
Soumis le : 15 Mars 2015

Forme révisée acceptée le : 14 Mai 2015

Email de l'auteur correspondant

a.benarous@univ-chlef.dz

Nature & Technologie

Un progiciel pour l'analyse de la couche de fumées lors d'un incendie de compartiment

Agred Souhila^{a,b}, Benarous Abdallah^{a,b*}, Loukarfi Larbi^{a,b}, Naji Hassane^c

^a Département de Mécanique, Faculté de Technologie, UHB Chlef, Algérie, * a.benarous@univ-chlef.dz

^b Laboratoire LCEMSM, Hay Essalem, Chlef, Algérie

^c Laboratoire de Génie civil et de Géo-Environnement (LGCgE), Lille, France

Abstract

This work is devoted to manual and correlative aspects of thermal calculation in fire safety engineering. Thermodynamic and empirical models are used to predict the axial evolution of the mean temperature within the thermal plume, the average thickness of the smoke layer as well as the mass flow rate of smoke flow. The obtained values are discussed and compared with regulation predictions. The influence of the discrepancies the differences on the characteristic dimensions of the smoke and heat evacuation systems (SHEVS) is also presented.

Keywords: Fire safety; dimensioning; SHEVS; plume; Correlations.

Résumé

Le présent travail traite les deux aspects, manuel et corrélatif du calcul thermique dans la sécurité incendie. Des modèles thermodynamiques et empiriques sont utilisés pour prédire l'évolution axiale de la température moyenne dans le panache thermique, l'épaisseur moyenne de la couche stratifiée ainsi que de le débit des fumées. Les valeurs obtenues sont discutées et confrontées aux prédictions des méthodes basées sur les normes. L'influence des écarts sur les dimensions caractéristiques des systèmes d'évacuation de chaleur et de fumée (SHEVS), est aussi présentée.

Mots clés : Sécurité incendie ; Dimensionnement ; SHEVS ; Panache ; Corrélations

1. Introduction

L'ingénierie des incendies est un domaine interface entre la mécanique des fluides réactifs, la thermique et le calcul des structures. Les phénomènes complexes et couplés inhérents aux incendies nécessitent des investigations sur le plan théorique et applicatif et ce, dans le but d'assurer une protection des personnes et des structures. Les stratégies de la sécurité incendie sont spécifiquement imposées lors de la conception des infrastructures industrielles, des établissements recevant du public (ERP) ainsi que les habitations à usages collectifs [1]. Pour des raisons économiques, les stratégies de contrôle actif des incendies se focalisent sur la prédiction des ambiances thermiques et dynamiques des écoulements de fumées. En effet, ces derniers sont stratifiés, ne sont pas localisés (contrairement aux

flammes) et contribuent au transport de la chaleur et des gaz toxiques. En conséquence, le dimensionnement des

systèmes d'évacuation de la chaleur et de la fumée (SHEVS) est indispensable pour d'abord pouvoir prédire la dispersion des fumées et ensuite entamer des manœuvres de désenfumage et ce, dans le but de maximiser le temps de survie des personnes, de dégager des issues visibles pour les interventions et de minimiser les temps d'exposition des structures aux feux [2].

En raison des difficultés liées à la reproductibilité expérimentale des phénomènes d'incendie, les essais à échelles réelles ne servent qu'à développer des relations corrélatives qui sont par la suite, adaptées selon des réglementations de la sécurité incendie, puis instaurées sous forme de normes régionales [3]. Aux stades des conceptions, ce sont les modèles thermodynamiques et corrélatifs relatifs aux structures des fumées, qui permettent de répondre assez rapidement aux demandes

des cahiers de charges. Ces modèles sont souvent complétés par des simulations en mécanique des fluides ou en dynamique des structures permettant de prédire le comportement par rapport à des situations – dites *scénarios* – autres que celles utilisées dans la conception [4].

