

## Contrôle des mouvements de masses gazeuses dans les incendies en espaces semi-confinés

M. Lebey & E.Lambert

Université du Havre – Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences

### Résumé

Lors des incendies se développant en espace semi-confiné, la fumée constitue l'un des obstacles majeurs aux opérations d'extinction, mais aussi l'un des vecteurs majeurs de la propagation du feu, puisqu'elle transporte de la chaleur à température élevée et qu'elle pénètre tous les volumes dès lors qu'un orifice existe. Lors des opérations d'extinction, contrôler les mouvements de ces fumées devient dans un enjeu majeur qui permet l'amélioration de l'efficacité et de la sécurité des opérateurs. Le contrôle de ces mouvements de fumées se fait à l'aide de jet d'air libre, tout en jouant sur les différents ouvrants possibles. Cette étude permet de montrer qu'il existe trois types principaux de contrôle des mouvements de fumées dans un feu en espace semi-confiné. Le premier type consiste, à l'aide d'un jet d'air appliqué sur un entrée, à renforcer l'écoulement des fumées vers l'extérieur au travers d'un exutoire pratiqué le plus près du foyer. Le deuxième type revient à renverser l'écoulement naturel ascendant des fumées de manière à protéger des zones supérieures à celle où se développe la combustion. Le troisième type consiste à créer un mouvement des fumées à l'aide de l'effet d'entraînement du jet, ce qui peut se pratiquer dans les grands volumes. Cette étude permet aussi de montrer que le processus mis en oeuvre revient au passage d'un régime d'écoulement des fumées contrôlé par la combustion à un régime d'écoulement contrôlé par le ou les jets d'air, ces deux régimes étant séparés par un phase transitoire principale au cours de laquelle la décroissance des températures est brutale lorsque la puissance de ventilation est suffisante. L'analyse de l'évolution des températures au cours de cette phase transitoire et du régime contrôlé par le jet d'air montrer quelles peuvent être représentées par des exponentielles décroissantes avec toutefois une constante de temps nettement plus grande pour les phase transitoire, confirmant la chute brutale de température lors de la mise en action du jet. Au terme de cette analyse, il apparaît la nécessité d'études plus approfondies, surtout en situation réelle, pour permettre des avancées plus sûres dans l'explication des phénomènes mis en jeu.

### 1 - Introduction

Si beaucoup d'études ont été conduites sur les problèmes de l'incendie en espaces semi-confinés, en particulier sur la combustion, très peu de travaux ont été entrepris sur la ventilation dans les incendies, c'est à dire sur les problèmes de contrôle des écoulements de fumées par des moyens opérationnels mis en œuvre par les équipes pendant leurs interventions sur feux, notamment sur l'emploi d'appareils à jet libre d'air.

Pourtant, la maîtrise des écoulements de fumées, grâce à la ventilation opérationnelle, peut apporter un avantage considérable sur la maîtrise des incendies en espaces semi-confinés. Pour l'essentiel, il est possible de citer dans la dernière décennie, deux auteurs qui ont entrepris spécifiquement des travaux sur la ventilation dans les incendies, Gunnerson avec Ziesler aux Etats-Unis (1992), et Tuomisaari (1994) en Finlande.

Gunnerson a abordé l'étude par deux approches. La première a consisté à employer la ventilation par surpression dans des feux de pavillons en grandeur réelle d'un seul niveau, il a ainsi confirmé les avantages qu'elle peut apporter, en particulier pour ce qui concerne la baisse de température, de concentration en monoxyde et en dioxyde de carbone. La seconde approche a consisté à examiner la possibilité de simuler, dans une cuve hydraulique, les écoulements produits par les jets, sans toutefois pouvoir prendre correctement en compte les effets comme les gradients thermiques et la diffusion de la chaleur. Ces études n'ont cependant porté que sur des constructions simples, sur un seul niveau et avec l'emploi d'un seul appareil.

De son côté, Tuomisaari a mené une étude sur maquette au  $\frac{1}{4}$  d'une construction, elle aussi d'un seul niveau. Cette construction comporte trois pièces sur une surface d'ensemble carrée, la moitié

pour la grande pièce, l'autre moitié étant également partagée entre les deux autres pièces. Les dimensions de ces expérimentations permettent d'employer des foyers réels ramenés à l'échelle de la maquette. Deux types de foyers ont été employés, un foyer de bûchettes étagées croisées, et un foyer composé d'une paroi en bois aggloméré. La ventilation est réalisée par surpression, à l'aide d'un ventilateur à jet d'air libre placé à l'extérieur. La masse du foyer n'est cependant pas mesurée au cours du temps, seules sont analysées les évolutions des températures, des concentrations d'oxygène, de monoxyde et dioxyde de carbone. Les résultats montrent clairement l'action de la ventilation sur l'évolution de la situation dans les locaux pendant la combustion : abaissement des concentrations de monoxyde et dioxyde de carbone, ainsi qu'une remontée de la concentration en oxygène, ceci associé à l'abaissement net des températures en particulier dans les volumes où il n'y a pas de foyer.

Les résultats de cette dernière analyse doivent cependant être nuancés par ceux qui ont pu être mis en évidence lors des études réalisées par Lebey *et al.* (1977-1984, 1997-2002) sur la ventilation dans les incendies et sur les appareils à jet libre. Ces études ont permis de montrer l'importance considérable que prend la nature du jet sur l'efficacité qu'il peut avoir en conditions réelles d'utilisation, l'une de ces conséquences étant les grandes difficultés qu'il y a à pouvoir étudier sur maquette le problème d'ensemble du contrôle des écoulements de fumées dans un incendie.

