

Les simulations de propagation de feu en milieu urbain

Thomas Breton, Yves Duthen

▶ **To cite this version:**

Thomas Breton, Yves Duthen. Les simulations de propagation de feu en milieu urbain. 2008. hal-00287987

HAL Id: hal-00287987
https://hal.science/hal-00287987

Preprint submitted on 13 Jun 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les simulations de propagation de feu en milieu urbain

Thomas Breton, Yves Duthen

Table des matières :

Les simulations de propagation de feu en milieu urbain 1

1] Introduction 4

2] Généralités sur l'incendie : 5

2.1] La combustion : 5

2.2] La propagation du feu : 5

3] Une première approche, les modèles de feux de forêt : 7

3.1] Les modèles statistiques : 7

3.2] Les modèles semi-empiriques : 7

3.3] Les modèles thermiques : 8

3.4] Les modèles multiphasiques : 8

3.5] Exemples de simulation de feux de forêt : 9

4] Les modèles de simulation de feu en milieu urbain : 13

4.1] Les modèles analytiques : 13

4.2] Les codes par zones : 13

4.3] Les modèles par champs : 14

4.4] Autres modèles : 14

5] Les simulations en intérieur : 15

5.1] Feux en milieu clos ou semi-ouvert : 15

5.2] Les feux en entrepôt : 23

5.3] Les feux de tunnel : 25

6] Les simulations en extérieur : 30

6.1] Les feux en extérieur : 30

6.2] Les feux entre bâtiments : 31

7] Conclusion et perspectives : 35

Table des figures :

Fig. 1 : Le triangle du feu 5

Fig. 2: Champ de température (gaz) et vecteurs vitesse calculés au cours de la propagation d'un feu de surface à travers une garrigue Méditerranéenne 11

Fig. 3 : Les quatre étapes d'un incendie en intérieur 16

Fig. 4 : Contrôle du volume et terminologie utilisée pour un feu en intérieur. 17

Fig. 5 : Quatre scenarii de l'embrasement d'une pièce suivant le type d'aération 18

Fig. 6 : Carte des combustibles 19

Fig. 7 : Comportement de la fumée selon le nombre de Reynolds Re (de faible à fort) 20

Fig. 8 : Coupes horizontales des températures pour différentes valeurs du nombre de Reynolds Re et un nombre de Grashof Gr constant 21

Fig. 9 : Déplacement d'une flamme fantôme 22

Fig. 10 : Mécanisme d'une flamme fantôme 22

Fig. 11 : Risque de ruine en chaîne par endommagement des murs de séparation 24

Fig. 12 : Les principaux risques aux personnes (usagers, pompiers) des feux de tunnel 25

Fig. 13 : Comportement des fumées en l'absence de pente et de courant d'air 26

Fig. 14 : Effet de la ventilation sur le développement des fumées dans un tunnel en pente 26

Fig. 15 : Emploi de la ventilation en cas d'incendie 28

Fig. 16 : Exemple de simulation 2D avec maillage adaptatif 31

Fig. 17 : Calcul du flux radiatif sur le bâtiment cible 32

Fig. 18 : Contribution d'un balcon à la dispersion des fumées 32

Fig. 19 : Probabilité W_{ij} de propagation du feu d'une cellule à l'autre par vent d'ouest 34

Fig. 20 : Exemple de probabilité de progression du feu en trois heures, sans vent 34

Fig. 21 : Une usine pétrochimique, un modèle de complexité 36

1] Introduction

Le feu est un phénomène connu depuis des centaines de milliers d'années et si l'homme semble en maîtriser l'usage, il lui arrive aussi de ne pas réussir à le contrôler. Et malgré de très nombreuses études, le fonctionnement physico-chimique du feu n'est pas complètement élucidé. Cette complexité se retrouve alors tout naturellement dans les simulations de propagation d'incendie et, inversement, celles-ci ont permis de mieux comprendre certains phénomènes. Mais ces expériences ont aussi montré la grande sensibilité du feu aux conditions initiales et extérieures. Ainsi, avant de se concentrer sur les simulations en milieu urbain, il est indispensable de connaître les modes de fonctionnement de sa propagation et de s'intéresser aux premières ébauches de simulation en forêt. En effet, nombre de résultats ont ensuite été repris, adaptés et ont permis de donner les bases aux applications en milieu intérieur puis urbain.

Du côté des physiciens, les modèles retenus se basent sur les écoulements turbulents et les équations différentielles de Navier-Stokes. La résolution complète de celles-ci n'est pour l'heure pas envisageable, les tentatives de simplification n'ayant pu aboutir à une utilisation avec des temps de calcul raisonnables. Pour obtenir des résultats exploitables, chaque simulation est aussi contrainte par la situation, un incendie dans une pièce ne se développant pas de la même manière que dans un tunnel ou même un hangar. Concernant la prévision de la propagation, l'approche est encore plus délicate puisque de nombreuses données sont peu ou pas connues avant prise de feu (géométrie complète des lieux, disposition, quantité des matériaux, présence, taille des ouvertures, etc.). Enfin, les phénomènes à considérer sont nombreux et souvent complexes.

2] Généralités sur l'incendie :

2.1] La combustion :

La combustion est un phénomène physico-chimique basé sur la réaction d'un combustible avec un comburant, généralement l'oxygène (présent à 21% dans l'air). Pour que la réaction ait lieu, il faut qu'une certaine quantité d'énergie, appelée énergie d'activation, soit apportée. De plus, les concentrations de comburant et de combustible doivent être comprises entre les limites inférieure et supérieure d'inflammabilité. Ce principe est très souvent représenté par le triangle du feu (Fig. 1 : Le triangle du feu)

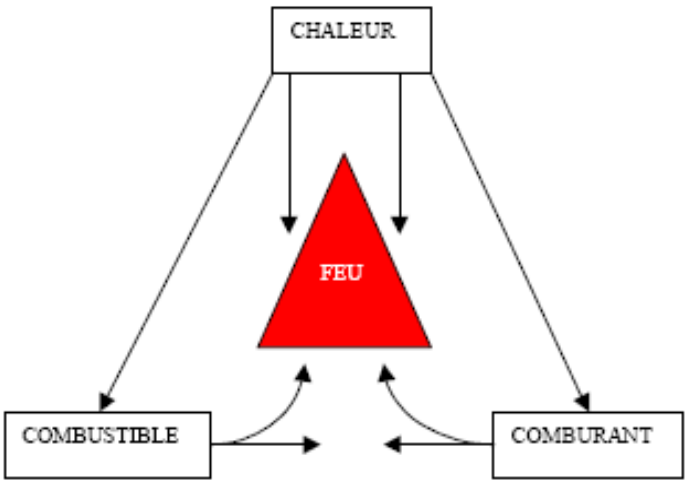


Fig. 1 : Le triangle du feu

2.2] La propagation du feu :

Le feu est caractérisé par l'énergie qu'il dégage par rapport au temps (HRR : Heat Release Rate), exprimée en Watts (J/s), ce qui induit un dégagement de chaleur.

L'énergie peut se propager selon quatre modes :

- La radiation, émission d'ondes électromagnétiques. C'est le phénomène prédominant dès lors que la température dépasse 400 °C.
- La conduction, transport de l'énergie par les mouvements de fluides. La turbulence peut être décrite par les équations de Navier-Stockes.

- La convection, transfert de chaleur par les solides (plafond, murs, etc.)
- Les brandons, petites flammes qui se dégagent du foyer.

La consommation d'oxygène et la création de chaleur engendrent d'autres phénomènes dont un écoulement au dessus du foyer : le panache. Par la force d'Archimède, les gaz chauds s'élèvent et il se forme un mouvement d'air qui alimente le feu en air frais.

En milieu intérieur, deux autres phénomènes, que craignent souvent les forces d'intervention, peuvent se produire : l'embrasement total d'une pièce ventilée (flashover) et l'explosion suite à un retour de flamme (backdraft). Cela se produit dans des conditions spécifiques où un grand nombre de caractéristiques (souvent inconnues avant la prise de feu) entrent en compte. Il est ainsi délicat de prévoir si une explosion va avoir lieu ou quand une pièce va passer au stade de l'embrasement complet.

3] Une première approche, les modèles de feux de forêt :

Les feux de forêt sont des phénomènes naturels contre lesquels les hommes se sont de tout temps mobilisés puis qu'ils ont essayé de maîtriser pour l'agriculture et l'élevage. Chaque année, les feux de forêt détruisent plusieurs millions d'hectares dans le monde, dont plusieurs centaines de milliers en Europe et plusieurs dizaines de milliers en France.

Le nombre conséquent d'exemples de feux de forêt a permis l'émergence de plusieurs modèles de propagation d'incendies depuis les années 1960. Ils peuvent se classer en quatre grandes catégories : statistiques, semi-empiriques, thermiques et multiphasiques. Ces différentes approches ont non seulement permis des prédictions relativement correctes du développement de feux de forêt mais ont aussi bénéficié à la construction des modèles de propagation d'incendies dans d'autres environnements (intérieur, urbain, etc.).

3.1] Les modèles statistiques :

Devant la complexité des phénomènes physico-chimiques relatifs à la propagation d'un front de flammes dans le cas d'un incendie de forêt, les premiers travaux de simulation ont été fondés sur des analyses statistiques. Il s'agissait, à partir d'un grand nombre d'observations sur des feux tests, d'exprimer la vitesse de propagation du front en fonction de différents paramètres (charge et humidité du combustible, vitesse et direction du vent, inclinaison de la pente, température de la flamme, etc.) sélectionnés préalablement.

Ces modèles se sont très vite révélés limités par le manque de support physique et les résultats obtenus n'ont pu être satisfaisant que dans des cas très précis où des feux de forêt se produisent dans des conditions voisines, voire identiques, de celles qui ont procédé à leur élaboration.

