

Transferts turbulents de chaleur au sein d'un jet d'air plan en impact

Michel PAVAGEAU^{1*}, Rodrigo DEMARCO², Juan-Carlos CELIS-GONZALEZ²,
Juan-Carlos ELICER-CORTES², Claude REY³

¹Ecole des Mines de Nantes, Département Systèmes Energétiques et Environnement,
GEPEA (UMR CNRS 6144) - 4 rue A. Kastler, BP 20722, 44307 Nantes, Cedex 03

* (auteur correspondant : michel.pavageau@emn.fr)

²Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica
Beauchef 850, Piso 5°, Santiago, Chile

³MSNMGP-UMR CNRS 6181, Université Paul-Cézanne d'Aix-Marseille

IMT - La Jetée, Technopôle de Château Gombert, 38 rue F. Joliot-Curie, 13451 Marseille, Cedex 20

Résumé - Cet article présente brièvement un ensemble de travaux en cours liés à l'étude de jets plans confinés en impact pour le confinement d'espaces fortement chauffés par rapport à l'ambiance. Quelques résultats récents sont donnés.

Nomenclature

$2e$ largeur des buses de soufflage, m

H Hauteur des jets, m

U_0 Vitesse moyenne de soufflage, ms^{-1}

x Distance en aval des buses, m

Symboles grecs

ν Viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$

1. Introduction

Le travail dont nous présentons ici quelques développements récents s'intéresse au confinement d'atmosphères en écart significatif de masse volumique par rapport à l'ambiance. Le confinement est opéré par soufflage de jets d'air plans à travers la ou les sections de communication entre l'espace à confiner et son extérieur (l'ambiance). Il est attendu que le ou les jets mis en œuvre se comportent comme une barrière (gazeuse donc) s'opposant aux transferts de chaleur et/ou de masse entre les espaces ainsi séparés.

Des travaux en cours s'intéressent plus particulièrement à la possibilité de ralentir la propagation de la chaleur, des fumées et des gaz toxiques dégagés lors d'un incendie en les confinant à l'aide de barrières gazeuses. Les situations considérées dans ces travaux sont des situations rendant difficile la mise en œuvre de montages basés sur le concept de *drain aéraulique* où le jet soufflé a pour rôle d'extraire le "contaminant" de la zone confinée (chaleur, gaz) par entrainement fluide contrôlé vers une trappe d'évacuation (généralement située en regard de la buse de soufflage). Les jets plans considérés dans nos travaux sont donc en impact ce qui ajoute à la complexité du problème.

Le problème est abordé de manière intégrale et locale pour, respectivement, comprendre le comportement global de ce genre de dispositifs et parvenir à des règles pratiques de dimensionnement, et identifier les mécanismes dominants de transfert *au travers* des rideaux étudiés afin d'en optimiser les performances.

2. Projets expérimentaux

Les outils d'étude mis en œuvre sont numériques et expérimentaux, ces deux approches étant régulièrement confrontées. Les données expérimentales dont il est fait état à la section 3 sont issues de mesures réalisées sur un banc d'essai de l'Université du Chili, à Santiago [1]. Ce banc d'essai est, sur son principe (figure 1), une copie à l'échelle $\frac{1}{2}$ d'un premier banc d'essai

isotherme construit à l'Ecole des Mines de Nantes [2,3] issu lui-même d'une installation du laboratoire MSNMGP à Marseille [3]. Le banc nantais nous a permis d'étudier en détail la cinématique de différents systèmes à rideaux d'air et d'explorer plus en détail la zone d'impact des écoulements en présence. Les structures tourbillonnaires s'y développant ont été caractérisées sans pouvoir analyser leur contribution aux transferts (banc isotherme).