L'ensemble des résultats obtenus par Lebey *et al.* corrobore ceux acquis en situations réelles. Il a été montré que l'emploi de la ventilation dans un incendie n'a pas nécessairement pour conséquence une réactivation de la combustion, mais qu'au contraire dans certaines circonstances, l'abaissement de la température produit par la ventilation opérationnelle conduit à une chute de l'activité de certains foyers. Si ce résultat ne peut évidemment pas être généralisé, il conduit à devoir déterminer les limites d'emploi de la ventilation opérationnelle, ainsi qu'à mettre au point les moyens de connaître ces limites. Un autre résultat important a pu être obtenu par l'étude de situations particulières, il s'agit du renvoi des fumées par des exutoires qui ne sont pas nécessairement en partie supérieure.

L'utilisation de jets libres d'air pour réaliser le contrôle des écoulements de fumées dans la ventilation dans les incendies a conduit dès le début à envisager l'association de la brumisation ou de la pulvérisation d'eau directement dans le jet. On sait en effet que la pulvérisation et plus encore la brumisation peuvent avoir un effet très important sur l'extinction des feux. Des travaux comme ceux de Richard *et al.* (1998-2002) ont permis de montrer que la brumisation non seulement augmente la rapidité et l'efficacité de l'absorption de la chaleur mais aussi diminue la concentration locale d'oxygène du fait de l'expansion volumique au moment de la vaporisation. Ce second effet permet de contribuer nettement à l'efficacité de l'extinction. Cette méthode est actuellement essentiellement employée en prévention, directement sur les installations industrielles parce que les brouillards ont une faible portée du fait de la faible dimension des gouttelettes.

L'un des problèmes majeurs qui s'oppose à l'emploi de la ventilation dans les incendies est le risque d'explosion. Le contrôle des mouvements de fumées se fait à l'aide de jets libres d'air appliqués en des endroits précis, ce qui revient à une injection d'oxygène dans un mélange qui peut contenir des produits imbrûlés. Si la température est suffisamment élevée, l'apport d'oxygène risque de porter ce mélange à son point d'auto-inflammation, ce qui provoque une explosion. Dans les conditions d'incendies ce phénomène entraîne un violent souffle vers l'extérieur, souffle que l'on dénomme backdraft (ou backdraught). Ce problème se rencontre souvent dans les feux de bateaux, en particulier dans les salles de machines du fait de la présence de grandes quantités d'huile et de fuel lourd. Récemment, Gottuk *et al.* (1999) ont mis en évidence que la fraction de combustible constitue le paramètre clé du déclenchement du backdraft et que la pulvérisation d'eau dans le compartiment permet d'en diminuer considérablement le risque. Fleischmann et Grattan (1999) ont examiné les conditions de mélange qui se produisent lors de l'ouverture d'un compartiment contenant un mélange dont les conditions sont susceptibles de provoquer un backdraft. Ces analyses ont été faites par deux approches, numérique et expérimentale sur maquette en simulation hydraulique. Les essais ont été réalisés dans un bac en utilisant l'arrivée d'eau douce dans un compartiment d'eau salée. Ils ont mis en évidence l'existence d'une petite couche de mélange à l'interface entre les deux zones, localisant ainsi l'endroit de déclenchement du backdraft. Cette étude a de plus montré la très bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux.

Un autre problème important qui peut constituer un obstacle à l'emploi de la ventilation dans les incendies est le flashover. Ce phénomène peut prendre deux formes. L'une est l'inflammation d'une couche de fumée à température suffisamment élevée et en mouvement sous-plafond. L'autre est

l'inflammation simultanée de toutes les surfaces combustibles qui se trouvent proches de la zone en feu. Ces deux formes ont fait l'objet de nombreuses études, cependant aucune d'entre elles ne fait état de l'influence de la ventilation opérationnelle sur le déclenchement de ce phénomène.

Ces études sur la ventilation opérationnelle font état des avantages qu'elle apporte dans son utilisation classique, c'est-à-dire lorsqu'elle est réalisée à partir d'une surpression créée dans un premier volume, par un jet d'air libre appliqué sur une ouverture de la dimension d'une porte standard de maison ou d'appartement. Ces descriptions font apparaître les baisses de températures, l'amélioration de la visibilité et la diminution de la toxicité.

Dans l'étude présentée ici, nous proposons d'apporter une explication de l'effet de la ventilation opérationnelle, en terme de contrôle de mouvements de masses gazeuses réalisé à l'aide d'un, voire de plusieurs jets d'air libres, et d'étendre cette notion de contrôle des mouvements de masses gazeuses à d'autres configurations opérationnelles. Dans tous les cas étudiés, nous mettons en évidence les deux régimes principaux, les mouvements de masses gazeuses contrôlés par la combustion et les mouvements de masses gazeuses contrôlés par un ou plusieurs jets d'air libres. Nous analysons le passage d'un régime à l'autre pour en faire ressortir une notion d'efficacité du contrôle des fumées, qui doit être suffisamment fiable parce que mal employé ce contrôle pourrait avoir des effets contraire et dangereux.

Dans le paragraphe 2, nous présentons deux processus de contrôle à l'aide d'un jet d'air libre des écoulements de masses gazeuses dans un incendie en espaces semi-confinés, l'un par surpression et l'autre par contrôle des mouvements de gaz à l'aide de jets d'air libres. Nous montrerons que dans tous les cas, il y a passage d'un régime d'écoulement dominé par la combustion à un régime d'écoulement contrôlé par la ventilation.

