

Propagation de fumées en façade avec contamination d'un local supérieur.

Propagation of smoke on the facade with contamination of an upper room.

Lilian SERRE^{1,*}, Alain BASTIDE¹, Olivier VAUQUELIN², Karim Khan JUHOOR^{1,3},
Kévin VARRALL²

¹Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématiques pour l'Energie, l'environnement et le bâtiment, Université de La Réunion, 40 Avenue De Soweto, 97410, La Réunion

²Laboratoire Institut Universitaire des Systèmes Thermiques et Industriels, Aix-Marseille Université, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille cedex 13

³Efuzif, 97 Rue du Général Lambert, Saint-Leu, La Réunion

*(auteur correspondant : lilian.serre@univ-reunion.fr)

Résumé - L'objectif de cette communication est de présenter une analyse de résultats issus de simulations numériques sur un bâtiment constitué de deux pièces ouvertes sur l'extérieur, l'une sur l'autre. Un scalaire passif issu d'un local source en partie basse, à température et vitesse d'injection fixées, se propage en façade et contamine un local qui lui est superposé. Pour une température d'injection fixée, le taux de contamination décroît systématiquement avec l'augmentation de la vitesse d'injection. A contrario, l'augmentation de la température n'engendre que des variations peu significatives du taux de contamination pour de faibles vitesses d'injection, mais a un impact important pour les vitesses d'injection élevées.

Mots-clés : Ventilation naturelle ; Sécurité incendie ; Fumée ; Propagation ; Contamination.

Abstract - The objective of this paper is to present an analysis of results from numerical simulations on a building consisting of two rooms open to the outside, one on the other. A passive scalar coming from a source room in the lower part of the building, at a fixed temperature and injection rate, propagates on the facade and contaminates a room superimposed on it. For a fixed injection temperature, the contamination rate systematically decreases with the increase of the injection speed. On the other hand, the increase in temperature causes only insignificant variations in the contamination rate for low injection speeds, but has a significant impact for high injection speeds.

Keywords: Natural ventilation; Fire safety; Smoke; Propagation; Contamination.

Nomenclature

A	Section, m^2	<i>Symboles grecs</i>	
cp	Capacité thermique massique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	ρ	Masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
dt	Pas de temps, s	γ	Rapport d'énergie thermique
E	Energie, J	Δ	Différence
\dot{Q}	Puissance, kW	<i>Indices et exposants</i>	
S	Surface de l'ouvrant, m^2	c	Convective
T	Température, K	i	Valeur à l'injection
U	Vitesse, $m \cdot s^{-1}$	0	Valeur liée au milieu ambiant
z	Altitude, m	1	Valeur au niveau dans le local supérieur

1. Introduction

En climat tropical, les constructions dites bioclimatiques sont en plein essor. L'importante porosité aéraulique de leurs façades permet de rafraîchir et d'assainir l'ambiance de ces bâtiments par ventilation naturelle [2, 4].

De nombreuses études traitent de l'aéraulique interne d'une cellule isolée contenant une source de chaleur (citons par exemple [1, 5, 6]). L'écoulement interne dépend de la puissance de la source et de la géométrie du local, notamment de la position des ouvrants. L'ambiance interne peut alors être stratifiée, ainsi adaptée aux stratégies de désenfumage naturel. Le volume est alors scindé verticalement en une couche de haute température en partie haute et une couche de faible température en partie basse. Celle-ci peut être mélangée (température uniforme dans le volume) et en conflit avec les stratégies de désenfumage naturel (voir [12]). Les fumées qui s'échappent de ce local représentent alors une source potentielle de pollution des locaux supérieurs.

Pour des constructions dites conventionnelles (parois étanches, bâti actuel des zones froides et tempérées), le sinistre se propage principalement par la dégradation et combustion des éléments de menuiserie, comme les fenêtres, et/ou de façade (voir [11]). Aux temps courts, les fumées n'entrent dans les locaux supérieurs que si une fenêtre est ouverte, et aux temps longs lorsque celle-ci a perdu son intégrité. Dans le bâti bioclimatique cette différence de temps caractéristiques (quelques secondes pour la propagation de fumées contre quelques minutes pour la dégradation des menuiseries) prend une autre dimension, et l'accent doit être mis sur la compréhension des écoulements de fumées en façade dès les premiers instants de l'incendie.