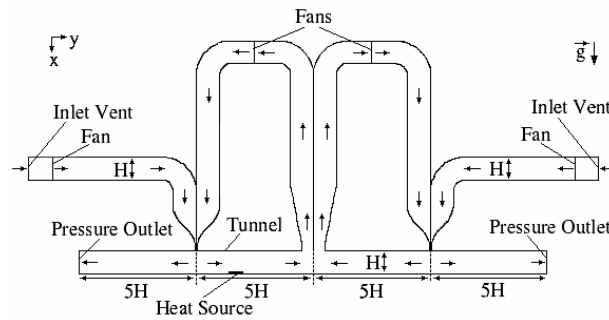


Figure 1 : Réalisation d'une cellule de confinement par soufflage de deux rideaux double flux, avec recirculation

Le banc chilien (figure 2) peut être vu comme une maquette au $1/34^e$ d'un tronçon de tunnel routier. L'installation est équipée de deux unités de soufflage double flux permettant de réaliser une cellule de confinement. Un rideau double flux étant ici composé de deux jets accolés, l'un (dit extérieur) étant alimenté à partir de l'ambiance et l'autre (dit intérieur à la cellule) à partir de la cellule de confinement (recirculation de l'air confiné).

Le rapport de forme $H/2e$ des rideaux est fixe et vaut 10, valeur critique qui nous place volontairement dans une situation conservatrice. La largeur totale des buses de soufflage est de $2 \times 7.5 \text{ mm}$. La largeur du tunnel est de $2H$. Une résistance chauffante de puissance maximale 7.5 kW permet de chauffer l'air de la cellule de confinement.

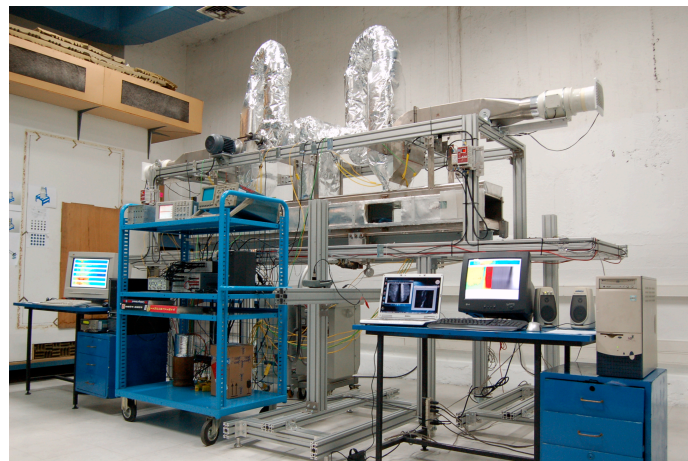


Figure 2 : Photo du banc chilien

La source n'est pas placée symétriquement dans le dispositif mais, comme on peut le voir sur la figure 1, à proximité du rideau gauche (rideau de droite sur la figure 2, près de la fenêtre de visualisation). Pour différentes configurations de soufflage, après atteinte du régime stationnaire (4h en moyenne), la température moyenne de l'air dans l'installation a été mesurée en 2400 points par déplacement d'une rampe de 7 thermocouples fins de type K [1].

La figure 3 donne une idée du champ de température obtenu pour une puissance de chauffe de 3.3 kW , et des Reynolds de buse U_{0e}/ν de 8000 pour les deux jets extérieurs et de 6000 pour les deux jets intérieurs. La figure 3 montre la capacité du système étudié à confiner la chaleur dégagée par la source.

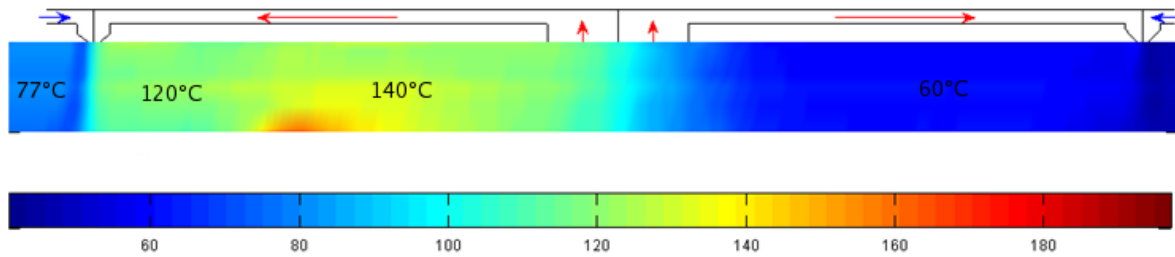


Figure 3 : Champ de température mesuré (source 3.3 kW, $Re_{Jet\ froid}=8000$, $Re_{Jet\ chaud}=8000$)

3. Projets numériques

La simulation numérique de ce type d'écoulements/systèmes revêt une importance importante en matière d'incendie que ce soit pour l'établissement de responsabilités via la recherche de l'origine d'accidents ou, en ingénierie de la sécurité incendie, via la réalisation de scénarios d'incidents pour la prévision des moyens de lutte contre un incendie.