Dans le paragraphe 3, nous examinerons trois types principaux de contrôle des mouvements de masses gazeuses dans un incendie se développant dans un ensemble de compartiments: 1) le cas classique par création d'une surpression, et 2) autres cas qui constituent de nouvelles approches: 2) le renversement du sens naturel ascendant des masses gazeuses chaudes, 3) le contrôle des mouvements de masses gazeuses chaudes dans un grand volume ne comportant qu'une seule ouverture.

Dans le dernier paragraphe, nous analyserons les problèmes opérationnels liés à l'emploi de ces méthodes, en particulier les problèmes à la prise de décision d'emploi ou pas de l'une de ces méthodes. Nous terminerons par une réflexion sur ce que peuvent être mes moyens de décision d'emploi ou de ces méthodes, sachant qu'en situation réelle, il est très difficile de recueillir des informations fiables sur la nature et l'évolution du feu.

## **2 - Les deux principaux principes du contrôle des mouvements de à l'aide de jets d'air libre**

Dans les incendies se développant dans des espaces semi-confinés, les deux processus de contrôle par jet d'air libre des mouvements de masses gazeuses dans les incendies sont la surpression ou la dépression, et la mise en mouvement par entraînement.

Dans la mise en surpression, un jet d'air libre produit par un ventilateur est appliqué depuis l'extérieur sur l'une des ouvertures (voir figure 1). De cette manière, l'énergie cinétique du jet est transformée en énergie potentielle dans le premier compartiment sous forme de pression. Cette surpression s'étend à l'ensemble des compartiments et provoque un écoulement sortant par tout orifice qui peut exister. L'effet de base habituellement attendu est l'évacuation d'une partie des fumées vers l'extérieur, emportant une grande partie de la chaleur produite par la combustion. Le second effet est la possibilité de choisir le cheminement des masses gazeuses de manière à contrôler en partie le développement de l'incendie. Ceci peut se faire en appliquant un jet d'air libre sur un ou plusieurs orifices. Cette méthode pose le problème de l'efficacité du jet sur une ouverture et conduit donc à préciser l'établissement de l'écoulement entre le dispositif qui produit le et l'orifice.

Le deuxième processus de contrôle des mouvements de masses gazeuses qu'il est possible d'utiliser dans un incendie est l'effet d'entraînement des gaz par un jet d'air libre. En effet dans le cas de volume de grande dimension, avec de larges ouvertures, il est impossible de créer une surpression par application d'un jet d'air libre sur une grande ouverture. Le contrôle des mouvements de masses gazeuses peut alors être réalisé par effet d'entraînement d'air à l'aide d'un jet, dans une direction donnée (voir fig 2), mettant ainsi en mouvement les masses gazeuses dans un sens qui convient mieux à leur évacuation vers l'extérieur.

Comme nous le verrons dans les exemples suivants, ces deux processus ont en commun un effet de chute des températures dans la zone où les fumées sont convectées vers l'extérieur. Cette chute de température caractérise en fait une phase transitoire entre un régime d'évolution du sinistre entièrement gouverné par la dynamique de la combustion, et un régime tout ou partie contrôlé par me jet d'air. Sur la figure 3, on peut voir un exemple simplifié de cette transition, mettant bien en évidence les deux régimes, le premier contrôlé par la dynamique de la combustion et le second par le jet d'air. Une analyse plus précise fait apparaître une décomposition encore plus précise. Entre A et B se trouve une première phase de baisse de température, courte et de faible amplitude. Entre B et C se trouve la véritable phase de chute de température montrant le changement de régime dans la zone concernée par l'action du jet. A partir du point E se développe le nouveau régime contrôlé par le jet, au cours duquel la décroissance des température se poursuit mais avec une intensité beaucoup plus faible. Ce régime peut être précédé d'une autre courte phase de raccordement entre la chute importante de température et le nouveau régime contrôlé par le jet

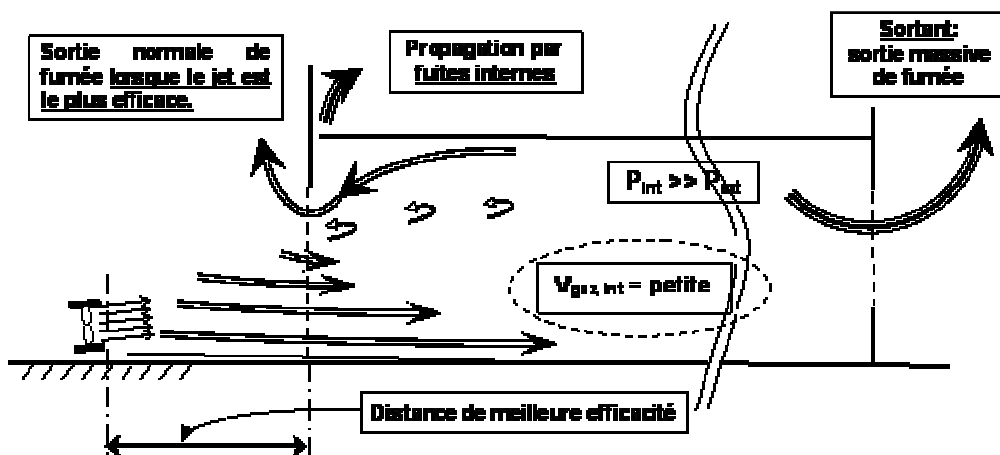


Fig 1 : schéma de principe du contrôle par surpression des mouvements de masses gazeuses dans un incendie dans des espaces semi-confiné de configuration complexe.