2. Modélisation thermodynamique de la couche de fumée

Pour ces modélisations, les relations sont établies pour le cas d'un régime stationnaire quant au comportement de la température et des fumées. Ces méthodes ne sont pas très adaptées aux études de résistance aux feux des structures, mais présentent l'avantage de prédire la thermique (température et épaisseur moyennes) de la couche de fumée, et les dimensions caractéristiques des SHEVS [5]. La notion de puissance convective \dot{Q}_c est introduite pour comptabiliser les pertes par rayonnement, moyennant une élévation de température $\Delta T = T_s - T_\infty$, pour la quelle le débit des fumées est donné par [6] :

$$\dot{M}_s = \dot{Q}_c / c \Delta T \quad (1)$$

Une stratification est engendrée par les forces de flottabilité, induisant une couche de fumée dont la hauteur moyenne est donnée par [6] :

$$Y_s = (\dot{M}_s / C_e P_f)^{2/3} \quad (2)$$

c représente la chaleur massique des fumées, P_f est le périmètre du bac de feu et C_e est un paramètre empirique qui est fixé à $C_e = 0,19$ dans la norme Européenne et $C_e = 0,188$ dans la norme Américaine. L'épaisseur moyenne de la couche stratifiée est déduite à partir de la hauteur du plafond, comme [6] :

$$\delta_s = H_{ceiling} - Y_s \quad (3)$$

Si le compartiment est sensé contenir des ouvertures (portes, fenêtres) ayant une surface globale A_i , le débit de fumées à extraire doit correspondre au débit de ventilation naturelle, qui est assuré par un ensemble d'ouvertures dont la surface totale A_{NV}^t est donnée par [6] :

$$A_{NV}^t C_v = \frac{\dot{M}_s T_s}{\sqrt{2 \rho_\infty^2 g \delta_s T_\infty \Delta T - \frac{\dot{M}_s^2 T_s T_\infty}{(A_i C_i)^2}}} ;$$

$$A_{NV}^t C_v = \frac{\dot{M}_s}{\rho_\infty} \sqrt{\frac{T_s^2 + \left(\frac{A_{NV}^t C_v}{A_i C_i} \right)^2 T_\infty T_s}{2 g \delta_s T_s \Delta T}} \quad (4)$$

Dans la première relation relative à la norme Européenne, la surface des orifices de ventilation naturelle est calculée explicitement, alors qu'un calcul numérique est nécessaire dans le cas de la norme Américaine.

3. Modélisation corrélatrice du panache thermique

L'écoulement ascensionnel de la fumées est régi par les forces de flottabilité induites par la différence des masses volumiques entre les gaz chaud et l'air frais. Ce mouvement est freiné par la viscosité de l'air à l'interface et l'air ambiant dilue le panache, réduit la température des gaz chauds et rapproche la masse volumique des deux gaz. Les relations corrélatives ont été développées sur la base de calculs analytiques dont les paramètres ont été ajustés pour reproduire des données expérimentales.

3.1. Le modèle du panache idéal

Le modèle est basé sur plusieurs hypothèses simplificatrices, parmi lesquelles, une forme conique pour le panache ainsi qu'une puissance calorifique à la source sans pertes radiatives. L'élévation de température ainsi que le débit de fumées sont respectivement donnés par [7] :

$$\Delta T = 5.0 \left(\frac{T_\infty}{g C_p \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}^{2/3} . Z^{-5/3} ;$$

$$\dot{M}_s = 0.2 \left(\frac{\rho_\infty^2 g}{C_p T_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} . Z^{5/3} \quad (5)$$

3.2. Le modèle du panache de Heskestad

Dans ce modèle, le panache est encore supposé avoir une forme conique, mais les dimensions du bac sont pris en considération via un point d'origine virtuel (Z_0) situé en dessous de la source réelle. Aussi, la puissance de feu est remplacée par sa valeur convective \dot{Q}_c , induisant une élévation de température et un débit de fumées, exprimés comme [8] :

$$\Delta T = 9.1 \left(\frac{T_{\infty}}{g C_p^2 \rho_{\infty}^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (Z - Z_0)^{-5/3};$$

$$\dot{M}_s = 0,071 \dot{Q}_c^{1/3} (Z - Z_0)^{5/3} + 1,92 * 10^{-3} \dot{Q}_c \quad (6)$$