En étudiant la propagation de fumées issues d'un local en feu situé au rez-de-chaussée d'un atrium, dit local source, Harrison et al. [7] expriment la hauteur de rattachement du panache à la paroi verticale. Cette hauteur est fonction de l'épaisseur de la couche de fumées à travers l'ouvrant du local source et de la largeur de cet ouvrant. Pour une configuration similaire, Tilley et al. [8] expriment la capacité du panache déversant à adhérer ou non à la paroi en fonction du rapport entre la quantité de mouvement et la flottabilité de ce panache au niveau de l'ouvrant. Lorsque la flottabilité est prépondérante, le panache adhère à la paroi verticale à la sortie du local sinistré. A contrario, il s'en éloigne lorsque la quantité de mouvement domine. Cependant, il est possible que ce panache de fumées puisse recoller à la paroi plus haut.

Sur un immeuble de grande hauteur soumis aux effets du vent, Lo et al. [9], étudient numériquement la contamination et l'élévation de la température à l'étage refuge (étage ouvert de façon traversante permettant aux usagers du bâtiment de s'abriter lors d'un incendie) situé au dessus d'un local en feu. Ils maîtrisent les conditions d'injection des fumées (puissance convective de $\dot{Q}_c = 1.5 \text{ kW}$ et température $T = 180, 315 \text{ et } 450 \text{ °C}$), et observent que pour une vitesse d'injection donnée très faible devant celle du vent, la température du refuge à proximité de l'ouvrant augmente avec l'augmentation de la température à l'injection alors que la concentration de fumées diminue.

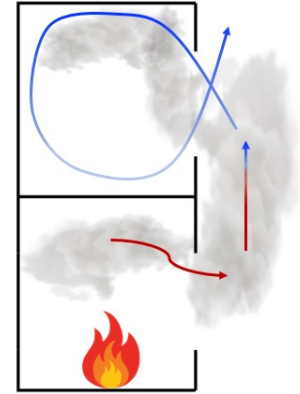


Figure 1 : Configuration étudiée. Incendie se déclarant dans le local du niveau le plus bas, local « source » et les fumées de cet incendie se propagent au niveau supérieur via l'extérieur, par la façade.

Le présent travail a pour objectif de comprendre dans quelles mesures le panache de fumée issu d'une injection maîtrisée peut, par propagation en façade, contaminer un local qui lui est superposé en l'absence de vent.

Dans la partie §2, nous présentons la configuration modélisée avec un logiciel de Mécanique des Fluides Numériques (MFN). Dans la section §3, nous exposons les résultats extraits de ces simulations nous donnant une première idée des phénomènes de contamination du local supérieur par les fumées. La section §4, est consacrée au rappel des principales conclusions de notre étude ainsi qu'à la mise en avant de certaines perspectives.

2. Configuration étudiée

La configuration étudiée ici est celle présentée sur les figures 2 et 3. En partie basse, une ouverture semi-infinie de $4\text{ m} \times 1\text{ m}$ constitue la source d'injection. À l'instar de Lo et al. [9], les conditions de température et vitesse sont maîtrisées ($T_i = 80, 100, 200$ et 300 °C et $U_i = 0.5, 1, 1.5$ et 2 m s^{-1}). Située 3.2 m plus haut, une ouverture de même taille constitue l'unique ouvrant d'un local de 51.2 m^3 de volume ($4\text{ m} \times 4\text{ m}$ au sol et 3.2 m de hauteur). Il n'y a pas de vent et toutes les parois du bâtiments sont supposées adiabatiques.

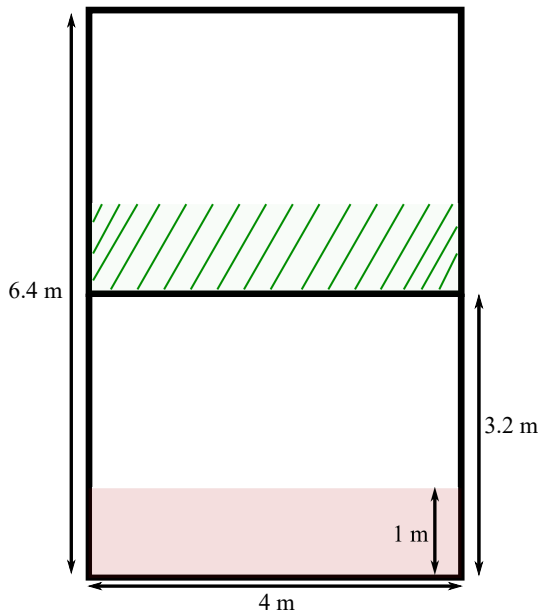


Figure 2 : Vue de face de la configuration géométrique avec en rouge l'injection de fluide à température T_i et vitesse U_i fixées, et en vert l'ouvrant du local supérieur.