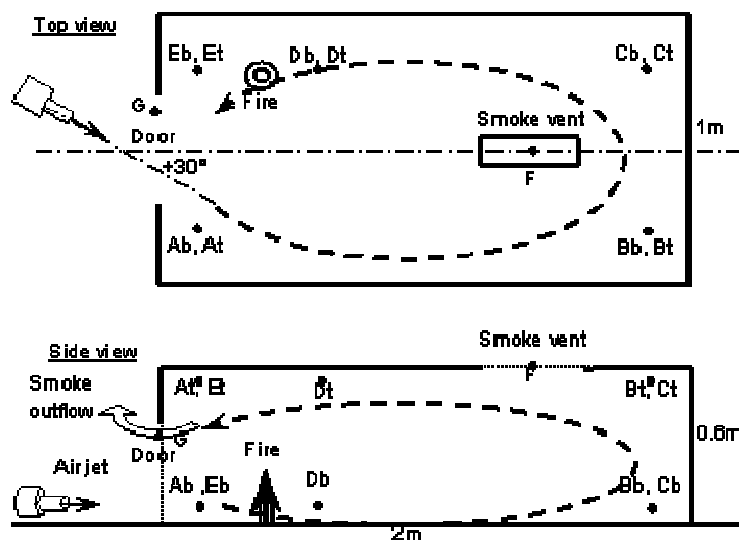
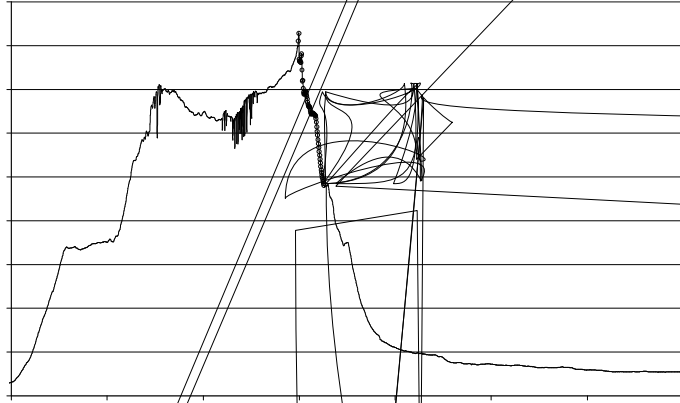


Fig 2 : schéma de principe du contrôle des mouvements de masses gazeuses. par entraînement à l'aide d'un jet air orienté.

. Comme nous le verrons dans les exemples décrit dans le paragraphe suivant, la phase transitoire de chute de température et le régime contrôlé par le jet peuvent être chacun caractérisé par une exponentielle décroissante, mais avec des coefficients très différents dans la mesure où la phase transitoire présente une chute de température très importante alors que le nouveau régime atteint est proche d'un état stationnaire.



de grandeurs suffisamment significatives de la réalité de la situation. Le problème ici est de connaître ces grandeurs, ce qui n'est pour le moment pas vraiment le cas surtout en situation réelle. Pour le moment, c'est la température qui permet l'approche la plus appropriée aux contraintes de situations réelles.

### **3 - Trois principaux types de contrôle des mouvements de fumées dans les incendies**

Nous allons maintenant présenter l'analyse des possibilités de contrôle de mouvements de fumées au travers de trois exemples caractéristiques, deux exemples dans des volumes de petites dimensions et un exemple dans des volumes de grandes dimensions.

La notion de dimension du volume, petite ou grande, est a priori toute relative. Cependant, en se référant au moyen qu'il est possible de mettre en œuvre en situation réelle, il existe une taille que l'on peut considérer comme maximale pour les jets, ceci du fait de la taille maximale des appareils dont on peut disposer en situation réelle. Ainsi les jets d'air que l'on peut produire pourront avoir un effet significatif de mise en surpression ou en dépression dans un petit volume au travers d'une ouverture d'une section équivalente de l'ordre de 10 fois la section du jet initiale, c'est le cas des portes ou fenêtres dans les habitations les plus courantes. Par contre, pour des ouvertures de taille beaucoup plus importante pour des locaux de la taille d'entrepôts, le rapport entre la section de l'ouverture et celle de du jet initial passe au-delà de 40. La mise en surpression ne peut plus se faire par l'action du jet, c'est alors l'effet d'entraînement du jet qui est utilisé.