3.2] Les modèles semi-empiriques :

La limitation des modèles statistiques a amené Rothermel en 1972 [ROT72] à proposer un nouveau code de calcul pour la simulation de la propagation d'un front de feu : BEHAVE, utilisé dans des logiciels comme FARSITE (Fire Area Simulator). Ce code est basé sur un modèle semi-empirique utilisant la relation établie par Frandsen en 1971, selon laquelle la vitesse de propagation V du front de feu est reliée au flux thermique F nécessaire à cet avancement, à la masse volumique ρ du combustible et à l'enthalpie H nécessaire pour amener le combustible de la température ambiante à la température d'inflammation. Dans cette relation, $V = F / \rho H$, le terme F est relié à la chaleur de réaction de combustion. La

dépendance fonctionnelle de ces trois derniers termes a été déduite d'expériences menées en laboratoire.

Ce modèle est cependant limité par des hypothèses et suppositions très restrictives mais il a permis d'obtenir des résultats encourageants et il figure comme une base de nombreuses simulations, aussi bien en milieu extérieur qu'intérieur.

3.3] Les modèles thermiques :

En parallèle au développement des deux modèles précédant, une approche alternative, plus proche de la physique, apparaît. Elle s'appuie sur une analyse des transferts thermiques entre la zone de combustion et le combustible non brûlé. En 1964, Emmons propose un modèle basé sur une équation de bilan thermique prenant en compte le rayonnement des braises. Plusieurs auteurs s'engagent alors dans cette démarche et ajoutent la prise en compte, de manière plus ou moins simplifiée, de différents phénomènes thermiques décrivant la propagation du front de flammes. Par exemple, De Mestre, en 1989, utilise un volume de contrôle pour effectuer le bilan d'énergie limité à la partie supérieure de la strate de combustible et il postule une forme de front de flammes linéaire avec un angle fixe par rapport à la verticale. Les modèles physiques permettent le calcul de la vitesse de propagation du feu dès lors que l'on détermine les grandeurs thermophysiques caractéristiques du lit de braise, de la flamme et des gaz chauds, généralement construites par une série de confrontations entre théorie et expérience.

3.4] Les modèles multiphasiques :

Les modèles multiphasiques tentent de décrire le plus complètement possible les phénomènes de base qui induisent l'inflammation et la propagation du feu. Les transferts thermiques au niveau de la flamme, des braises et des gaz chauds sont calculés à partir des propriétés intrinsèques du combustible et du milieu environnant. En 1980, Albini propose un modèle de flamme prenant en compte ces mécanismes de base puis Grishin, en 1986, utilise une approche diphasique avec une phase gazeuse et une phase solide à plusieurs constituants. Enfin, en 1995, Larini propose un modèle multiphasique décrivant le comportement d'une phase gazeuse et de plusieurs phases solides. D'un point de vue schématique, cette approche tend à décrire de la manière la plus fidèle possible les différents mécanismes intervenant au cours de la propagation du feu (réactions chimiques en phase gazeuse, combustion de surface du charbon de bois, transferts turbulents, etc.). Elle comprend en particulier une description fine des mécanismes de dégradation (par séchage, pyrolyse et combustion de surface) des éléments combustibles situés en amont du front de flammes ainsi que les transferts d'énergie

par rayonnement et convection en provenance de la flamme (particules de suie et gaz chauds) et des braises. Les résultats obtenus ont permis de valider cette approche.

3.5] Exemples de simulation de feux de forêt :

De part la simplicité et l'importance qu'a pris le modèle semi-empirique de Rothermel en 1972, à la base de très nombreuses simulations, il importe de décrire brièvement son fonctionnement.

En premier lieu, différentes hypothèses sont formulées :

- Le feu est décrit au niveau du front, supposé linéaire et infini.
- Le combustible est uniforme (une couche d'un seul type de combustible ou d'un mélange homogène).
- Un régime de propagation uniforme est atteint (ni pente, ni vent).
- Le transport des particules solides n'est pas envisagé.

Ensuite, des caractéristiques concernant le combustible sont supposées connues :

- Propriétés physiques et chimiques.
- Taux d'humidité.
- Epaisseur, charge sèche, etc.

Enfin, grâce à des calculs intermédiaires, le modèle permet de prédire la vitesse de propagation, les temps de résidence du feu, la profondeur de la zone en combustion vive et le dégagement énergétique. Le mécanisme de calcul repose sur des résultats d'expérimentations en laboratoire et sur bancs d'essai.

Bien que l'applicabilité de ce modèle soit très restrictive, des résultats encourageants ont été obtenus et ont permis par extension le développement de nouvelles approches, comme la prise en compte de combustibles non uniformes (Frandsen et Andrews, 1979), de conditions non stationnaires (Albini, 1982) ou l'extension aux strates arbustives (Brown, 1982).

Les automates cellulaires se prêtent particulièrement bien aux simulations de feux de forêt. Par exemple, Berjack et Hearn [BER01] ont proposé d'appliquer le modèle de Rothermel à des automates cellulaires pour simuler des feux de savane, milieu hétérogène. L'environnement est représenté par une matrice de cellules carrées de dix mètres de côté. Chacune d'elle est caractérisée par son altitude, son taux d'humidité, les combustibles qu'elle contient et possède un état : la cellule est "non brûlée" tant que la chaleur nécessaire à

l'embrasement n'est pas atteinte, puis "en train de brûler" pendant la combustion et enfin "brûlée" lorsque le feu s'éteint.

Pour prendre en compte l'hétérogénéité de la savane, treize types de combustibles ont été retenus pour modéliser l'environnement. La fonction de propagation d'une cellule à une autre est dépendante de la pente, de la vitesse et de la direction du vent. En effet, Luke et Mc Arthur, on montré en 1978 que la pente a une influence considérable sur le taux de propagation d'un incendie de forêt. Si un feu brûle en bas d'un talus, l'angle entre les flammes et le combustible non brûlé est réduite, ce qui conduit à une augmentation du degré de préchauffage du comburant et entraîne une augmentation du taux de propagation. Inversement, l'augmentation de l'angle lorsqu'un feu se propage vers le bas d'une pente permet une diminution du transfert de chaleur par rayonnement et réduit le taux de propagation.

En 1981, Cheney a proposé une relation générale entre la pente et le taux de propagation. C'est celle-ci qui a été utilisée ici, prolongée de manière similaire pour la prise en compte du vent. A bien des égards, l'effet du vent sur le taux de propagation du feu est analogue à celui des pentes puisque les deux affectent l'angle entre les flammes et le combustible non brûlé.

Des essais ont été effectués sur des paysages homogènes puis hétérogènes en faisant varier les caractéristiques de vent et de pente. Enfin, une étude comparative avec trois exemples d'incendies réels. Ce modèle a réussi à produire des simulations avec plus de 80% de correspondance, ce qui peut sembler relativement correct mais il est important de noter qu'une seule erreur d'appréciation peut être très lourde de conséquences, aussi bien au niveau humain, matériel qu'écologique.

D'autres études ont porté sur des milieux forestiers particuliers, comme la garrigue méditerranéenne [MOR03] ou sur des strates arbustives [ZHO05] avec des approches multiphasiques considérant des phénomènes de plus en plus complexes.

Le modèle représentant la garrigue se limite à une division en deux espèces de combustibles : arbustive (chêne kermès) et herbacée (brachypode rameux), caractéristiques de la végétation sur sol calcaire.

La décomposition du terrain en aval du front de combustion est modélisée comme une succession de phénomènes à seuil de température. Le principal apport de ce modèle est la prise en compte des effets de turbulence par un calcul moyenné des équations de conservation en phase gazeuse (moyenne de Favre) (Fig. 2). L'influence des fluctuations sur le comportement du système est représentée à partir d'un modèle de viscosité turbulente basé sur la résolution des deux équations de transport (modèle k-ε RNG dérivé de la théorie des groupes de renormalisation (Yakhot, 1986)). Les transferts radiatifs sont calculés par une méthode d'ordonnées discrètes qui intègre la contribution des particules de suie présentes dans la flamme et des particules incandescentes (braises) présentes au niveau du foyer.

L'évolution de la vitesse de propagation, ROS (Rate Of Spread) rapportée à la vitesse du vent U_H est décrite en fonction du nombre de Froude $F_R = U_H^2 / (g H_f)$ construit à partir de la hauteur de flamme H_f et de l'accélération gravitationnelle g.

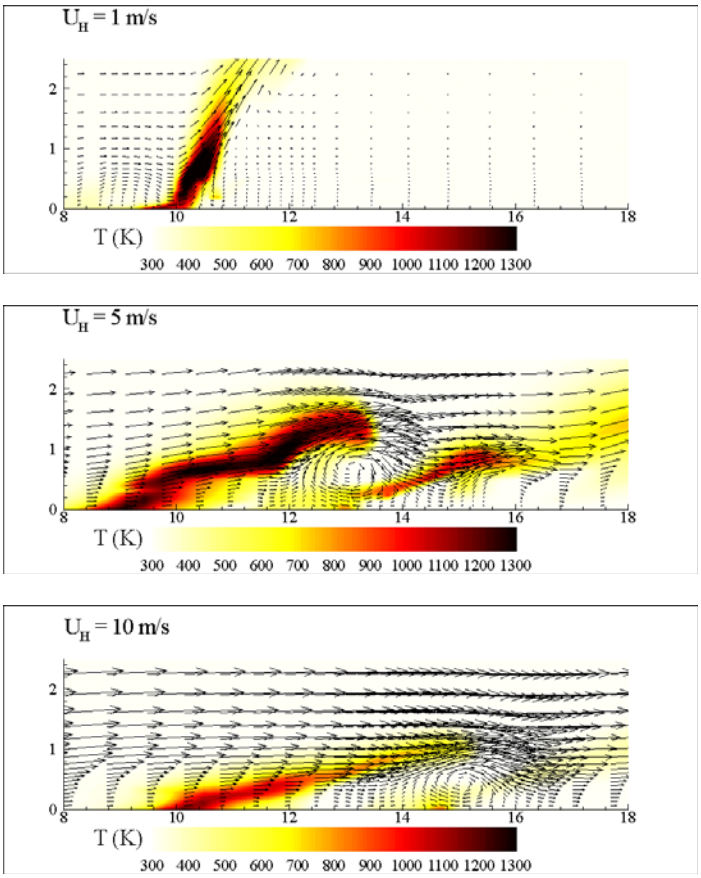


Fig. 2: Champ de température (gaz) et vecteurs vitesse calculés au cours de la propagation d'un feu de surface à travers une garrigue Méditerranéenne (résultats obtenus pour trois vitesses de vent relevées à 2 m au dessus du sol. U_H = 1; 5 et 10 m/s).