3.1. Simulations RANS

Le principe de l'installation expérimentale ci-dessus a été simulé à l'aide du code Fluent (version 6.2). Le modèle de turbulence utilisé est le modèle RSM. Les effets de flottabilité sont intégralement pris en compte. Les effets du rayonnement le sont également au travers du modèle S2S. L'air est considéré de ce point de vue comme un milieu transparent.

Des simulations 2D et 3D ont été réalisées. Pour les secondes, la largeur du tunnel a été fixée à 0.3 m. La puissance de la source a été fixée à 9.5 kW/m pour le cas 2D et 2.85 kW/m² pour le cas 3D. Les densités de puissance correspondantes permettent de simuler un feu de 19 MW à échelle réelle (similitude de Froude).

Les simulations ont d'abord été validées par comparaison des champs cinématiques moyens et turbulents calculés dans les zones de jet à ceux obtenus expérimentalement à Nantes en situation isotherme [2]. De ce point de vue, il a été conclu que les écoulements étaient, en première approximation, raisonnablement bien simulés jusqu'à mi-distance en aval des buses avant l'impact ($x/2e=5$ environ). Comme la plupart des modèles RANS, le modèle RSM sous-estime l'épanouissement latéral des jets. On retrouve qu'au-delà de $x/2e=5$, les deux jets se comportent globalement comme un seul jet de rapport $H/2e=10$.

Les niveaux de turbulence dans les couches de mélange latérales des rideaux sont surestimés. Les distributions de la vitesse moyenne, de l'énergie cinétique turbulente et des tensions de Reynolds sont beaucoup moins bien simulées dans la zone d'impact. Ces résultats ne sont pas surprenants. L'emploi de modèles à bas nombre de Reynolds serait plus approprié. Nous acceptons toutefois les défauts du modèle RSM à ce stade de nos travaux.

La figure 4 montre, dans 3 plans verticaux, les champs de température obtenus à proximité de la source par simulations 3D. Les simulations semblent indiquer qu'il est possible de maintenir des écarts de l'ordre de 80 à 150 degrés entre l'ambiance et la zone confinée ce qui est assez remarquable.

La zone confinée est, aux vitesses de soufflage considérées, quasiment homogène en température ce qui, en situation d'incendie, en phase d'évacuation, n'est pas forcément la situation recherchée. En dehors de la cellule de confinement, les températures, bien que supérieures à 60 °C, laissent penser que des solutions acceptables peuvent être trouvées pour permettre l'évacuation de personnes. Il pourrait être intéressant d'examiner quelles conditions sont nécessaires pour maintenir une stratification thermique dans la cellule de confinement

ou, si cela n'est pas possible, de réfléchir à quel stade du développement d'un incendie il est finalement plus opportun de déclencher ce genre de dispositif.