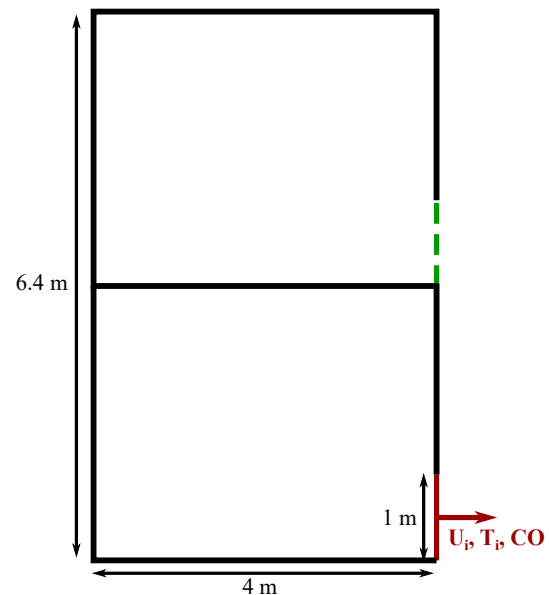


Figure 3 : Vue de profil de la configuration géométrique avec en rouge l'injection de fluide à température T_i et vitesse U_i fixées, et en vert l'ouvrant du local supérieur.

Les simulations numériques sont réalisées avec le code de MFN Fire Dynamics Simulator (FDS). FDS est un code de champs développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST) qui résout les équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) à faible nombre de Mach, principalement dans un contexte de modélisation de dynamique d'incendie. Une attention particulière est portée au transport de la chaleur et des fumées. La méthode des différences finies est utilisée dans un domaine discrétisé par un maillage structuré. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle des grandes échelles de turbulence Large Eddy Simulation (LES).

Dans l'étude, le domaine est composé de deux maillages de $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3.2\text{ m}$ et $8\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3.2\text{ m}$ de mailles de taille uniforme de 10 cm de côté. Les conditions aux limites du domaine de calcul s'appuient sur les conditions libres fixées par le logiciel FDS. Ceci avec les quantités physiques suivantes : température ambiante $T_0 = 20\text{ °C}$ et pression atmosphérique $P_0 = 101\,325\text{ Pa}$. Deux tailles de mailles ont été testées dans cette étude, 10 cm et 20 cm.

Afin de pouvoir quantifier l'impact des conditions d'injection sur la contamination du local, on propose de mesurer le pourcentage de l'énergie injectée qui est récupérée dans le local à température et vitesse d'injection données. À l'injection, la puissance convective est

$$\dot{Q}_c = \frac{dE_i}{dt} = \dot{m} c_p \Delta T_i, \quad (1)$$

où $\dot{m} = \rho_i U_i A_i$ est le débit massique de gaz, avec ρ_i la masse volumique et A_i la surface d'injection, c_p la chaleur spécifique du gaz et $\Delta T_i = T_i - T_0$ l'écart de entre la température à l'injection et celle de l'ambiance. Ce qui, en considérant des gaz parfaits à pression constante ($\rho T = cte = \rho_0 T_0$ où l'indice 0 fait référence aux conditions ambiantes) et une chaleur spécifique constante, permet d'exprimer l'énergie sous la forme

$$E_i = \rho_0 u_i A_i T_0 c_p \frac{\Delta T_i}{T_i} \Delta t, \quad (2)$$

où Δt est le pas de temps de la simulation.

Dans le local, de volume v , en utilisant à nouveau l'hypothèse de gaz parfait à pression constante et c_p constante, le calcul de l'énergie est donné par,

$$E = \int_v \rho(x, y, z) c_p \Delta T(x, y, z) dv = c_p \rho_0 T_0 \int_v \frac{\Delta T(x, y, z)}{T(x, y, z)} dv. \quad (3)$$

Afin de récupérer le signal de température $T(x, y, z)$ dans le local, nous avons positionné des capteurs dans chaque angle de la pièce. Les capteurs sont espacés de 10 cm depuis le sol jusqu'au plafond. On observe que pour une hauteur donnée, la température varie peu selon l'horizontale. On considérera que $T(z)$ est la moyenne algébrique des températures relevées sur ces quatre points. Par conséquent, l'équation 3 devient

$$E = S c_p \rho_0 T_0 \int \frac{\Delta T(z)}{T(z)} dz. \quad (4)$$

S est la surface au sol du compartiment.