Les résultats sur terrain plat ont mis en évidence l'existence de deux régimes de propagation qui dépendent des conditions de vent rencontrées au cours de l'incendie. Pour un nombre de Froude $F_R > 6$, ROS / U_H tend vers une limite finie proche de 3%, correspondant à celle obtenu par le modèle empirique de Valabre et utilisée par les pompiers dans le sud-est de la France. Dans ce cas, la propagation du feu est essentiellement dirigée par le vent qui pousse les gaz chauds vers la végétation située en aval du front. La propagation de l'incendie est alors principalement assurée par transferts convectifs.

Pour un faible nombre de Froude, l'influence du vent est moins prédominante et le panache qui se forme au dessus de la zone de feu empêche les gaz chauds de venir préchauffer la végétation située en aval du front. Dans ce cas, une grande partie de la propagation de l'incendie est assurée par transferts radiatifs.

D'autres études se sont intéressées au développement du feu dans d'autres types de végétation, comme Zhou, Mahalingam et Weise en 2005 [ZHO05] sur des collines de chaparral (type particulier de maquis présent en Californie et au Mexique). L'intérêt de cette approche est la mise en évidence des phénomènes les plus significatifs dans l'évolution de ces feux de forêt. La modélisation est réalisée en deux dimensions et les paramètres des équations physiques sont obtenus par le biais d'expérimentations. Une différenciation est faite sur deux types de combustibles : les branches et le feuillage. Le vent est pris en considération et le modèle montre les déplacements de l'air autour de la flamme. Les résultats sont satisfaisants dans la mesure où la propagation est conforme à des incendies observés bien qu'il soit impossible de confronter quantitativement de manière directe les différentes valeurs (vélocité, température, etc.).

Enfin, récemment, des études ont porté sur des simplifications des modèles physiques afin de rendre possible des simulations en temps réel tout en conservant la prise en charge du maximum de phénomènes physiques [FER07]. Dans la plupart de ces modèles, les deux phénomènes considérés sont la conservation de l'énergie et le transfert radiatif. Ils prennent également en considération l'humidité et le vent, mais la résolution des équations demande des temps de calcul énormes. Ici, la convection, la réaction et la diffusion ont été estimées par un calcul de moyennes sur des modèles simplifiés. Les résultats obtenus sont corrects dès lors que le vent n'entre pas en jeu.

En marge de ces simulations, une approche originale a été proposée par Achtemeier en 2003, les "Rabbit rules" [ACH03]. Basé sur des automates cellulaires, les règles qui permettent de représenter l'avancée du front de flamme sont modélisées par des lapins qui mangent, se déplacent et meurent. En augmentant la complexité des lois par raffinements, l'auteur aboutit à une simulation qui prend en compte le vent, la topographie et les type de combustibles. Des résultats crédibles sont obtenus, ce qui offre la possibilité de créer des modèles utilisables en temps réel basés sur des règles simples.

4] Les modèles de simulation de feu en milieu urbain :

Il existe plusieurs types de modèles de simulation d'incendie qui peuvent généralement s'insérer dans une des trois grandes familles de modèles : analytique, par zones et par champs.

4.1] Les modèles analytiques :

Les modèles analytiques se basent sur les lois physiques qui régissent le comportement du feu (approche directe) ainsi que sur des données expérimentales. Ils peuvent prendre différentes formes et paramètres et définissent de manière particulière les incendies dans des cas précis. Le choix des éléments et phénomènes à prendre en considération dépend autant du but recherché (analyse de l'évolution du flux thermique, du champ radiatif, du comportement de la fumée, de la composition en éléments toxiques, etc.) que de la disponibilité des données relatives aux expériences, qui doivent être les plus nombreuses possibles. Enfin, ce type de modèle peut s'appliquer à la compréhension d'un phénomène physique (par exemple les flammes fantômes [BER02]) ou chercher à prévoir l'évolution d'un feu dans un cadre particulier. Cette approche nécessite généralement beaucoup de ressources matérielles puisqu'elle se propose de résoudre directement des équations complexes comme celles régissant les écoulements turbulents. Des simplifications sont souvent nécessaires pour aboutir à un compromis entre approximation et temps de calcul.

4.2] Les codes par zones :

Les modèles par zones sont spécifiquement dédiés aux feux en intérieur, décomposant l'espace en une ou plusieurs zones (généralement deux) approximativement homogènes en température, composition chimique et densité optique. La couche supérieure ou zone chaude représente les fumées et la couche inférieure l'air frais. Cette réduction permet des calculs relativement simples et peu coûteux en ressources mais ne peuvent s'appliquer qu'à des volumes faibles. Pour de plus grands espaces, avec un découpage adapté au lieu, il est possible d'obtenir une approximation rapide de l'évolution d'un incendie. Malheureusement, ces simplifications n'apportent qu'une vision très restrictive du comportement réel du feu et les résultats divergent souvent des expérimentations. Par exemple, la stratification des fumées ne peut être représentée et il est délicat d'estimer le moment exact de l'embrasement total (flashover) d'une salle. Le moteur qui fait référence dans le milieu scientifique est l'application CFAST, développée par NIST (National Institute of Standards and Technology) qui a été adaptée pour des besoins spécifique comme pour l'avancée d'un front de fumée avec TUFISI [ALT97] ou en représentant trois couches avec FASIT [CHA94] mais ces deux dernières applications offrent des résultats contestables et difficiles à utiliser.

4.3] Les modèles par champs :

Les modèles par champs, ou CFD (Computational Fluid Dynamics), plus proches de la définition physique du comportement du feu, tentent de résoudre de façon approchée les équations différentielles fondamentales de la mécanique des fluides (Navier-Stockes) en se basant sur un maillage tridimensionnel de l'espace. Ils peuvent ainsi s'appliquer aussi bien en intérieur qu'en extérieur mais nécessitent une connaissance précise des éléments entrant en jeu. Cependant, les calculs nécessaires sont très importants et si une représentation crédible du développement d'un incendie est possible, elle demande un temps de calcul très élevé (de l'ordre de plusieurs heures pour quelques minutes de simulation). Cette méthode n'est donc adaptée ni aux grands espaces, ni à l'étude de plusieurs scenarii. De plus, sa complexité demande des connaissances en mécanique des fluides et en transfert de chaleur mais permet l'utilisation de sous-modèles de turbulence, de transfert thermique ou de combustion. L'application qui fait référence dans le domaine est FDS (Fire Dynamics Simulator) mais il existe des raffinements, comme LES (Large Eddy Simulation) où un maillage adaptatif limite le nombre de calculs tout en conservant une approximation aussi fidèle que possible. Ou encore la méthode directe DNS (Direct Numerical Simulation) où la viscosité turbulente n'est pas modélisée mais calculée directement, ce qui pose deux nouveaux problèmes : le modèle de combustion et des temps de calculs encore plus importants [CRE00].

4.4] Autres modèles :

Outre ces modèles et leurs dérivés, il existe d'autres alternatives pour simuler la propagation d'un feu. Un exemple est donné par l'utilisation d'automates cellulaires. Au départ plus adapté aux feux de forêt [KAR97], des expérimentations ont été faites sur la propagation d'incendie en milieu urbain [OHG07]. Chaque cellule pouvant prendre plusieurs états (de l'inflammation à l'extinction, pouvant ou non propager le feu, ininflammable), la simulation est réalisée sur une période pouvant atteindre trois heures. Plusieurs dizaines d'essais sont ensuite nécessaires pour obtenir une probabilité d'expansion de l'incendie au cours du temps. Cependant, les résultats ne sont obtenus qu'après un temps de calcul non négligeable qui ne permet pas de les rendre utilisables par les services de secours mais peuvent malgré tout aider au choix de l'emplacement de bornes anti-incendie afin d'éviter les sinistres les plus importants. L'idée d'utiliser des statistiques a été reprise par Carvel [CAR01] pour estimer l'énergie thermique dégagée dans des incendies en tunnel routier (théorie de Bayes). Enfin, une approche par L-Systems [ZAN03] a été conçue dans le cadre de feux en bâtiment fermé. L'environnement créé pour cette simulation se divise en cubes et est décrit par des cartes de données (combustible, géométrie, température, humidité, etc.). Le modèle de feu utilisé est un modèle extrêmement simple qui s'inspire de celui développé par Rothermel [ROT72] (adapté aux feux de forêt dans des conditions homogènes). Cependant, les résultats sont loin d'être réalistes.