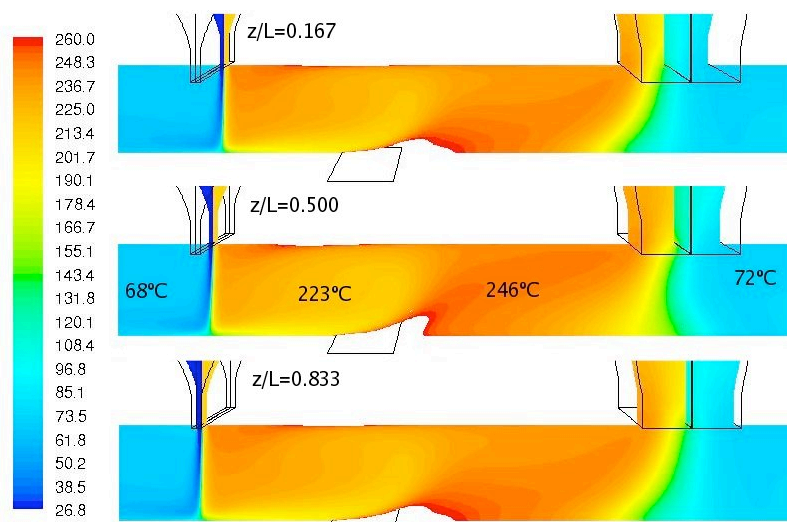


Figure 4 : Champs de température calculés – simulation 3D

La figure 5 permet de comparer les profils transversaux de température moyenne mesurés et calculés dans les rideaux droite et gauche de l'installation en 6 stations en aval des buses de soufflage. Les températures sont adimensionnalisées par la température moyenne T_0 en sortie de buse du jet chaud côté source (dans les expériences, T_0 a été mesurée à 367 K).

Les grandes tendances observées expérimentalement sont reproduites numériquement. La température à l'extérieur de la zone de confinement est toutefois plus importante expérimentalement que numériquement. Il est probable que ceci soit dû au fait que, au laboratoire, la température ambiante augmente au cours du temps, pendant la durée des expériences : un rideau d'air en impact ne peut pas être parfaitement étanche. Même si le banc d'essai a été soigneusement isolé, les pertes thermiques au travers des parois du banc d'essai contribuent également au réchauffement de l'air ambiant. Dans les simulations, la température de l'air ambiant est, aux conditions aux limites, imposée et astreinte à demeurer constante.

Figure 5, les larges gradients de température au voisinage de $y/e=0$ correspondent évidemment à la zone de jet. La source étant située à quelques dizaines de centimètres du rideau gauche, on retrouve des températures plus élevées à proximité de ce rideau.

La température s'homogénéise au sein du jet à l'approche de la zone d'impact. Ceci confirme l'entraînement de chaleur par les couches de mélange latérales se développant sur le bord des rideaux, puis un mélange au fur et à mesure du développement du jet. La chaleur est finalement transférée de la zone confinée vers l'ambiance (et vice-versa) au niveau du pied du jet, dans la zone d'impact. Ce résultat nous rappelle la nécessité d'un examen plus approfondi de la structure de l'écoulement dans cette région de l'écoulement et du rôle des structures tourbillonnaires qui y apparaissent et s'y développent. Un banc d'essais en eau spécifiquement dédié à ce sujet est en cours de construction.

Les cas 2D et 3D présentent entre eux de gros écarts, à proximité de la source, dans la zone initiale de jet, et du côté de l'ambiance. Différentes raisons permettent d'expliquer ces écarts : une plus grande "concentration" des effets convectifs dans le cas 2D et une plus grande surface chauffée (parois) par rayonnement dans le cas 3D, parois qui contribuent à leur tour à un réchauffement de l'air dans l'espace confiné. Les simulations 3D semblent ainsi conduire, pour des conditions aux limites et des options de calcul identiques, à une plus grande efficacité de confinement que les simulations 2D. Ce résultat, qui doit être considéré avec

beaucoup de précautions, nous rappelle à la prudence : le choix de simulations 2D (rapides et plus simples) ou 3D n'est pas anodin.