Par la suite, on notera γ le rapport entre l'énergie dans le local et l'énergie à l'injection

$$\gamma = \frac{E}{E_i}. \quad (5)$$

3. Résultats

Les résultats présentés dans cette section permettent de discuter de l'impact que peuvent avoir la vitesse et la température des fumées injectées sur la contamination du local. Dans un premier temps, la température d'injection est fixée et seule la vitesse d'injection varie entre les simulations. Dans un second temps, la vitesse d'injection est fixée et la température varie. Les champs de température et de vecteurs vitesse en régime établi (moyennés sur les 100

dernières secondes de simulation du aux phénomènes périodiques rencontrés à l'ouvrant) sont présentés. Le régime est considéré établi à partir du moment où le rapport d'énergie thermique γ est quasi-constant par rapport au temps. Ce régime permanent est obtenu à partir de calculs instationnaires. Ces champs issus d'une coupe 2D au milieu du domaine (figure 4 et 6) donnent l'allure du panache en façade et l'écoulement du fluide dans le local supérieur. Ensuite, le suivi de l'évolution de γ au cours du temps permet de quantifier la récupération d'énergie par le compartiment supérieur et de voir l'influence des conditions à l'injection.

3.1. Température d'injection T_i constante

L'analyse des champs vecteurs de vitesse superposés aux champs de température à l'état stationnaire (figure 4) donne de premières informations sur le comportement du panache en façade et la contamination du local supérieur. Pour une température d'injection constante et fixée à 100°C , la variation de la vitesse d'injection de 0.5 m s^{-1} à 2 m s^{-1} entraîne le décollement du panache. Celui-ci adhère immédiatement à la paroi pour des vitesses d'injection faibles (0.5 m s^{-1} et 1 m s^{-1}). Pour $U_i = 1.5\text{ m s}^{-1}$, le panache recolle à la paroi environ à la hauteur de l'ouvrant du compartiment supérieur. Puis pour $U_i = 2\text{ m s}^{-1}$, il n'adhère pas à la paroi, ce qui donne une récupération d'énergie minimale (en haut à droite sur la figure 5).