5] Les simulations en intérieur :

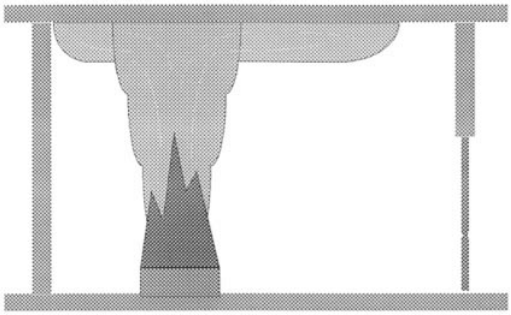
Les incendies en espace intérieur ont pour principale particularité le manque relatif d'apport en comburant (le plus souvent l'oxygène présent dans l'air), avec pour conséquence des comportements difficiles à prévoir. Suivant les cas, le feu peut s'éteindre de lui-même ou alors il peut survenir un flashover (embrasement total d'une pièce quasi-instantanément) lors d'une arrivée d'air frais. D'autres phénomènes plus complexes surviennent dans des conditions particulières comme les ghostflames (flammes fantômes) dont le processus physico-chimique est encore très mal connu [BER02].

Les obstacles à une modélisation correcte d'un incendie en intérieur sont nombreux. Il est nécessaire de connaître la géométrie du milieu, les composants chimiques des combustibles, l'emplacement d'éventuelles aérations avec leur débit, ce qui rarement le cas avant la prise de feu. Deux approches ont été éprouvées : les codes à zones et les codes à champs. Par zone, le milieu est divisé en plusieurs couches supposées homogènes (souvent deux) ce qui, malgré une grande simplification, donne des résultats relativement corrects avec des temps de calcul raisonnables. Les codes à champs permettent quant à eux une représentation plus fidèle des écoulements turbulents mais nécessitent des heures de calcul pour quelques minutes de simulation. Enfin, les tentatives de simplification des calculs pour obtenir des résultats en temps réel n'ont pas réussi à égaler les performances des codes à zones.

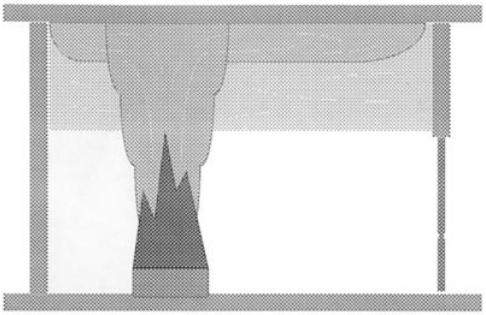
5.1] Feux en milieu clos ou semi-ouvert :

Les premières simulations de feu en intérieur se sont contentées de décrire l'évolution d'un feu dans une seule pièce en utilisant des codes à zones, de par leur simplicité. Pourtant, il existe énormément de phénomènes à prendre en considération. Par exemple, le feu se propage plus rapidement sur les surfaces verticales en milieu intérieur et la présence d'un plafond accélère le processus [MIT95].

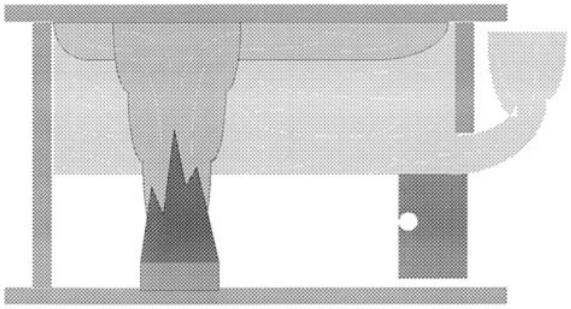
Une description générale de l'évolution d'un feu dans une pièce où la porte est ouverte a été proposée en 1999 [MOW99] par une décomposition en quatre étapes (Fig. 3 : Les quatre étapes d'un incendie en intérieur) : la prise de feu avec l'élévation du panache vers le plafond, l'enfumage de la partie haute de la pièce, jusqu'à l'arrivée des conditions nécessaires pour parvenir à l'embrasement total (flashover) et une augmentation rapide de la chaleur et des fumées.



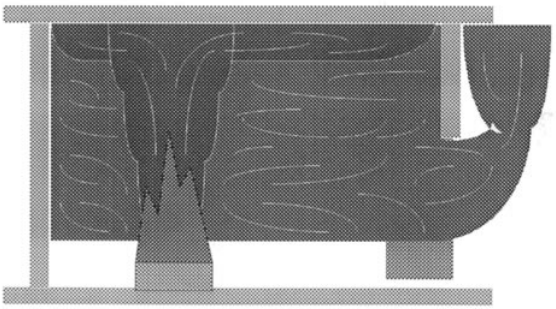
Stage 1. Fire plume/ceiling jet period



Stage 2. Enclosure smoke filling period



Stage 3. Preflashover vented period



Stage 4. Postflashover vented period

Fig. 3 : Les quatre étapes d'un incendie en intérieur

Enfin, le principe de base utilisé par les codes à zones peut être représenté comme suit :

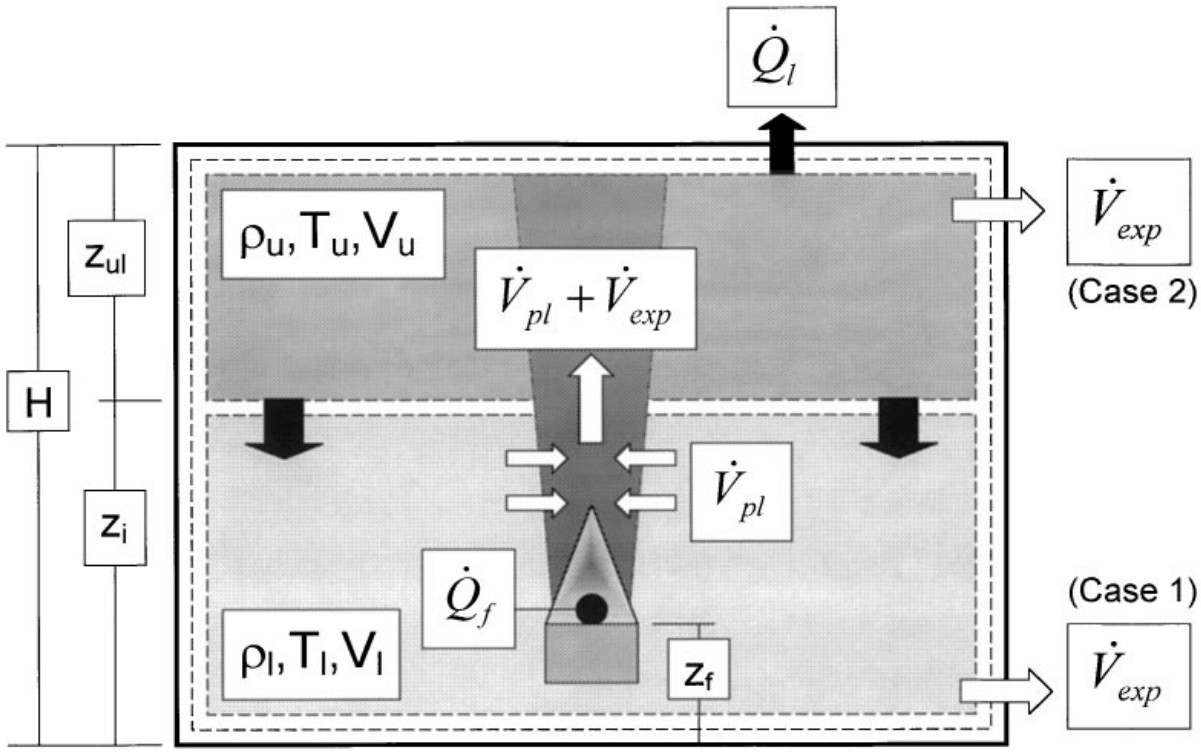


Fig. 4 : Contrôle du volume et terminologie utilisée pour un feu en intérieur.

Avec :

- H, Z : hauteur en m
- T : température en K ou °C
- V : volume en m^3 ou flux volumique en m^3/s
- Q : taux de transfert radiatif en kW (HRR : Heat Release Rate)
- ρ : densité en kg/m^3
- u, ul : couche supérieure
- i, l : couche inférieure
- f : foyer
- pl : panache (plume)
- exp : expansion

En milieu intérieur, l'évolution d'un feu est très fortement liée non seulement au flux d'air mais aussi au type d'aération présente. Des essais ont été réalisés pour des configurations représentatives dans des pièces de trois mètres de hauteur (Fig. 5 : Quatre scenarii de l'embrasement d'une pièce suivant le type d'aération), représentatif de la taille conventionnelle des pièces à usage locatif ou professionnel [QUI02]. De surcroit, dans le cas d'un local complètement fermé, la quantité de chaleur accumulée dans la première partie de la prise de feu se révèle généralement suffisante pour briser une fenêtre et provoquer ainsi une aération.