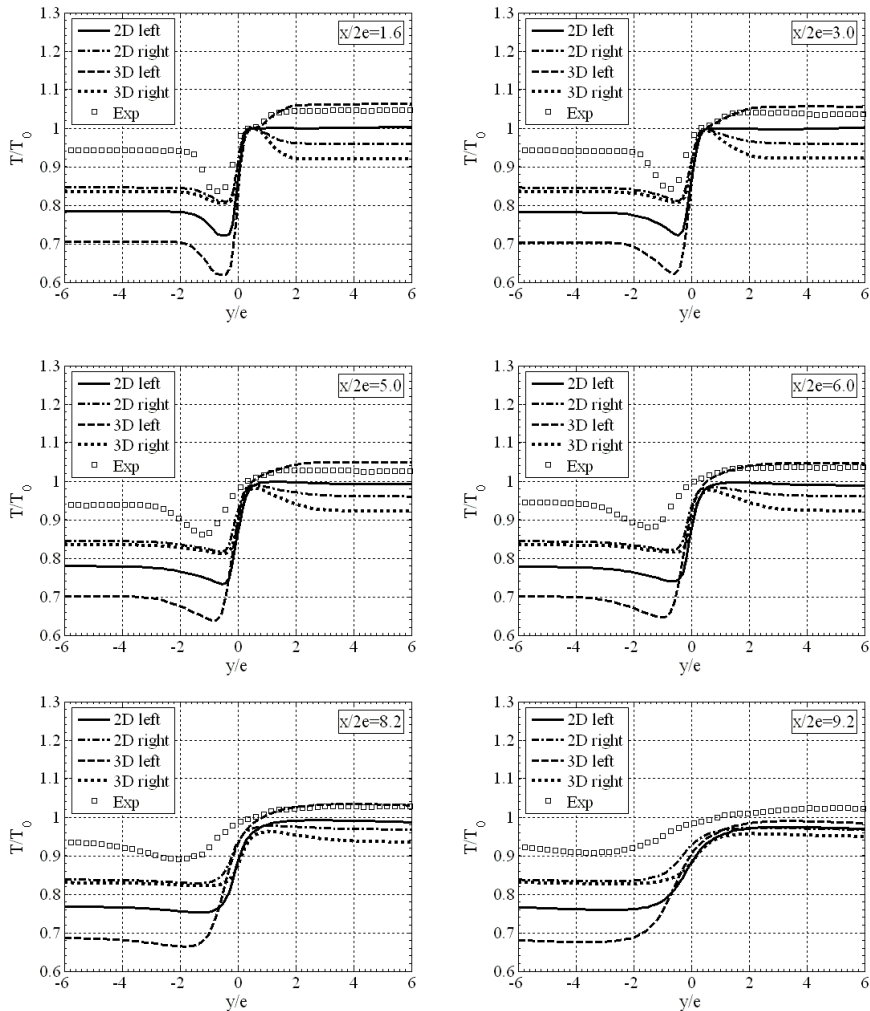


Figure 5 : profils de température

L'allure générale des profils longitudinaux des flux turbulents dans le plan de symétrie d'un rideau double flux est donnée figure 6. Il est intéressant de noter que les pics de la figure 6 apparaissent à la frontière supérieure de la zone d'impact pour le flux turbulent radial et à la frontière supérieure de la zone de paroi où sont concentrées les structures tourbillonnaires de la zone d'impact [4].

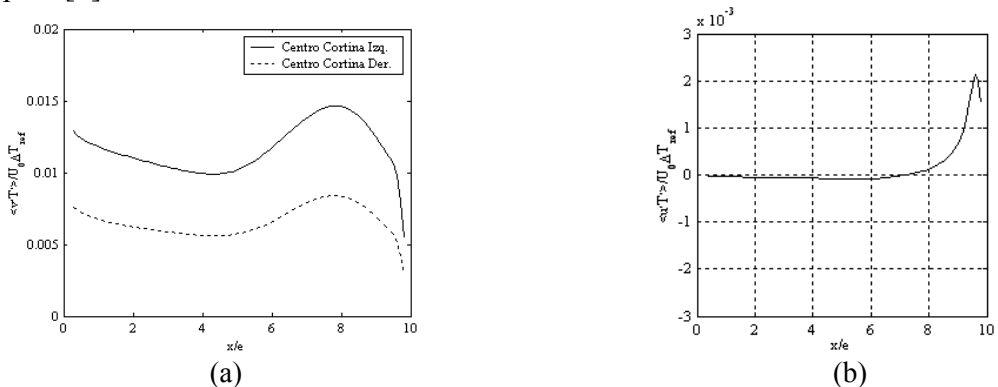


Figure 6 : Profils longitudinaux du flux turbulent radial $\overline{v'T'}/U_0\Delta T_{ref}$ (à gauche) et axial $\overline{u'T'}/U_0\Delta T_{ref}$ (droite) sur l'axe d'un rideau double flux.