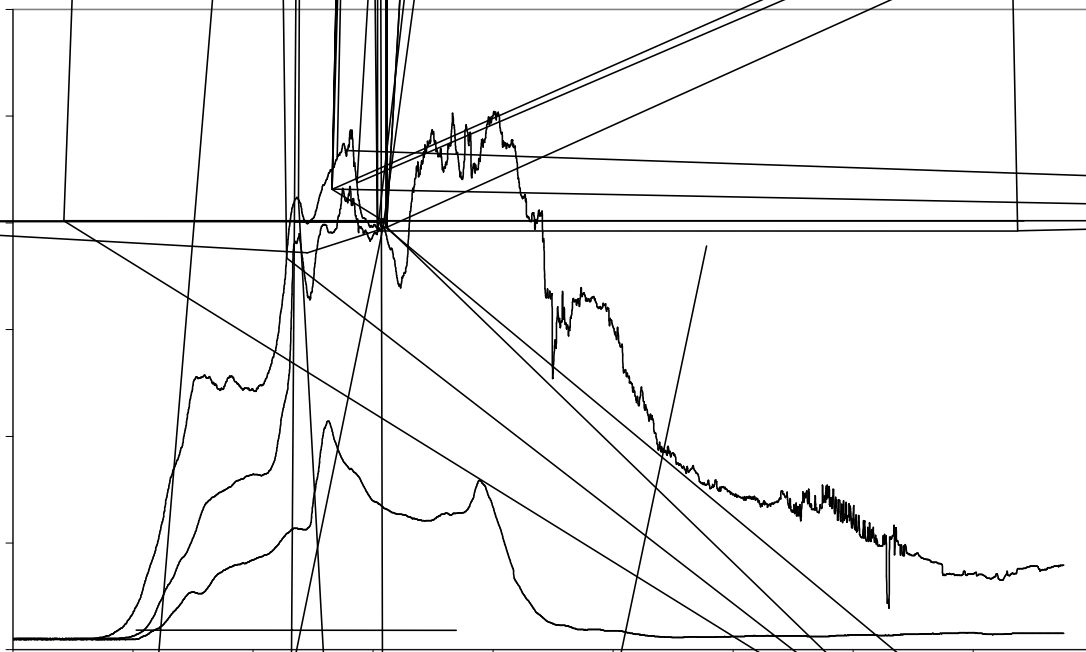
Pour les petits volumes, nous présentons un exemple de contrôle de mouvements de fumées qui va dans le sens de l'écoulement produits par la combustion, et un second cas où le contrôle consiste à renverser le mouvement naturel des fumées généré par la combustion. Dans les grands volumes, nous présentons un cas où les fumées sont refoulées vers un exutoire inférieur et un cas où le contrôle des mouvements de fumées est réalisé par l'effet d'entraînement du jet d'air.

Le premier cas concerne une situation courante d'un feu dans un immeuble d'habitation, feu d'appartement ou feu de chambre d'hôpital, avec risque de propagation des fumées dans l'immeuble à l'extérieur de l'appartement. L'appartement simulé est une pièce de 5m sur 6m et 2,80m de haut. L'ensemble combustible est reproduit tel une chambre avec tout son mobilier. La pièce donne sur un couloir par une porte, lequel communique directement avec l'escalier venant du rez-de-chaussée où sera appliqué le ou les jets de ventilateurs. Cette pièce donne sur l'extérieur par une baie vitrée. Des mesures de températures ont été réalisées à l'intérieur, près de la porte d'entrée à trois niveaux, 20cm sous le plafond, mi-hauteur et 1m au dessus du sol, c'est-à-dire à la hauteur de la tête d'un homme à genoux. Cette position est très importante parce qu'elle est très largement employée lorsque le risque et le stress thermique sont importants, elle permet de rester dans les couches les plus basses, donc à plus faibles températures tout en gardant une mobilité suffisante. La procédure expérimentale a consisté à appliquer le jet d'air après 5 min de combustion, délai représentant une évaluation du temps nécessaire au services de secours pour arriver sur les lieux et de se mettre en œuvre.

Sur la figure 4, la représentation de l'évolution des températures fait apparaître les deux phases de refroidissement obtenues avec l'application du contrôle des mouvements de fumées.

Avant de détailler ces différentes phases, il convient de faire quelques remarques sur l'ensemble des évolutions de températures. Au début de la combustion, après la première montée en température il apparaît un pallier sur l'ensemble des températures à l'intérieur de la pièce. Ce pallier est d'un niveau différent selon les points de mesure. Près de la porte, à 1m du sol, le pallier se trouve à environ 200°C, à partie de la mi-hauteur, jusqu'au plafond, le pallier est à environ 300°C. Près de la fenêtre, les paliers de températures sont de l'ordre de 500°C. La température d'ensemble n'est donc pas homogène. A la fin de ces paliers, une brusque augmentation de températures généralisée apparaît avec une homogénéisation d'ensemble à un niveau moyen de 750°C. Cette élévation brusque des températures est significative d'un embrasement généralisé, c'est-à-dire que les diverses zones de combustion qui avaient pu se développer indépendamment les unes des autres, ne forment plus qu'un seul foyer. A ce même moment, la baie vitrée a cédé sous les effets cumulés de la température et de la surpression brutale produits par l'embrasement généralisé. Cette ouverture brutale vers l'extérieur a conduit à la création d'un circuit d'écoulement des masses gazeuses depuis l'entrée d'air frais au bas de l'escalier vers la sortie des gaz par l'ouverture laissée par la baie vitrée détruite, le mouvement des gaz étant produit par la poussée d'Archimède consécutive à la combustion. Il s'était ainsi établi un régime de mouvement des masses gazeuses contrôlé par la combustion. L'analyse des températures dans le

couloir fait apparaître un autre phénomène, le développement d'une couche de gaz chaud en partie supérieure se propageant dans le sens opposé de l'écoulement établi par la combustion. Ce phénomène s'apparente au phénomène de backlayering connu dans les tunnels, couloirs et tunnels s'apparente à des tubes. C'est cette propagation de gaz chaud, d'une température de l'ordre de 750°C, qui représente un danger majeur de propagation de la combustion, en même qu'elle constitue un obstacle à la progression des équipes d'extinction.



$$T(t) = 865 \exp\left(-\frac{t}{0,967}\right), \quad \text{avec } R^2=0,975$$

2) régime d'écoulement contrôlé par les jets:

$$T(t) = 54 \exp\left(-\frac{t}{2,40}\right) + 50, \quad \text{avec } R^2=0,946$$