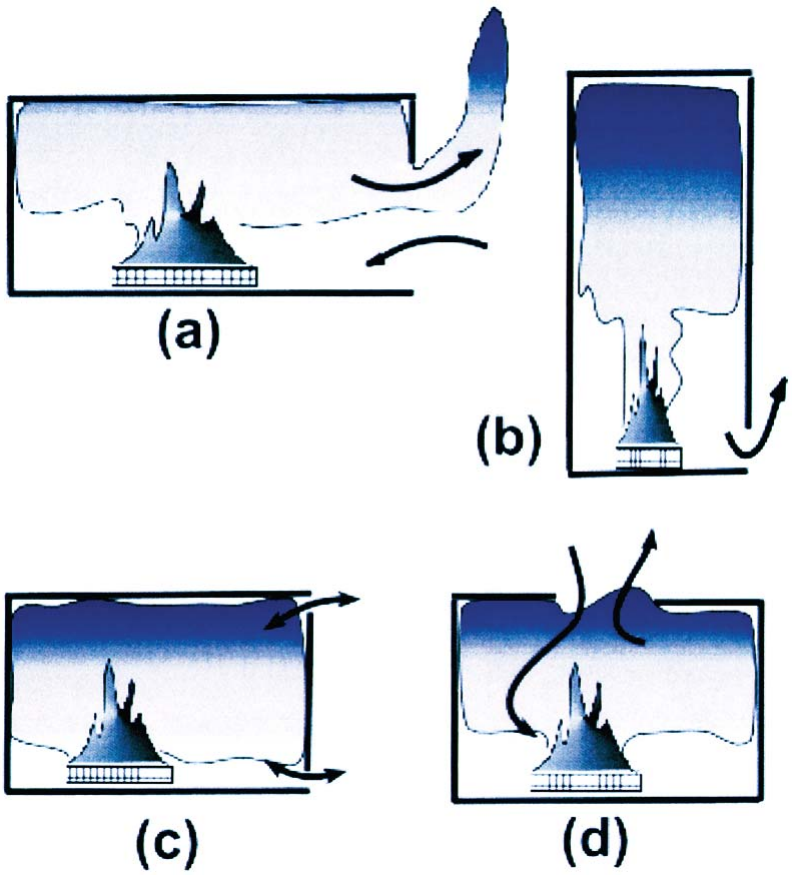


Fig. 5 : Quatre scenarii de l'embrasement d'une pièce suivant le type d'aération

La performance des codes à zones a bénéficié de ces expérimentations et des logiciels comme CFAST ont intégré ces paramètres avant de s'orienter vers l'étude de l'évolution de feux en bâtiment en différenciant les compartiments qui le composent [JON00]. Dans une grande partie des cas d'ingénierie incendie, ces modèles se révèlent suffisant (comme pour l'évacuation d'un immeuble), mais ils montrent leurs limites dans la résolution de structures fines et ne sont plus adaptées pour des situations particulières.

Dans le but d'affiner les résultats des codes à zones, des développements ont été réalisés par expérimentations pour introduire de nouveaux éléments dans la simulation. En effet, les matériaux jouent un rôle prépondérant dans l'évolution des incendies. Il est alors

possible de classer chaque pièce d'un appartement ou d'une maison selon son type pour proposer un modèle générique donnant une idée de l'évolution de son taux de transfert radiatif [SAT06]. Cette classification ne peut être qu'approximative, la quantité et l'emplacement de ces matières étant primordiaux, mais peut permettre d'estimer le temps de propagation dans les premiers stades de la prise de feu.

Outre les codes à zones, des alternatives ont été étudiées pour la simulation de feu en bâtiment. Parmi celles-ci, la plus originale est l'utilisation de L-system (Lindenmayer System) [ZAN03], méthode adaptée à la simulation de phénomènes ayant un grand nombre d'interactions avec leur environnement. Il a été divisé en cubes, décrits par des cartes de données (Fig. 6 : Carte des combustibles) (combustible, géométrie, température, humidité, etc.) mais le modèle de feu est encore à l'heure actuelle extrêmement simple, bien qu'il puisse relativement facilement être modifié. De plus, il est nécessaire de connaître de façon précise l'emplacement et la nature des matériaux et les premiers résultats ne sont pas concluants.

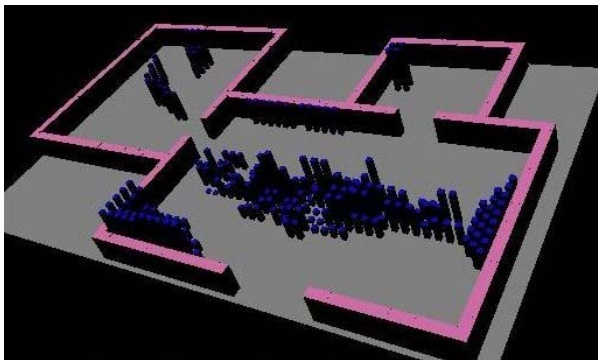


Fig. 6 : Carte des combustibles

Parallèlement à ces recherches, des études ont été menées sur des simulations par codes à champs. La seule méthode valable pour tester la résistance au feu de matériaux composés comme le béton armé reste l'expérimentation. Des tests ont été effectués sur des plaques de béton armé soumises à une pression (pour estimer cette résistance dans des structures similaires en bâtiment) [LIM02]. Malgré la richesse et la complexité des modèles informatiques utilisés, les résultats expérimentaux ne sont pas en accord avec les prévisions. Néanmoins, la simulation permet une sous-estimation de la résistance au matériel, elle peut donc être utile à la conception de bâtiments mais ne peut être appliquée pour des prévisions, d'autant plus que les temps de calculs interdisent une utilisation en temps réel.

Cependant, les codes à champs permettent de modéliser, de manière crédible, l'avancement d'un incendie tout en représentant les fumées. Ils ont donc continué à être développés pour la richesse de leurs simulations. A ce jour, des interfaces ont été proposées

pour simplifier leur mise en œuvre par la prise en charge des modèles à base d'IFC (Industry Foundation Classes) [DIM07], très répandus dans le milieu industriel. Il est alors relativement aisé d'interagir avec l'environnement pour évaluer l'impact de l'ouverture d'une porte par exemple. Néanmoins, il subsiste de nombreuses limitations, ne permettant par exemple la simulation que sur des pièces où les murs sont orthogonaux et les temps de calcul énormes même pour de petites structures.

Enfin, il semble toujours délicat de décrire de manière correcte les différents scenarii possibles selon chaque cas d'étude. Concernant par exemple la diffusion de la fumée en bâtiment dans des espaces verticaux, les études manquent cruellement. Il est possible en effet de déterminer un comportement global basé sur des statistiques (Fig. 7 : Comportement de la fumée selon le nombre de Reynolds Re (de faible à fort)) [MER99], mais il n'est pas envisageable d'obtenir une simulation correcte du phénomène, ni donc d'une prédiction complète, un écart infime pouvant conduire à des comportements très différents. Des expérimentations ont mis à jour la complexité de ce problème (dans les configurations de la Fig. 7 : Comportement de la fumée selon le nombre de Reynolds Re (de faible à fort)) où chaque coupe horizontale des températures est non-uniforme (Fig. 8 : Coupes horizontales des températures pour différentes valeurs du nombre de Reynolds Re et un nombre de Grashof Gr constant.).

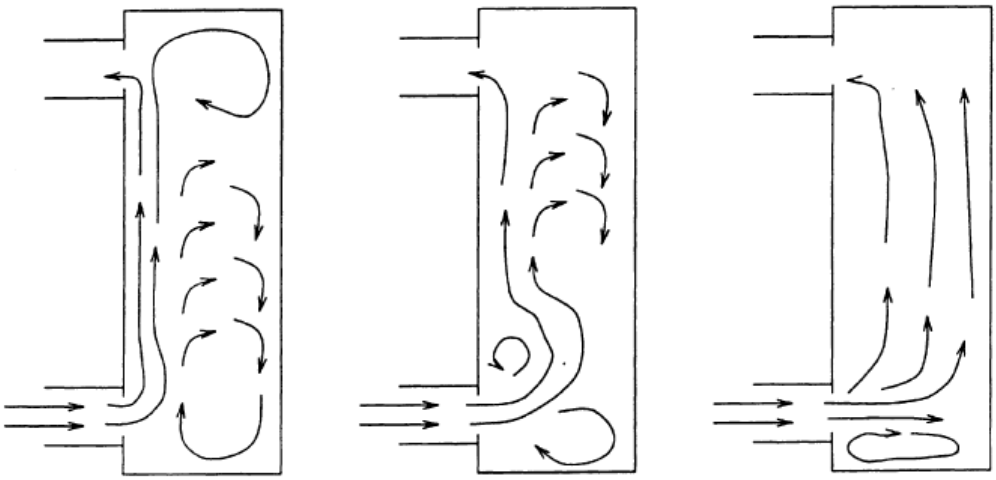


Fig. 7 : Comportement de la fumée selon le nombre de Reynolds Re (de faible à fort)

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il est décrit par la formule $\mathrm{Re} = \frac{V.L}{v}$ avec :

- V la vélocité du fluide d'entrée
- L la dimension caractéristique du phénomène (ici, la hauteur de la bouche d'entrée)
- v la viscosité cinématique du fluide

Pour de faibles[1] valeurs du nombre de Reynolds, l'écoulement est dit laminaire (les éléments voisins restent voisins). Les forces de viscosité sont prédominantes, l'accélération convective négligeable, c'est une situation d'écoulement de Stokes. De plus, l'écoulement est réversible.

Pour des valeurs intermédiaires[1], les forces d'inertie sont dominantes mais l'écoulement reste laminaire. L'écoulement n'est plus réversible.

Pour de fortes[1] valeurs, les forces d'inertie prennent une place primordiale au point que l'écoulement est turbulent.