3.2. Simulations LES

Récemment, des simulations LES ont été lancées à partir du code FDS-5 (Fire Dynamics Simulator, v.5, modèle de sous maille de type Smagorinsky à constante fixe), code "open source" de plus en plus utilisé par les professionnels. Les simulations réalisées ont confirmé la capacité du code à simuler correctement l'écoulement de jets en impact. Différents dispositifs à base de rideaux d'air ont été testés. L'impossibilité d'utiliser des systèmes de type push-pull pour les applications visées, nous conduit à préférer des systèmes formés d'un rideau et d'un exutoire faisant office de système local de ventilation positive (figure 7). Une campagne de validation expérimentale, sur un nouveau banc en construction, est en préparation.

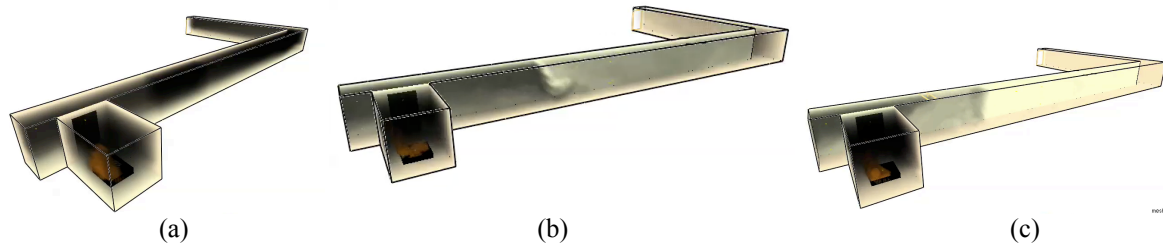


Figure 7 : Confinement de fumée et de chaleur par rideau d'air – simulations LES
(a) aucun dispositif, (b) un rideau seul, (c) un rideau + un exutoire (entre le foyer et le rideau)

4. Conclusion et perspectives

Un certain nombre de travaux sur le confinement d'atmosphères fortement chauffées sont en cours. Quelques éléments viennent d'être présentés. Nous réfléchissons aujourd'hui au meilleur usage des dispositifs à rideau d'air, notamment en termes de moyens de ventilation positive localisé et contrôlé en cas d'incendie. Les mécanismes d'échange doivent être mieux maîtrisés pour contrôler les apports d'air frais. Des mesures, par couplage entre Velocimétrie par Imagerie de Particules résolue en temps et Polarographie, seront bientôt réalisées dans la zone d'impact de jets plans frappant une plaque plane. Ces travaux devraient être également utiles pour la maîtrise de procédés exploitant les jets en impact à des fins de refroidissement, séchage, étalement/dépôt de films, etc. Enfin, il est temps d'aller explorer les limites de validité de la corrélation de Hayes [5] établie pour le confinement d'atmosphères faiblement chauffées

Références

- [1] J.C. Celis Gonzalez, Estudio del confinamiento de un escalero activo entre dos cortinas de aire en impacto, mediante mediciones de temperaturas por termocoplas, *Mechanical Engineering MSc Thesis*, Universidad de Chile, FCFM, Santiago, Chile, (2008).
- [2] S. Gupta, Etude expérimentale du comportement dynamique et des performances de rideaux d'air en vue de la conception de systèmes de confinement cellulaire, *Mémoire de doctorat*, N° ED 0367-174, Université de Nantes, (2005).
- [3] F.X. Blanchet, C. Cassin, Y. Gouriou, S. Gupta, P. Maubert, M. Pavageau, C. Rey, C. Sollicc, Contrôle d'ambiance par rideaux d'air, *Technologie en Mécanique, Cahier Tech. 1*, 011-016 (2005).
- [4] M. Pavageau, K. Loubière, S. Gupta, Automatic eduction and statistical analysis of coherent structures in the wall region of a confined plane turbulent impinging jet, *Experiments in Fluids* 41(2006) 35 – 55.
- [5] F.C. Hayes, Heat transfer characteristics of the air curtain: A plane jet subjected to transverse pressure and temperature gradient, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, IL, (1968).