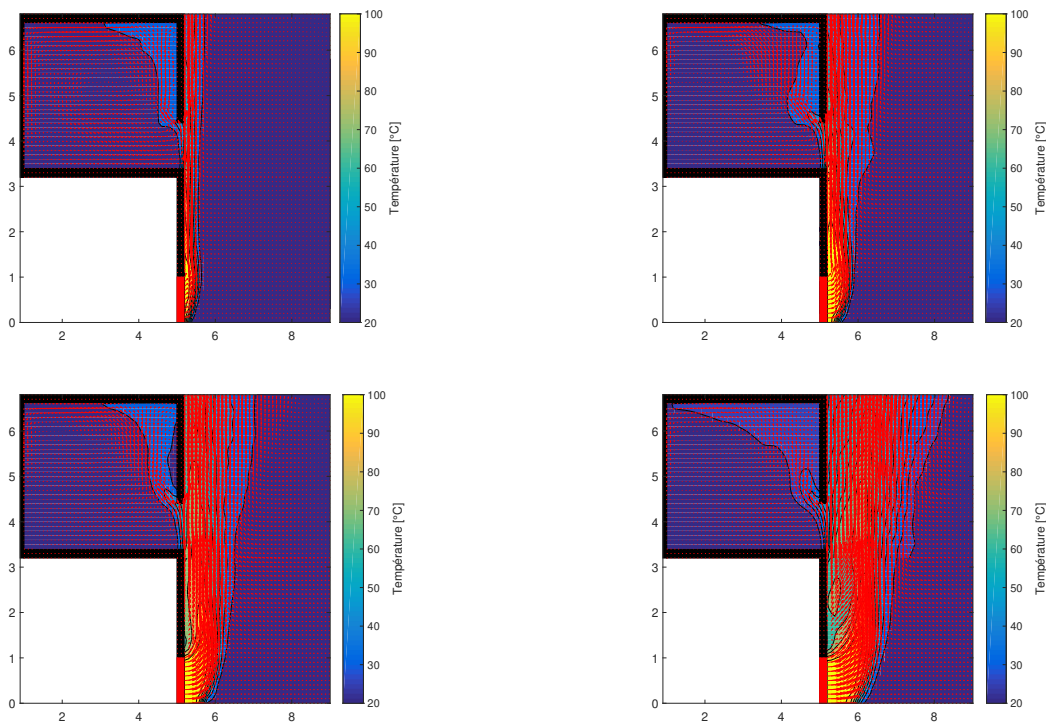


Figure 4 : Champs de température avec vecteurs vitesse, moyennés sur les 100 dernières secondes de simulation, pris au milieu de l'ouvrant et du bandeau d'injection pour une température d'injection de 100°C . $U_i = 0.5\text{ m/s}$ en haut à gauche, $U_i = 1\text{ m/s}$ en haut à droite, $U_i = 1.5\text{ m/s}$ en bas à gauche et $U_i = 2\text{ m/s}$ en bas à droite.

Sur ces différents champs figure 4, le panache de fluide entre en partie haute de l'ouvrant et le fluide monte le long de la paroi intérieure. L'écoulement induit par l'entrée du scalaire passif entraîne une recirculation dans le local. L'air frais s'extrait du local par la partie basse de

l'ouverture. En observant l'écoulement à chaque instant, le fluide chaud entre périodiquement et l'air dans la pièce s'extrait de la même manière. Ce régime d'écoulement intervient car le compartiment possède qu'un seul ouvrant et la conservation de la masse doit être respectée. Par exemple, pour $U_i = 1 \text{ m s}^{-1}$ et $T_i = 100 \text{ °C}$, une fréquence de l'ordre de 1 Hz apparaît.

Parallèlement à l'analyse des champs de températures en régime établi, les courbes de la figure 5 montrent que l'état stationnaire est atteint après 150 s voire 200 s. Quelque soit la température d'injection, la récupération d'énergie maximale est obtenue pour une vitesse de 0.5 m s^{-1} . Lorsque U_i augmente, le pourcentage d'énergie récupérée décroît. Comme le montre aussi les champs de la figure 4, la vitesse d'injection joue un rôle important dans la contamination du local supérieur. Lorsqu'elle augmente, le panache s'éloigne de la paroi et le scalaire passif pénètre de moins en moins dans le compartiment. L'aérodynamisme extérieur joue alors un rôle important dans la contamination du local supérieur.

L'effet de la variation de la température à une vitesse d'injection fixée est exposé par la suite.