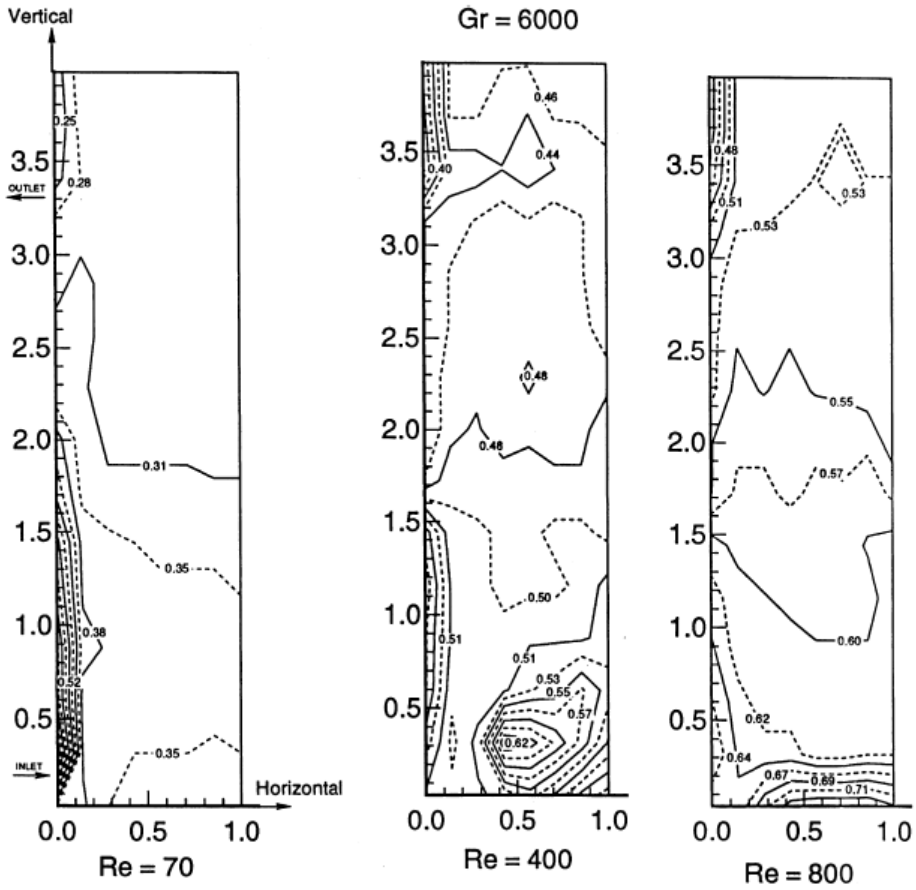
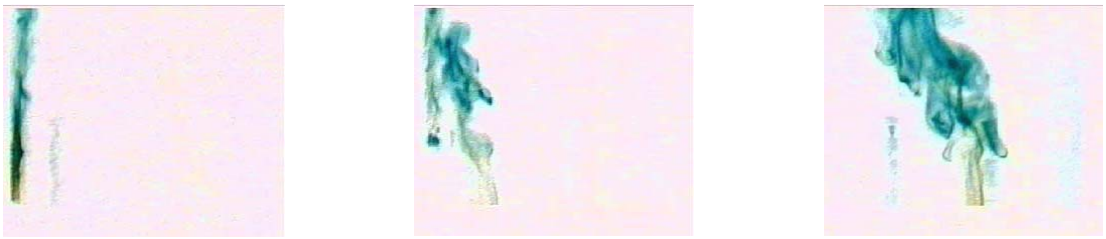


Fig. 8 : Coupes horizontales des températures pour différentes valeurs du nombre de Reynolds Re et un nombre de Grashof[2] Gr constant.

[1] La différenciation entre faible, intermédiaire et fort dépend des conditions géométriques et du choix de la dimension *L* adoptée. En règle générale, on retient 2000 et 3000 comme paliers.

[2] Le nombre de Grashof représente le rapport entre les forces de gravité et les forces de viscosité.

Pour une description du feu en lui-même, il existe des phénomènes complexes dont l'explication physico-chimique n'a pas encore été résolue par les physiciens. C'est le cas des flammes fantômes (ghostflames) [BER02], qui peuvent se produire dans des conditions de confinement particuliers. Plusieurs expérimentations ont été réalisées dans le but de mieux appréhender ce phénomène. Un foyer brûle d'un côté d'une pièce vide ne comportant qu'une petite ouverture en haut du mur opposé afin de réunir des conditions de sous-ventilation. L'air chaud peut ainsi s'échapper mais l'air frais ne peut entrer, la combustion est alors complètement confinée. Dans cette situation, la flamme s'essouffle rapidement par le manque d'apport en oxygène puis se détache de son foyer pour parcourir lentement la pièce et s'approcher de l'ouverture (Fig. 9 : Déplacement d'une flamme fantôme à 8 ; 13,5 et 15 s du confinement, Fig. 10 : Mécanisme d'une flamme fantôme). Le phénomène a une probabilité de se produire proportionnelle à l'augmentation du flux thermique. Mais, lorsqu'il apparaît, il est très difficile de prévoir si la flamme va s'éteindre d'elle-même ou réussir à sortir de l'ouverture, dans quel cas elle se trouvera renforcée et pourra alors propager facilement le feu à l'extérieur.



t = 8 s t = 13,5 s t = 15 s

Fig. 9 : Déplacement d'une flamme fantôme à 8 ; 13,5 et 15 s du confinement

Une fois que la paroi gauche de la pièce est en plein embrasement, la porte est fermée à t = 0 pour entrer en confinement complet. La flamme se déplace alors lentement vers la petite ouverture en haut à droite, sans la présence de combustible au sol.

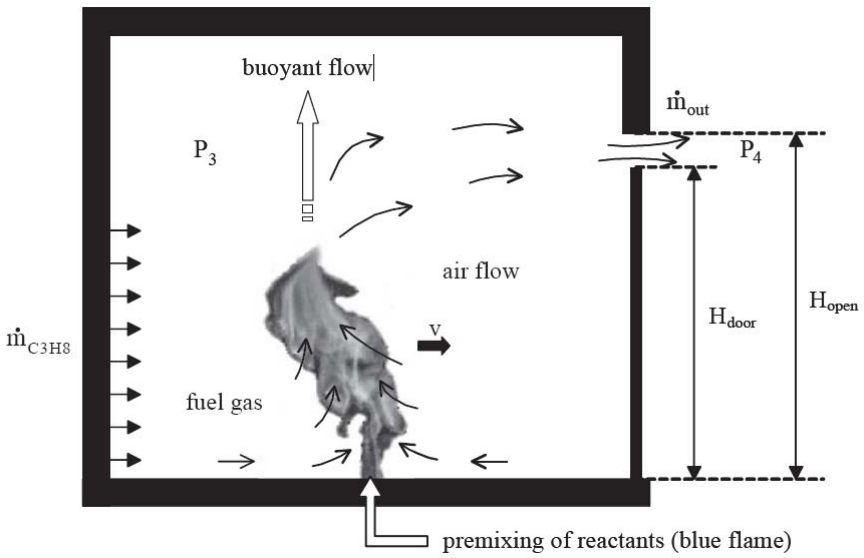


Fig. 10 : Mécanisme d'une flamme fantôme

5.2] Les feux en entrepôt :

Les incendies en entrepôt se caractérisent par leur dimensionnement vis-à-vis des feux en bâtiment. Une conséquence directe est l'apport plus élevé est comburant (oxygène) alors que les fumées disposent de plus d'espace pour se disperser. La diversité des produits présents rend délicat une généralisation de la propagation de ces feux. C'est une des raisons pour lesquelles les informations sur les incendies en entrepôt sont rares et difficilement exploitables (les propriétés physico-chimiques des éléments entrant en jeu devant de plus être obtenus par le biais d'expérimentations [LEF04]). Ainsi, la plupart des études sur ce sujet ont porté sur la résistance au feu des structures et les possibilités d'évacuation du personnel, conduisant au respect de normes de plus en plus contraignantes.

Les codes à zones, traditionnellement utilisés pour les incendies en intérieur ne sont plus adaptés pour des hauteurs de plafond dépassant quatre mètres. A cela s'ajoute le fait que "la plupart des codes ne possèdent pas de modèle de combustion, […] la source est décrite en terme de puissance thermique et de vitesse de combustion." [CRE00]. Pour obtenir ces données nécessaires (limite inférieure d'inflammabilité, propriétés du combustible, concentration des produits de combustion au cours du temps), il faut avoir recours à l'expérimentation. Dans la pratique, il est très difficile d'avoir accès à ces informations. CFAST, le moteur de référence pour les codes à zones, est de plus limité par des contraintes internes. A titre d'exemple, il n'a pas la capacité de décrire certaines ventilations et il est impossible de différencier les matériaux de chaque mur dans une simulation. Une solution consistant à définir un maillage virtuel de l'espace permet néanmoins d'obtenir des approximations exploitables [CRE00] sur la hauteur des fumées et l'estimation de la température.

Les codes à champs sont eux aussi limités pour des raisons similaires, de grands espaces demandant des temps de calculs proportionnels, un maillage adaptatif n'étant pas suffisant pour réduire ces coûts. Une méthode a été spécialement développée pour la simulation des conséquences d'incendies de taille industrielle, la méthode LES (Large Eddy Simulation) [CRE00] qui consiste en des simplifications de la résolution des équations de Navier-Stokes sur un maillage grossier. Une description technique montre cependant que certaines données introduites n'ont pas de justification théorique rigoureuse. Malgré cela, la majorité des résultats reste exploitable bien qu'il subsiste des différences non négligeables entre les données obtenues et l'expérimentation (une étude montre des écarts de prévision de température au plafond de l'ordre de 40% [CRE00] dans l'incendie d'un hangar de quinze mètres de haut). Quels que soient les simplifications apportées, les temps de calcul ne permettent pas une utilisation temps réel ou prévisionnelle. L'intérêt réside ici dans la validation du comportement au feu de la structure d'un entrepôt relativement aux produits stockés.

Plus spécifiquement, un logiciel de calcul thermo-élasto-plastique a été conçu aider à la vérification de la tenue au feu des entrepôts en structure en acier [AYM05] [REN06]. L'arrêté du 5 août 2002, sur la sécurité des personnes (occupants et forces d'intervention) en cas d'incendies, fixe deux critères sur la construction des entrepôts en structure métallique : le non effondrement vers l'extérieur (de la structure) et le non effondrement en chaîne (la ruine d'une cellule ne doit pas entraîner la ruine des cellules adjacentes). Un incendie dans une structure en acier se développe en deux phases : poussée puis traction. L'échauffement des éléments provoque une poussée des murs vers l'extérieur puis, une fois que les éléments de la toiture sont attaqués, les murs sont tirés vers l'intérieur. Ces deux phénomènes provoquent des risques de chutes d'éléments ou d'effondrement d'un mur, mais le respect des normes permet d'éviter les conséquences les plus graves (Fig. 11 : Risque de ruine en chaîne par endommagement des murs de séparation). Ainsi, si les simulations d'incendies en entrepôt en sont toujours à un stade expérimental, l'estimation de la hauteur des fumées et des températures est suffisant pour une aide à l'intervention des services de secours.