Le deuxième exemple de contrôle des mouvements de masse gazeuse dans un incendie concerne le cas d'un renversement de l'écoulement naturel produit par la combustion. Dans le cas d'un feu qui se propage dans une cage d'escalier, l'effet de la poussée d'Archimède prend une grande importance. Les gaz chauds se propagent vers les parties hautes, isolant dans certaine situation tous les accès supérieurs. Il alors s'avérer utile de "purger" les niveaux supérieurs à celui du feu de toutes fumées et d'empêcher de nouvelle propagation de fumées dans ces parties. Cela revient à renverser le mouvement naturel ascendant des fumées. Après avoir tester cette méthode en situation réelle, nous l'avons abordé son analyse sur maquette, selon le schéma de principe de la figure 5. Dans la simulation un conduit vertical représente l'escalier. Un foyer réel est placé dans la partie inférieure. Il constitué de bûchettes étagées croisées avec une masse totale double de ce que ma quantité d'oxygène contenu dans le volume étudié pourrait permettre de brûler, soit 400g de bois. Deux ouvertures ont été utilisées au cours de la combustion: l'une en partie haute et l'autre à un niveau juste au dessus de celui du foyer. En partie haute elle correspond à un exutoire de fumée ou à une fenêtre, celle placée à un niveau au dessus du foyer correspond à une fenêtre par exemple. Après que la combustion avait atteint son plein développement, l'exutoire supérieur a été ouvert, puis ensuite celui placé juste au dessus du foyer. C'est sur cet exutoire que le jet est appliqué pour inverser le mouvement naturel ascendant des fumées. De cette manière les parties supérieures se trouvent purgées de toutes fumées et le flux de fumées issu de la zone de combustion est renvoyé vers l'extérieur par la porte inférieure. La figure 5 montre l'effet sur les températures. La phase intermédiaire et le régime d'écoulements des fumées contrôlé par le jet apparaissent sur cette figure.

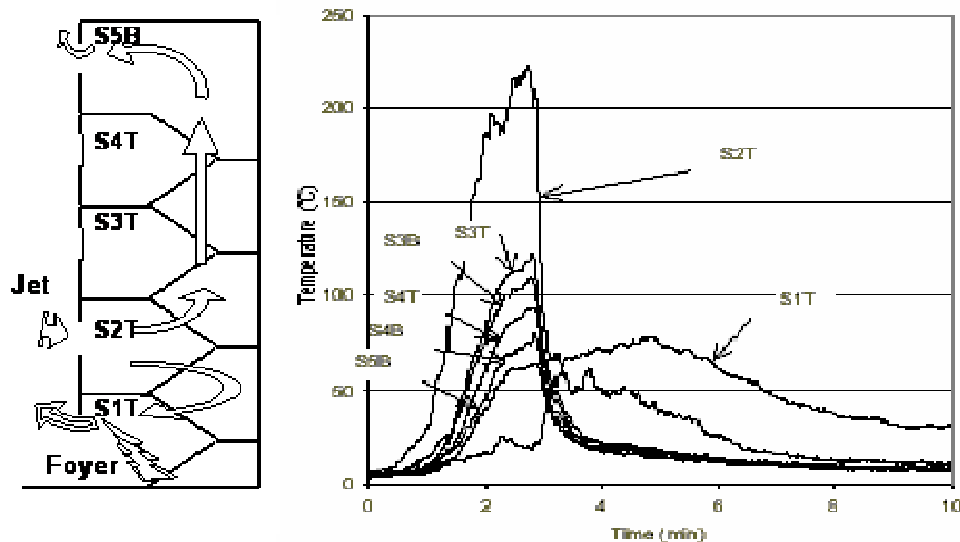


Fig 5 : Etude du contrôle des mouvements de masses gazeuses dans le cas d'un renversement du mouvement naturel ascendant dans une cage d'escalier.

Les expressions de l'évolution de ces températures durant ces phases sont les suivantes pour les températures les plus élevées, juste au dessus su niveau du foyer:

1) phase transitoire de décroissance des températures:

$$T(t) = 41 + 170 \exp\left(-\frac{t}{0,0929}\right), \quad \text{avec: } R^2=0,993$$

2) Régime stabilisé d'écoulement des fumées contrôlé par le jet:



$$T(t) = 9 + 36 \exp\left(-\frac{t}{1,30}\right), \quad \text{avec: } R^2=0,977$$

Le contrôle des mouvements de fumées par le jet est clairement établi lorsque l'on supprime l'action du jet et que l'on constate que la remonter des températures jusqu'à un niveau qu'elles auraient atteint en l'absence de mise en place du contrôle par le jet d'air libre. Cette remarque met en évidence le problème de l'efficacité d'une telle méthode puisque si dans notre cas, l'effet du jet a été suffisant, une puissance plus faible aurait pu n'avoir aucun effet sur le renversement de l'écoulement ascendant nature des fumées mais aurait plutôt alimenté en air frais les parties supérieures, risquant ainsi l'intensification de la combustion.

Le troisième cas présenté dans cette étude concerne un volume unique de grande dimension, de la taille d'un entrepôt industriel, ne comportant pas d'exutoire en partie haute et une grande ouverture de grande dimension incompatible avec l'action d'un jet d'air dans le but de créer une surpression à l'intérieur. L'étude de ce cas a été réalisée dans le cas d'un foyer localisé d'importance suffisante pour que le compartiment se trouve totalement envahi par les fumées. Dans l'essai présenté à titre d'exemple le foyer était constitué d'un mélange de 2l d'heptane et de 8l de fuel dans un contenant circulaire de diamètre 600mm, donnant une puissance moyenne de 0,5MW. Le volume utilisé avait pour dimensions 5,5m de long, 2,4m de large et 2,3m de haut. L'ouverture se trouvait au milieu de l'une des largeurs, avec une hauteur 1,80m. Comme le montre la figure 6, le contrôle des mouvements de fumées se fait alors en utilisant l'effet d'entraînement du jet pour créer un mouvement circulaire. Ce mouvement circulaire est créé en appliquant le jet dans l'un des deux angles de la partie inférieure de l'ouverture de telle manière que les fumées soient forcées de sortir par l'angle supérieur opposé. Cette méthode suppose l'emploi d'un jet directif orienté avec un angle d'incidence de l'ordre de 45° par rapport au plan vertical de symétrie de l'ouverture. La figure 6 montre l'effet sur l'évolution des températures du contrôle par le jet des mouvements de fumées. La phase transitoire apparaît nettement avec une chute de température sous plafond de 250°C à 50°C, pour atteindre le niveau de régime contrôlé par le jet d'air libre.