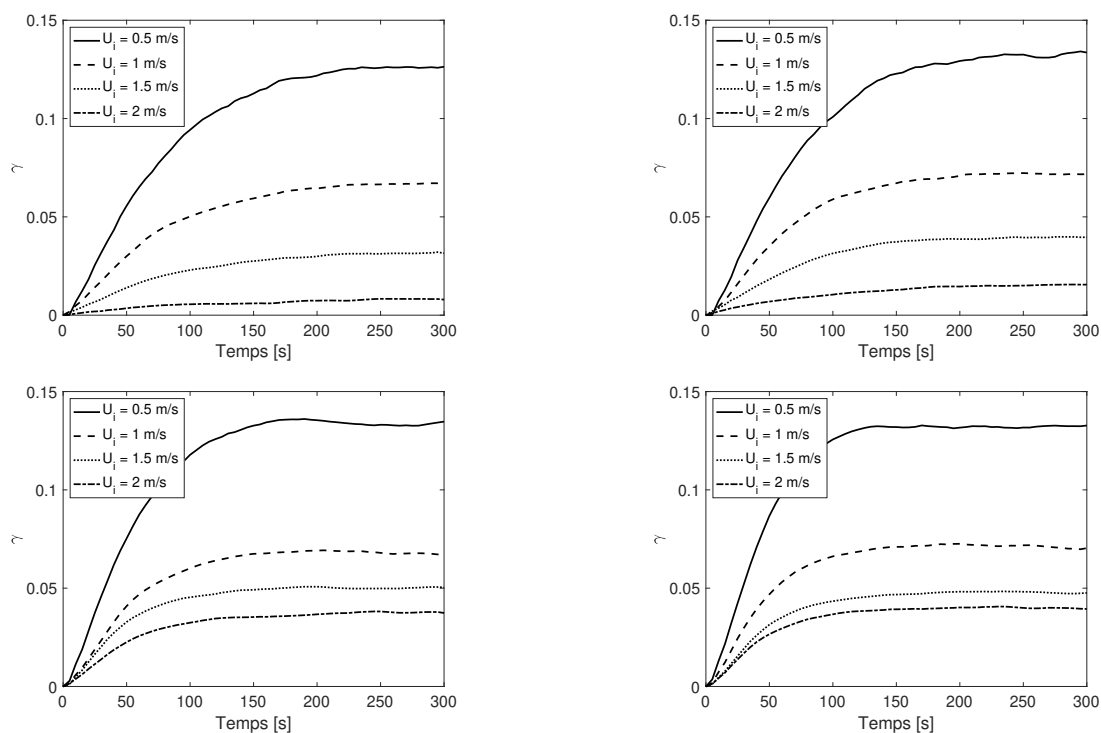


Figure 5 : Rapport d'énergie thermique γ pour une température d'injection de 80 °C (en haut à gauche), 100 °C (en haut à droite), 200 °C (en bas à gauche) et 300 °C (en bas à droite). Les courbes en trait plein représentent $U_i = 0.5 \text{ m s}^{-1}$ m/s, en traitillés $U_i = 1 \text{ m s}^{-1}$, en pointillés $U_i = 1.5 \text{ m s}^{-1}$ m/s et celles en alternance de traits et de points $U_i = 2 \text{ m s}^{-1}$ m/s.

3.2. Vitesse d'injection U_i constante

Cette fois-ci, nous observons la dynamique transitoire de la récupération de l'énergie dans le cas où la vitesse d'injection au niveau du local source est fixée. Les champs de température et de vecteurs de vitesse de la figure 6 montrent que pour une vitesse d'injection fixée à 1.5 m s^{-1} , l'augmentation de la température d'injection entraîne le recollement du panache à la paroi de plus en plus proche du bandeau d'injection. Le fluide s'écoule ensuite le long de la paroi verticale pour les plus grandes températures simulées (200 °C et 300 °C) et le fluide entre dans le

compartiment avec une température plus importante (couleur bleue plus marquée sur les champs de température). Identiquement à l'analyse des champs précédents, le fluide entrant dans le local entraîne une recirculation d'air au sein de la pièce, et le phénomène périodique apparaît à nouveau.

Pour les faibles vitesses, aucun écart significatif de récupération d'énergie apparaît (voir figure 7). A noter tout de même que le temps d'arrivée à l'état stationnaire diminue lorsque la température augmente. Lors de l'état transitoire, la pente est plus importante pour $T_i = 300\text{ °C}$ puis diminue lorsque la température d'injection diminue. Il n'y a qu'à partir d'une vitesse d'injection de 1.5 m s^{-1} que des écarts de contamination entre les vitesses apparaissent.

Pour les faibles températures, 80 °C et 100 °C , le panache commence à se décoller de la paroi pour $U_i = 1.5\text{ m s}^{-1}$ (voir figure 6) puis il continue de s'éloigner pour $U_i = 2\text{ m s}^{-1}$, la contamination est alors quasiment nulle. Cependant, pour des températures plus élevées, les forces de flottabilité contrent légèrement les effets induits par de grandes vitesses d'injection et le panache de fluide entre dans le local.

