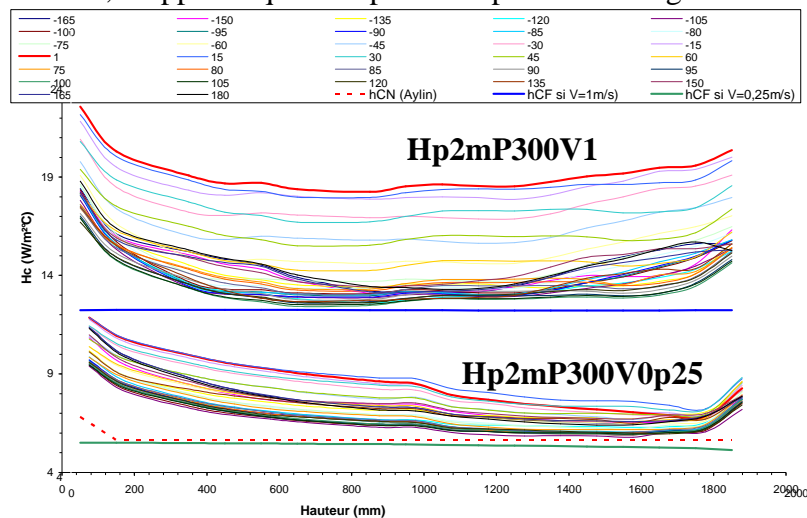


Figure 6 : Evolution axiale des coefficients d'échanges

Les différents essais réalisés sur la boucle VALIDA fournissent une base de données thermohydraulique essentielle pour une bonne approche scientifique des phénomènes de convection mixte intervenant autour d'un réseau de tubes chauffants de grande dimension. Les conditions aux limites des 6 essais présentés sont bien contrôlées, ce qui permet une analyse fine des mesures. Différentes valeurs de puissance et de débit d'air ont été testées, ce qui a permis de couvrir un large domaine thermoaéraulique $11 \cdot 10^3 < Re_D < 42 \cdot 10^3$ et un nombre de Richardson de 0.2 à 38. Après une comparaison avec les corrélations de la littérature, les différents essais ont été classés en faisant apparaître un nombre de flottabilité Bo^* classique en convection mixte de type UHT ($Bo^* = Gr_z^* / Re_x^{3.2}$). Pour chaque essai, on a montré que si $10^{-3} < Bo^* < 3 \cdot 10^{-2}$ les échanges moyens peuvent être évalués par une corrélation de type convection forcée, par contre si $Bo^* > 0.08$, la convection naturelle gouverne. En parallèle de cette analyse physique préliminaire des essais VALIDA, des calculs numériques [2],[6],[7] vont se poursuivre pour les cas présentés, l'objectif final étant d'abord de valider les outils numériques puis de les utiliser pour le dimensionnement d'entrepôts réels.

Remerciements

Nous tenons à remercier EDF qui a participé activement à ce programme.

Références

- [1] Lagrave H, Duret B, Gaillard JP, Thermo-aerualics of high level waste storage facilities, *European Nuclear Conference*, Dec 2005
- [2] Berthoux M., 2001, Interim Storage Modelisation. Methodology and Computation Using TRIO, *CEA/LETS 2001-156*
- [3] Archambeau Fr., Méchitoua, N., Sakiz, M., Code_Saturne : A Finite Volume Code for the Computation of Turbulent Incompressible Flows - *Industrial Applications, International Journal on Finite Volumes*, 2004
- [4] Heat removal characteristics of vault storage system with cross flow for spent fuel – K Sakamoto, T Koga, M Wataru (CRIEPI) – *Nuclear Engineering and Design* 195 (2000) 57-68
- [5] Duret, B., Bonnard, JC., Chataing, T., Colmont, D., VALIDA mock up-Experimental results on turbulent heat transfer in mixed-convection for one large vertical heating cylinder in air cross-flow., *Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT06)*, Dubrovnik, Croatia, Sept 25-29, 2006
- [6] Bournaud, S., Duret, B., Berthoux M, S, Mixed-Convection From Heating Tube Bundle In A Cross-Flow Air-Circulation. Experiment And Analysis - 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. Sept 30-Oct 4, 2007
- [7] Champigny, J., Simoneau, JP, Duret B. LES experiment comparison of mixed-convection around a large vertical cylinder - 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. September 30-October 4, 2007