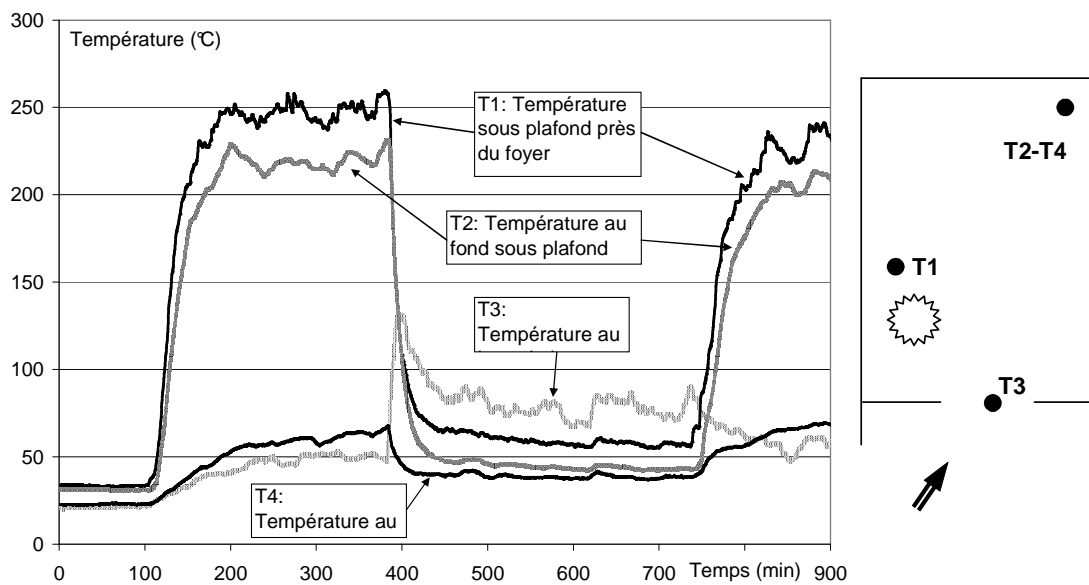


Fig 6 : Contrôle des mouvements de fumées dans un grand volume à l'aide de l'effet d'entraînement d'un jet libre d'air. - - - - -

Les expressions de la phase de l'évolution des températures lors de la phase transitoire et lors du régime contrôlé par le jet sont les suivantes:

- 1) Phase transitoire

$$T(t) = 77 + 174 \exp\left(-\frac{t}{8,47}\right), \text{ avec } R^2=0,996$$

2) Régime contrôlé par le jet:

$$T(t) = 50 + 14,6 \exp\left(-\frac{t}{322}\right), \text{ avec } R^2=0,770$$

Comme cela avait été abordé avec les autres cas, l'arrêt du jet a été testé. Comme le montre la courbe de la figure 6, l'arrêt du jet provoque immédiatement la remontée de l'ensemble des températures. Cette remarque met encore en évidence le problème d'efficacité et de fiabilité du processus de contrôle des mouvements de fumées à l'aide d'un jet d'air libre et des appareils qui permettent de générer les jets.

#### **4 –Analyse des conséquences opérationnelles possibles et conclusions.**

Dans les incendies se développant en espace semi-confiné, les écoulements des fumées jouent un rôle important dans le développement de la combustion, donc du sinistre. Cependant, c'est bien la combustion qui génère l'énergie qui met en mouvement les masses gazeuses. Jusqu'à maintenant, stopper un feu consistait principalement à supprimer la combustion, principalement avec des moyens hydrauliques, en particulier les lances. Cependant, des difficultés apparaissent avec les mouvements des fumées qui peuvent se propager partout dès qu'un orifice apparaît, ce qui a pour conséquence la création d'autres foyers et donc le développement accru du sinistre. Dans certains cas contrôler ces mouvements de fumées devient un moyen supplémentaire pour améliorer l'efficacité de l'extinction, et surtout limiter, voire supprimer les propagations du feu par les fumées. Le contrôle du mouvement de ces fumées s'obtient à l'aide d'un ou plusieurs jets d'air libre à condition qu'ils soient suffisamment puissants et appliqués judicieusement.

L'étude présentée ici permet de montrer l'existence de trois modes principaux de contrôle des mouvements de fumées. Le premier consiste à renforcer le mouvement d'écoulement des fumées créé par le développement du feu, mais en créant un exutoire le plus près possible du foyer et en aval de celui-ci. Le deuxième mode de contrôle consiste à renverser le mouvement ascendant naturel des fumées pour permettre leur évacuation par un exutoire proche du foyer tout en protégeant d'autres volumes qui sont par la seule convection naturelle des fumées. Le troisième mode de contrôle consiste à utiliser l'effet d'entraînement du jet d'air pour donner aux fumées un mouvement tel que, même en l'absence de conduit formé par des parois, elles soient dirigées vers l'extérieur par un cheminement choisi; ce dernier cas s'applique plus au grand volume. Dans tous les cas, il s'agit de forcer l'écoulement des fumées vers l'extérieur par le plus court chemin. Ces modes de contrôle permettent de passer d'un régime d'écoulements des fumées contrôlé par la combustion à un régime d'écoulement contrôlé par le ou les jets libres d'air, c'est-à-dire contrôlé par les équipes d'extinction.