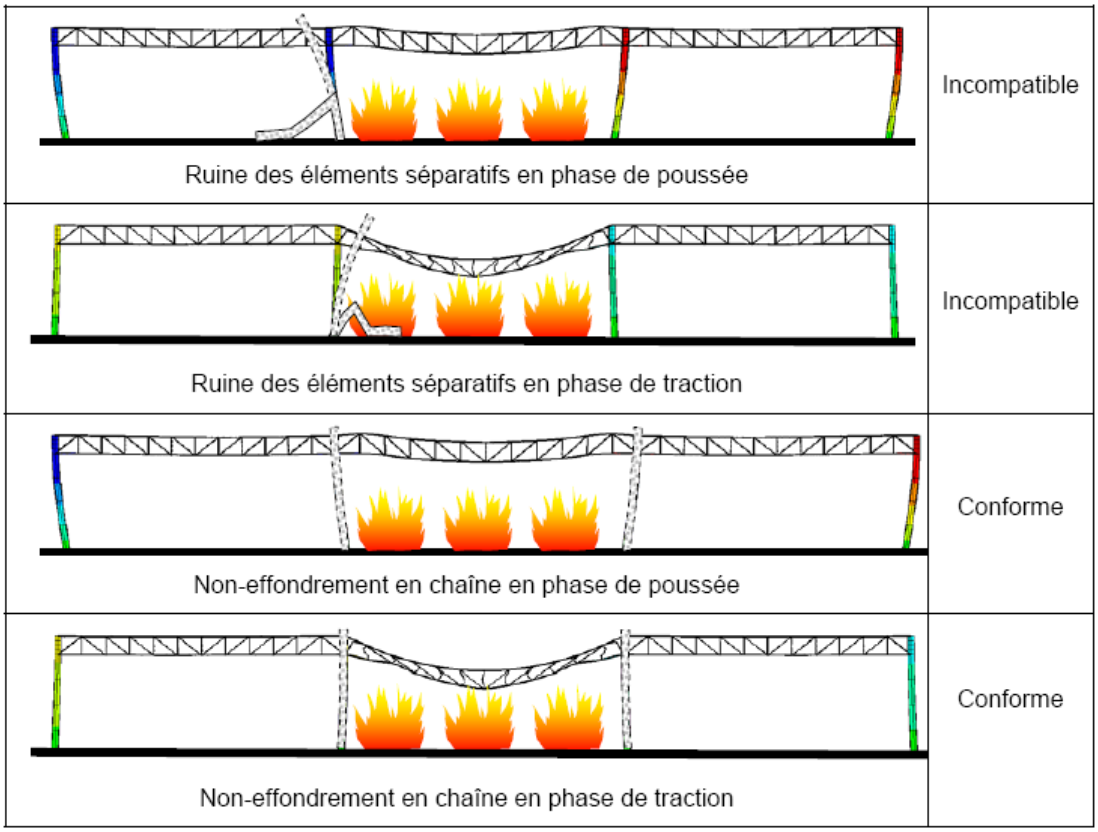


Fig. 11 : Risque de ruine en chaîne par endommagement des murs de séparation

5.3] Les feux de tunnel :

L'étude des feux de tunnel commence à susciter de plus en plus d'intérêt, notamment depuis les sinistres impressionnants survenus dans quelques tunnels (Mont Blanc, métro de Baku, etc.) causant de nombreuses pertes humaines et d'énormes dégâts matériels. Les principaux risques aux personnes (Fig. 12 : Les principaux risques aux personnes (usagers, pompiers) des feux de tunnel) proviennent de la progression des fumées, de la température et de l'effondrement d'éléments du plafond (panneaux, système de ventilation, etc.). Pour garantir l'évacuation correcte des usagers et permettre l'intervention des forces d'intervention anti-incendie, il est nécessaire d'agir sur la ventilation pour contenir le feu et dégager une sortie.

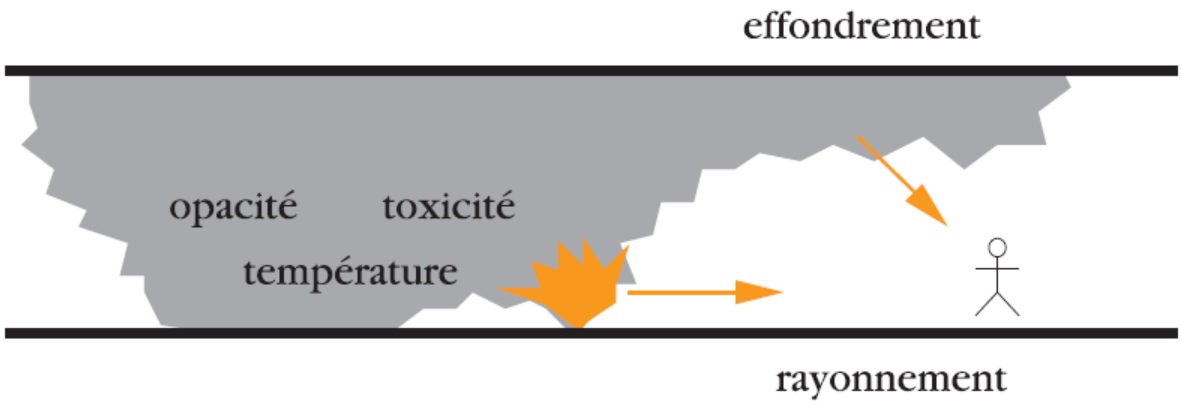


Fig. 12 : Les principaux risques aux personnes (usagers, pompiers) des feux de tunnel

L'ampleur des catastrophes provoquées par les incendies de tunnel a provoqué l'élaboration de rapports contenant des normes à respecter sur la résistance au feu et la ventilation suivant la longueur, l'emplacement, le type d'usage et la densité prévisible du trafic (ministère de l'équipement, des transports, de l'aménagement du territoire, du tourisme et de la mer, direction des routes [CAR05]). Cependant, il n'a pas été prévu de remise aux normes pour les tunnels existants pour deux raisons principales. L'essentiel étant l'évacuation des personnes et des biens, il se trouve que dans la grande majorité des cas, le feu est contrôlé à temps. De plus les coûts d'entretien et de rénovation se révèlent relativement importants. "Les incendies très graves étant extrêmement rares, des dépenses élevées pour s'en protéger ne sont justifiables que si elles permettent d'éviter des conséquences trop importantes" [CAR05].

Pour assurer une évacuation correcte des usagers, il est essentiel de contenir les fumées, principal danger des incendies de tunnel. Lors de la prise de feu, celles-ci se développent rapidement et restent stratifiées aux alentours du foyer. A une certaine distance,

leur refroidissement provoque leur chute et l'air vicié peut alors revenir vers le foyer et la fumée emplir complètement le tunnel (Fig. 13 : Comportement des fumées en l'absence de pente et de courant d'air) [CAR03]. Le réchauffement, l'importante toxicité et l'opacité peuvent alors compromettre la survie des occupants. Pour endiguer ce phénomène, il est nécessaire de calculer la vitesse critique de la ventilation pour contenir les fumées d'un seul côté. Les études dans ce domaine ont montré que non seulement l'aération naturelle et la pente entrent en jeu (Fig. 14 : Effet de la ventilation sur le développement des fumées dans un tunnel en pente). En effet, la forme du tunnel est elle aussi importante. Les travaux réalisés sur des tunnels de forme elliptique [HWA05] ont montré des différences avec les résultats obtenus sur des tunnels de forme rectangulaire [KUN02]. De plus, il a été démontré que la géométrie de la source du feu modifie la valeur critique. Cela confirme que l'expression de Froude (écoulement dans un canal rectangulaire) n'est qu'une approximation. L'inclinaison du tunnel quant à elle, fait varier linéairement la vélocité de la ventilation critique. D'un autre côté, la température ambiante et le type d'essence n'ont qu'une très faible influence sur les résultats.

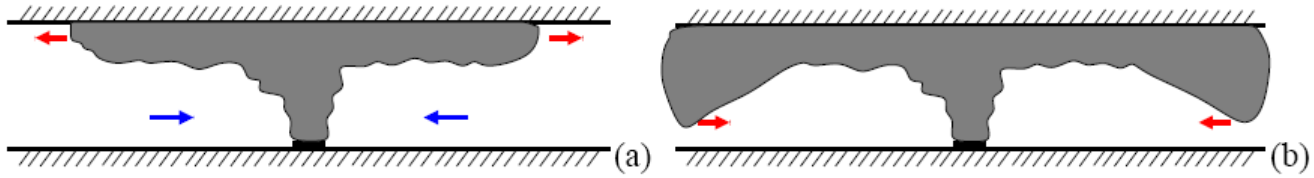


Fig. 13 : Comportement des fumées en l'absence de pente et de courant d'air
(a) Développement initial. (b) Après un certain temps, la fumée redescend.
Remarque : les échelles verticales sont plus dilatées que celles horizontales.