3.3. Le modèle du panache de Mc Caffrey

Dans le modèle de Mc Caffrey, le panache est supposé constitué axialement de trois zones selon l'existence ou non d'une flamme proprement dite (zone réactionnelle). La zone thermique qui nous intéresse est définie comme la région à partir de laquelle aucune flamme ne persiste [9]. L'élévation de la température s'exprime comme :

$$\Delta T = 9.1 \left(\frac{K}{0.9 \sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{Z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{2\eta-1} T_{\infty} \quad (7)$$

4. Résultats et discussions

Les données relatives à la définition des caractéristiques du feu (puissances, dimensions du bac) de référence, des conditions ambiantes et de la géométrie du compartiment peuvent être renseignées dans l'interface graphique principale (Fig.1)

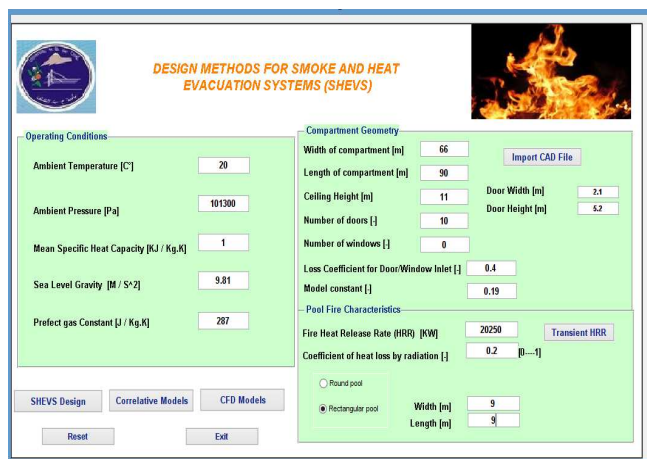


Fig 1. Interface graphique principale

L'utilisateur dispose des options lui permettant dimensionner des SHEVS, d'utiliser des modèles corrélatifs ou bien de passer directement à la mécanique des fluides numérique (CFD). Pour le dimensionnement des SHEVS, il s'agit d'abord de prédire les caractéristiques thermiques de la couche de fumée selon la norme Européenne ou Américaine. Dans ces deux méthodes de calcul, l'élévation de température

$\Delta T = T_s - T_{\infty}$ est, soit fixée *a priori* à une valeur tolérée, soit déduite à partir d'une valeur imposée de l'épaisseur δ_s de la couche de fumée (relations 2,3). Les modèles corrélatifs relatifs au panache thermique, expriment l'élévation de température de la fumée comme des fonctions (1D) inversement proportionnelles à des puissances de la hauteur à partir du plancher (relations 5,6,7) et ce, en considérant les effets de l'entraînement et la dilution par l'air frais.

On examine la configuration d'un compartiment de type supermarché à grandes dimensions (95m×66m×11m), soumis à un feu de bac de catégorie 2 (9m×9m) et de puissance 2 mégawatts.

Dans le cas où on se fixe une valeur standard pour l'élévation de température $\Delta T = 150 \text{ C}^\circ$, les normes Européenne et Américaine retrouvent des valeurs respectives $\delta_s = 4,71 \text{ m}$, $\delta_s = 4,67 \text{ m}$, approximativement proches pour l'épaisseur moyenne de la couche de fumée. En l'occurrence, le modèle du panache idéal affiche une sous estimation relative de 47% contre une surestimation relative dans le modèle de Mc Caffrey, proche de +63% par rapport aux valeurs prédites par les normes (Fig.2). Le modèle de Heskestad prédit une épaisseur moyenne de la couche de fumée, qui s'avère assez proche (-0,85%) de la valeur retrouvée par les deux normes.