Dans les effets produits sur les températures, tous les essais présentés dans cette étude montrent clairement l'existence d'une phase de transition entre le régime d'écoulement contrôlé par la combustion et le régime d'écoulement contrôlé par le ou les jets d'air libre. Dans la partie principale de cette phase transitoire, l'évolution des températures en partie supérieures, c'est-à-dire dans les fumées, peut être représentée en première approximation par une exponentielle décroissante montrant ainsi que l'effet majeur du jet sur les températures se produit dès que le ou les jets sont appliqués. Il faut cependant noter l'existence d'une phase de raccordement qui précède cette phase transitoire, phase au cours de laquelle la température cesse de croître pour commencer à décroître avec une faible amplitude et un temps relativement court. Compte tenu de sa faible importance, l'analyse fine de cette première phase n'est pas prise en compte dans cette étude.

On peut aussi noter que l'évolution des températures dans le régime d'écoulement contrôlé par le ou les jets libres d'air peut être aussi représentée par une exponentielle décroissante, mais avec une constante de temps beaucoup plus élevée. Ce qui montre que le refroidissement se poursuit lors du régime contrôlé par les jets d'air, mais avec une décroissance des températures est beaucoup moins rapide.

Cette analyse synthétique laisse toutefois apparaître plusieurs points qu'il reste à éclaircir, dont une partie des principaux sont:

- l'évaluation de l'efficacité de la méthode en situation réelle d'intervention,

- le déclenchement incontrôlé d'un embrasement généralisé, rapide ou non,
- l'opportunité de mettre en œuvre ou pas de telle méthode de contrôle d'écoulement des fumées, en situation réelle d'intervention,
- la puissance relative nécessaire du ou des jets d'air par rapport à celle développée par l'incendie lui-même,
- dans la méthode par entraînement d'air avec le jet, l'influence sur la stratification des fumées.

De ces différents points, il ressort un problème majeur qui est la prise de décision d'emploi de ces méthodes. En effet, ces méthodes ne sont pas sans risques comme le montre la réflexion que l'on peut se faire sur le risque de déclenchement d'un embrasement généralisé ou le problème de la puissance minimale d'un jet pour obtenir un effet escompté. La prise de décision relève de l'expérience du responsable des opérations, mais aussi de moyens d'appréciation plus objective de la réalité à laquelle il est confronté. En dehors de ces aspects, il ne dispose actuellement d'aucun moyen de quantification objective des conditions devant lesquelles il se trouve, quantification qui, associée à une base de données, pourrait rendre beaucoup plus sécurisé l'emploi de ces méthodes.

La recherche d'une meilleure compréhension de l'ensemble des phénomènes intervenant dans ces processus de contrôle des mouvements de fumées dans les incendies se développant en espace semi-confiné (incendies de types urbains et industriels), suppose la poursuite de travaux dans deux axes principaux, l'observation de situations réelles d'incendies et l'expérimentation en grandeur réelle. La modélisation numérique et la simulation sur maquette peuvent apporter une aide importante dans la compréhension de l'ensemble, cependant dans l'état actuel des connaissances, ni l'une ni l'autre ne permet d'accéder à une représentation suffisamment précise de la réalité des interventions sur incendies. De plus, le nombre important de phénomènes qui interviennent simultanément, et leur interaction nous semble demander une analyse globale de ce type de problème de lutte contre ce genre d'incendie.

### Références bibliographiques

- Gunnerson, F. S.; Ziesler, P. S.; Williams; S. K., Simulation of Positive Pressure Ventilation (PPV) for Research and Training, International Association for Fire Safety Science. Fire Safety Science. *Proceeding. 4<sup>th</sup> international symposium-July 13-17-1994*, Ottawa, Ontario, Canada; International Association for Fire safety Science. Boston, MA, Kashiwagi, T; Editor pp 1029-1039; 1994.
- Daniel T. GOTTUK<sup>a\*</sup>, Michelle J. PEATROSS<sup>a</sup>, Jhon P. FARLEY<sup>b</sup>, Frederick W. WILLIAMS<sup>b</sup>, The Development and Mitigation of Backdraft : a real-scale Shipboard Study, *Fire Safety Journal* 33 (1999) 261-282
- C.M. Fleischmann, and K.B. McGrattan" Numerical and experimental gravity currents, related to backdrafts, *Fire Safety Journal* 33 (1999) 21-34
- M. Lebey and O. Cité, " Smoke movement control by a free air jet in a large compartment with a localized fire", Third Mediterranean Combustion Symposium, MCS3, Marrakech, 8-13 June 2003
- M. Lebey & R. Vidor, " Development of a free jet generated by an axial turbine in an open space, application to Ventilation in Firefighting", 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon , Portugal, 8-11 July, 2002.
- J. RICHARD, J.P. GARO, J.M. SOUIL and J.P. VANTELON and D. LEMONIER " Addition of a water mist on a small-scale liquid pool fire. Effect on radiant heat transfer at the surface", soumis pour présentation au Twenty-Ninth International Symposium on Combustion, Sapporo, Japan, 21-26 th July 2002.
- Tuomisaari, M., Smoke ventilation in operational fire fighting, *Technical Research Centre of finland*, ESPOO 1997