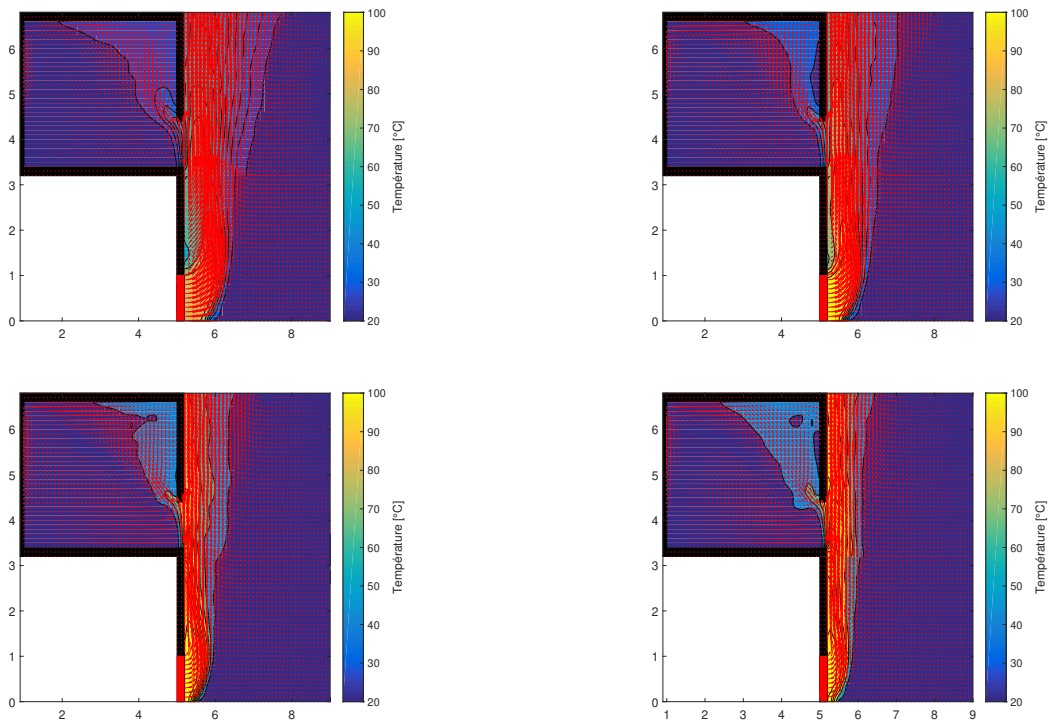


Figure 6 : Champs de température avec les vecteurs vitesse, moyennés sur les 100 dernières secondes de simulation, pris au milieu de l'ouvrant et du bandeau d'injection pour une vitesse d'injection de 1.5 m s^{-1} . $T_i = 80\text{ °C}$ en haut à gauche, $T_i = 100\text{ °C}$ en haut à droite, $T_i = 200\text{ °C}$ en bas à gauche et $T_i = 300\text{ °C}$ en bas à droite.

A travers cette étude plusieurs voies d'investigations sont envisageables, elles sont présentées dans la conclusion §4.