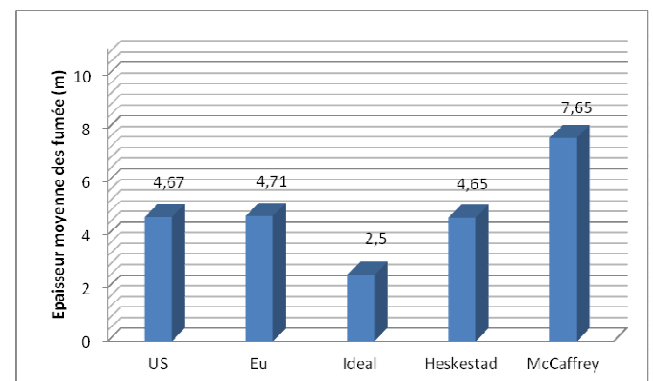


Fig 2. Prédiction des valeurs de l'épaisseur moyenne des fumées.

En raison des dimensions importantes du bac de feu, l'introduction d'une origine virtuelle est importante pour pouvoir localiser spatialement l'épanouissement du panache, ce qui justifie l'adéquation de la prédiction par le modèle de Heskestad.

Dans le cas où l'on suppose disposer de la valeur de l'épaisseur moyenne des fumées via des calculs manuels (normes), on s'intéresse à calculer l'élévation de température telle qu'elle est prédite par les modèles corrélatifs. Il est remarqué que le modèle du panache idéal prédit une valeur aberrante pour l'élévation de température (Fig.3) et ce en raison du non prise en compte de l'évolution axiale de la masse volumique. En effet, ce modèle utilise uniquement la différence $\rho_s - \rho_{\infty}$ dans

son formalisme mathématique, ce qui a pour effet d'inhiber le phénomène de stratification thermique. Aussi, le modèle de Mc Caffrey prédit un très faible écart entre la température des fumées et celle de l'air frais. Le modèle de Heskestad semble reproduire assez fidèlement la stratification thermique puisqu'il retrouve quasiment la même élévation que les normes Américaine et Européenne.

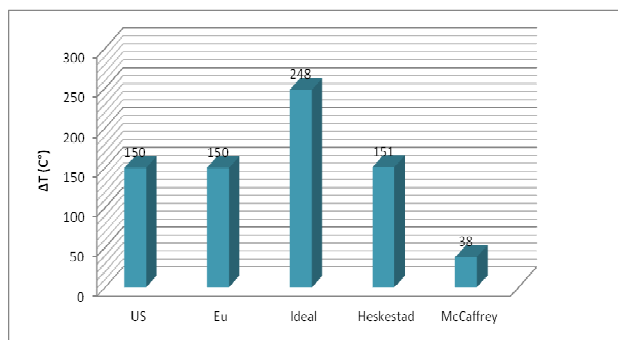


Fig 3. Prédications des élévations moyennes de température.

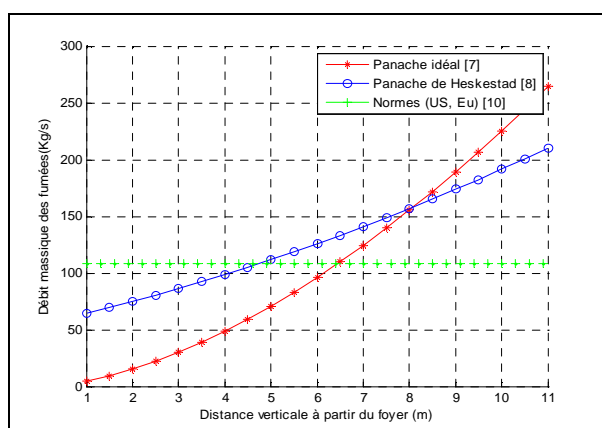


Fig 4. Evolution axiale du débit des fumées selon différents modèles.

Pour ce qui est du débit massique, il était prévisible que les normes (US, Eu) prédisent une valeur (108kg/s) indépendante de la position axiale en dessus du foyer (Fig.4) et ce en raison de l'absence de l'effet d'entraînement de l'air frais dans les modélisations thermodynamiques. Le modèle du panache idéal prévoit un débit massique de 108 kg/s sur une hauteur $z = 6,5$ m proche de celle prévue par les normes ($z = 6,3$ m), ce qui révèle une bonne adéquation pour le dimensionnement de la ventilation en situation de désenfumage. Le modèle de Heskestad prévoit le même débit en une position axiale ($z = 4,6$ m) beaucoup moins élevée en raison de la variation de la masse volumique des gaz, ce qui a pour effet d'accentuer les forces de flottabilité et favoriser

l'entraînement d'air via l'augmentation de la vitesse ascensionnelle du panache.

Pour le cas de la ventilation naturelle, les modèles thermodynamiques prédisent quasiment la même surface ($\sim 53 \text{ m}^2$) pour les ouvertures, alors que le modèle du panache idéal sous estime cette valeur avec un écart relatif proche de 9%. Le modèle de Heskestad ne semble pas être adéquat puisqu'il affiche un écart supérieur à 25% pour la valeur de la surface de ventilation.

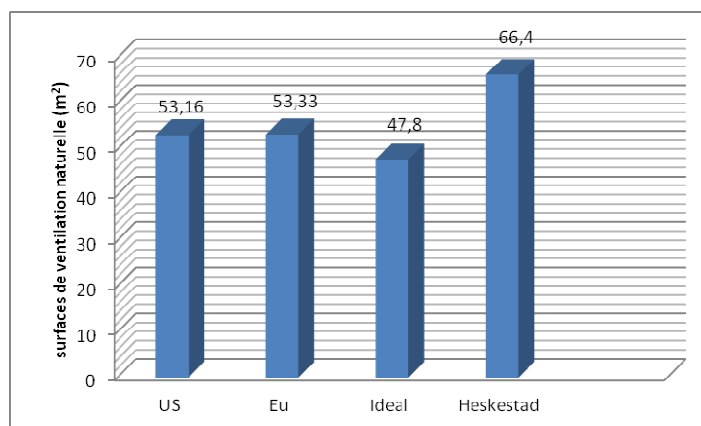


Fig 5. Aires de ventilation naturelle selon différents modèles.

5. Conclusion

Pour la caractérisation thermique de la couche de fumée dans un incendie de compartiment, un progiciel a été développé sur la base de modèles zéro-dimensionnels et formulations corrélatives. Le modèle corrélatif de Heskestad paraît bien adapté pour la caractérisation de la stratification en température et en fumée, alors que le modèle du panache idéal semble mieux adéquat pour des calculs de dimensionnement des SHEVS. Un travail futur consistera à confronter les modèles cités avec ceux de la mécanique des fluides numérique (CFD), dans un objectif global visant à créer des boucles asservies nécessaires au développement de plates formes dédiées à la sécurité incendie.

Références

- [1] J.A. Purkiss, Fire safety engineering: Design of structures, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann Publications, 2007.
- [2] B. Merci, M. Shipp, Smoke and heat control for fires in large car parks: Lessons learnt from research, Fire safety journal, Vol.57, pp.3-10, 2013.
- [3] N. Surdel, La sécurité incendie : Prévention et réglementation, Rapport technique, Université Paris 13, 2008.
- [4] B. Merci, K. Van Maele, Numerical simulation of full-scale enclosure fires in a small compartment with natural roof ventilation, Fire safety journal, Vol.43, pp.495-511, 2008

[5] J.G. Quintiere, Fundamentals of fire phenomena, 1st Edition, Wiley & Sons Publishing, NJ, USA, 2006.

[6] B. Merci, P. Vandelvelde, Comparison of calculation methods for SHEVS I, large compartments, Thermal science journal, Vol.11, pp.181-196, 2007

[7] E.E. Zukoski, T. Kubota, B. Cetegan, Entrainment in fire plumes, Fire safety journal, Vol.3, pp.107-121, 1980.

[8] G. Heskestad, Delichatios M.A., The initial convective flow in fire, 11nd International Symposium on Combustion, pp.1113-1123, The combustion Institute, Pittsburg, USA, 1978.

[9] B.J. Mc Caffrey, Purely buoyant diffusion flames: Some experimental results, NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, 1979.

[10] S. Agred, A. Benarous, D. Karmed, L.Loukarfi, Simplified calculation methods on smoke and temperature stratification in ventilated compartments, Springer International (ISBN 978-3-319-14532-7), 2014.