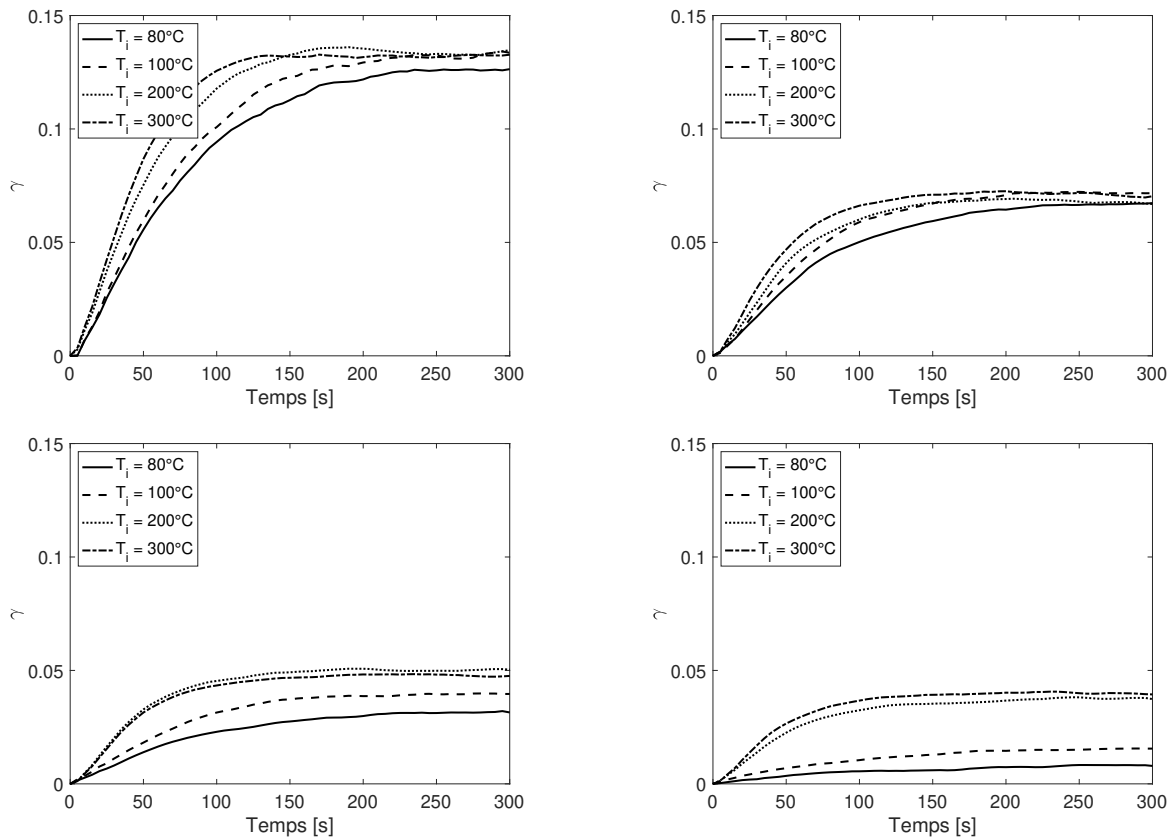


Figure 7 : Rapport d'énergie thermique pour une vitesse d'injection de 0.5 m/s (en haut à gauche), 1 m/s (en haut à droite), 1.5 m/s (en bas à gauche) et 2 m/s (en bas à droite). Les courbes en trait plein représentent $T_i = 80^\circ\text{C}$, en traitillés $T_i = 100^\circ\text{C}$, en pointillés $T_i = 200^\circ\text{C}$, et celles en alternance de traits et de points $T_i = 300^\circ\text{C}$.

4. Conclusion

Ces premières expériences numériques avec FDS nous donnent des premiers éléments de réponses sur la propagation des fumées d'un incendie issues d'un local source vers un local qui lui est superposé. La vitesse d'injection et donc l'aérodynamisme extérieur joue un rôle majeur dans la propagation des fumées vers l'étage supérieur, alors que la température d'injection n'a elle que peu d'impact sur la récupération d'énergie dans le compartiment supérieur.

Le but est de poursuivre ces simulations et de mettre en place des lois de comportement sur la contamination du local supérieur. Le phénomène de battement repéré est également à explorer et à quantifier par la suite. Puis, l'objectif est de tendre vers des configurations de bâtiments plus réalistes de ceux ventilés naturellement en milieu tropical. Différentes données d'entrée seront alors prises en compte, telles que le vent, les façades double peau poreuses, ou encore les balcons [10] ou coursives. Leur impact sur la contamination du local supérieur pourra alors être discuté. De plus, une partie expérimentale viendra enrichir l'étude. Nous avons à disposition un tunnel à vent nous permettant de réaliser des expériences à échelle réduite isotherme. Durant ces essais, les fumées d'incendie seront modélisées par l'injection d'un fluide léger (mélange air-hélium).

Références

- [1] Linden, P. F., Lane-Serff, G. F., & Smeed, D. A. (1990). Emptying filling boxes : the fluid mechanics of natural ventilation. *Journal of Fluid Mechanics*, 212, 309-335.
- [2] Linden, P. F. (1999). The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual review of fluid mechanics*, 31(1), 201-238.
- [3] Paranthoën, P., & Gonzalez, M. (2010). Mixed convection in a ventilated enclosure. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31(2), 172-178.
- [4] Gratia, E., Bruyere, I., & De Herde, A. (2004). How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. *Building and environment*, 39(10), 1157-1170.
- [5] Gladstone, C., & Woods, A. W. (2001). On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor. *Journal of fluid mechanics*, 441, 293.
- [6] Woods, A. W., Caulfield, C. P., & Phillips, J. C. (2003). Blocked natural ventilation : the effect of a source mass flux. *Journal of Fluid Mechanics*, 495, 119.
- [7] Harrison, R., & Spearpoint, M. (2010). Physical scale modelling of adhered spill plume entrainment. *Fire Safety Journal*, 45(3), 149-158.
- [8] Tilley, N., & Merci, B. (2009). Application of FDS to adhered spill plumes in atria. *Fire technology*, 45(2), 179-188.
- [9] Lo, S. M., Yuen, K. K., Lu, W. Z., & Chen, D. H. (2002). A CFD study of buoyancy effects on smoke spread in a refuge floor of a high-rise building. *Journal of Fire Sciences*, 20(6), 439-463.
- [10] Satoh, K. O. H. Y. U., & Kuwahara, K. U. N. I. O. (1991). A numerical study of window-to-window propagation in high-rise building fires. *Fire Safety Science*, 3, 355-364.
- [11] Xu, T., He, Q., Tang, F., Lei, P., & Pang, H. (2020). Experimental study on the vertical temperature distribution of window ejected fire from an enclosure with adjacent side walls. *Fire and Materials*, 44(1), 152-162.
- [12] Karim, K. J. (2018). Étude et modélisation d'écoulements en convection mixte : application au désenfumage naturel de bâtiments (Doctoral dissertation).