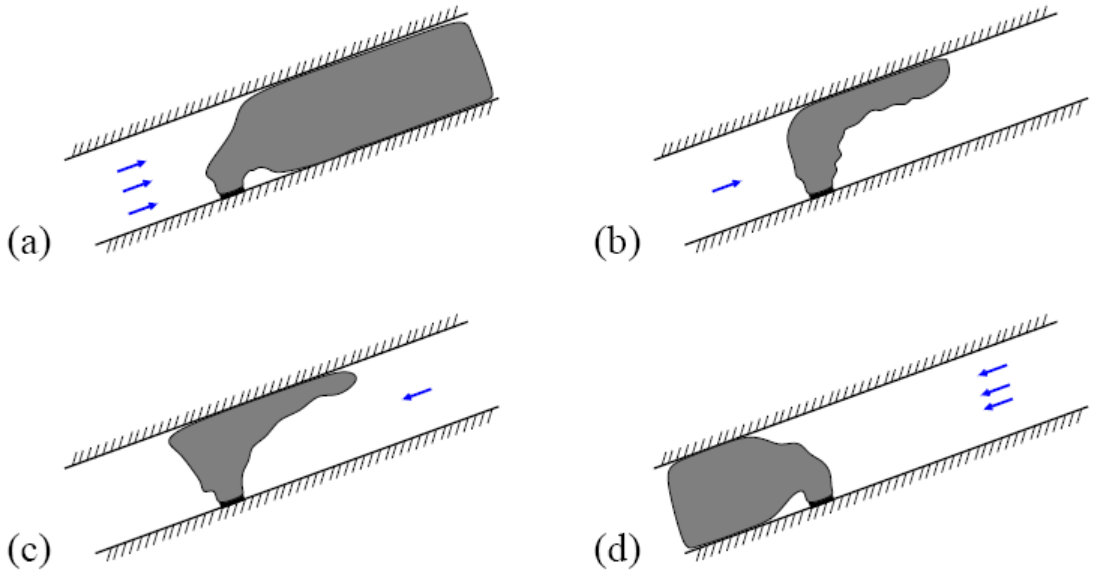


Fig. 14 : Effet de la ventilation sur le développement des fumées dans un tunnel en pente

Si l'élément le plus important d'un tunnel est la ventilation, il en existe quatre types : longitudinale (la masse d'air est poussée par des ventilateurs le long du tunnel), transversale pure (des arrivées d'air au niveau de la chaussée et des sorties au niveau du toit sont disséminées, le débit extrait étant égal au débit insufflé), semi-transversale (pas d'extraction de l'air vicié) et transversale partielle (le débit d'extraction est inférieur au débit d'insufflation). Les ventilations longitudinales sont les plus récentes et les moins coûteuses, cependant, en Europe, on trouve tous les types d'aération dans les tunnels [CAR01]. Suivant le type de tunnel et la situation, deux stratégies sont possibles : tenter de pousser les fumées d'un seul côté ou maintenir une stratification des fumées le temps d'évacuer tout les usagers (tunnel bidirectionnel ou congestionné). Enfin, une extraction des fumées peut être opérée si le tunnel dispose des moyens appropriés (Fig. 15 : Emploi de la ventilation en cas d'incendie. (a) Ventilation longitudinale.).

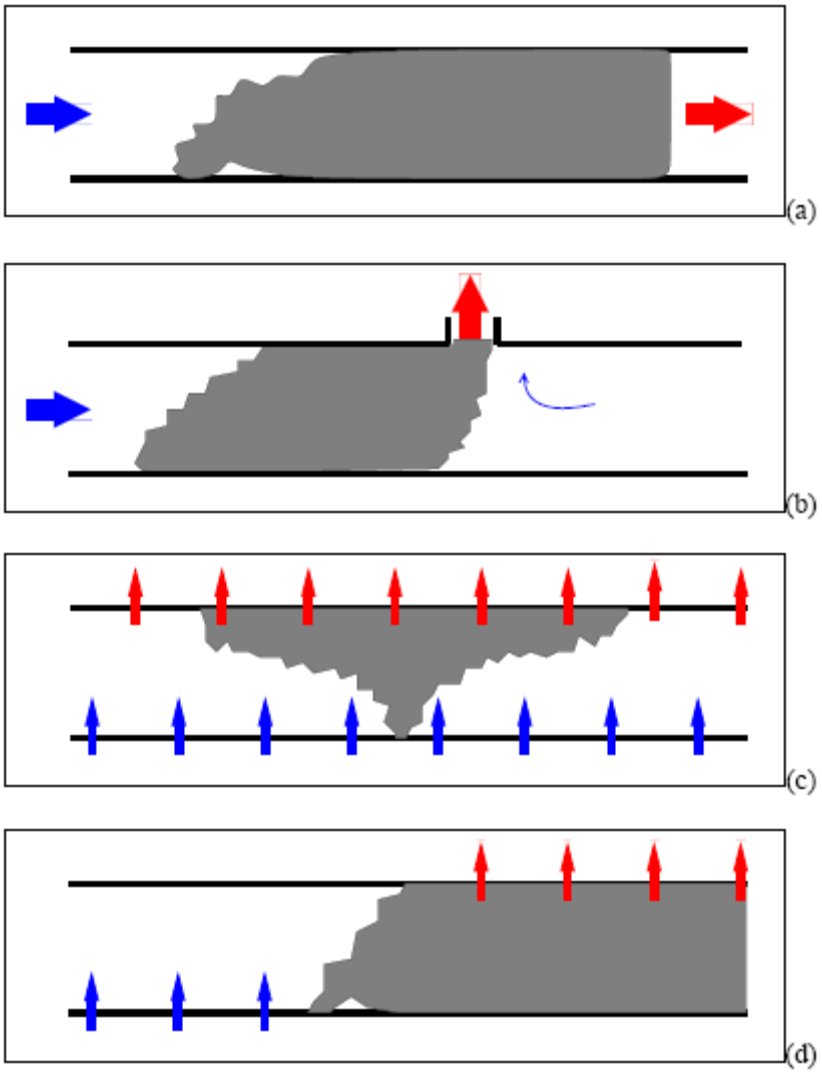


Fig. 15 : Emploi de la ventilation en cas d'incendie. (a) Ventilation longitudinale. (b) Ventilation longitudinale avec extraction massive. (c) Ventilation transversale (pure ou partielle). (d) Ventilation transversale employée en stratégie longitudinale.

Concernant les simulations, la géométrie des tunnels interdit l'utilisation des codes à zones. De plus, de même que pour les autres milieux, il est nécessaire d'effectuer des expérimentations. En effet, les données disponibles sur les incendies de tunnels sont rares, notamment sur les plus importants. Le calcul du taux de transfert radiatif a pu être réalisé par une approche statistique en utilisant la théorie de Bayes [CAR01]. Cependant, le manque de données n'a pu confirmer les résultats. Malgré cela, il ressort que le choix d'une ventilation forcée pour contenir les fumées peut avoir des conséquences dramatiques en multipliant le taux de transfert radiatif par vingt dans les incendies les plus graves (HGV Heavy Goods Vehicle), mais ce choix est en revanche sans effet lorsque le feu ne concerne que des véhicules légers.

Les expérimentations sont relativement difficiles à réaliser en taille réelle puisqu'il faut disposer d'un tunnel destiné spécialement à cette tâche, c'est pourquoi celles-ci sont rares. Trois essais ont cependant réalisés pour estimer les effets de la ventilation [ING05]. Les résultats obtenus admettent de plus un taux d'erreur de l'ordre de 15%, relatif aux appareils de mesure. Mais de par leur faible nombre, ces tests ne suffisent pas pour prédire l'évolution d'un feu en tunnel routier. Cependant, une estimation de la ventilation critique a été rendue possible par l'utilisation de codes à champs, que ce soit par la méthode LES (Large Eddy Simulation) [HWA05] pour les tunnels de forme elliptique, ou par une description précise de la source du foyer [MOS05] qui apporte des résultats satisfaisants bien que des améliorations restent à apporter pour affiner la modélisation des termes diffusifs et prendre en considération les transferts thermiques ainsi que les équipements de ventilation.

6] Les simulations en extérieur :

6.1] Les feux en extérieur :

Les feux en extérieur on fait l'objet d'études de la part du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) pour ce qui concerne les incendies d'origine accidentelle de matières sensibles. A cet égard, des expériences ont été menées sur des produits tels que le kérosène mais la description phénoménologique d'un feu est soumise aux incomplétudes de nos connaissances en la matière. A titre d'exemple, la genèse de la formation de particules de suie est un phénomène non élucidé à l'heure actuelle, aussi bien au niveau chimique que physique [DUC02] (sa description se base généralement sur des constats d'expériences avec peu de plus-value théorique). L'approche expérimentale est cependant inappropriée dans de nombreux cas, notamment pour des questions de coût.

En plus de la difficulté à représenter les suies, les simulations sont limitées par les modèles de représentation de la turbulence. Il existe des modèles élaborées, mais ce n'est qu'à partir de l'observation expérimentale qu'il est possible de lui donner un niveau de complexité acceptable. En revanche, pour le transfert radiatif, des formules issues de la physique théorique sont utilisées. Pour la simulation des écoulements turbulents, la résolution complète des équations d'écoulements de fluides est inenvisageable (équations aux dérivées partielles de Navier-Stockes) de part leur complexité. Une approche alternative consiste à utiliser des moyennes et une décomposition du mouvement dite de Reynolds. Malgré ces simplifications, le nombre de calculs demandé reste énorme et même avec une très bonne architecture matérielle, il n'est pas envisageable d'obtenir une représentation crédible en temps réel. Une simulation numérique peut aussi se résoudre à différentes échelles (Fig. 16 : Exemple de simulation 2D avec maillage adaptatif) pour réduire d'autant le temps machine nécessaire. Cependant, il faut quoi qu'il en soit plusieurs heures de calcul pour quelques minutes de simulation.

Lorsque les besoins de précisions sont moindres, il est possible, à l'aide de formules héritées de la thermophysique, d'estimer les paramètres les plus essentiels des phénomènes liés à un incendie. Par exemple, calculer la masse perdue et l'énergie dégagée d'un bac circulaire contenant un produit particulier (sans autre paramètre connu) permet d'obtenir la hauteur de la flamme et d'estimer de plus la quantité d'eau nécessaire à l'extinction [DIN02].

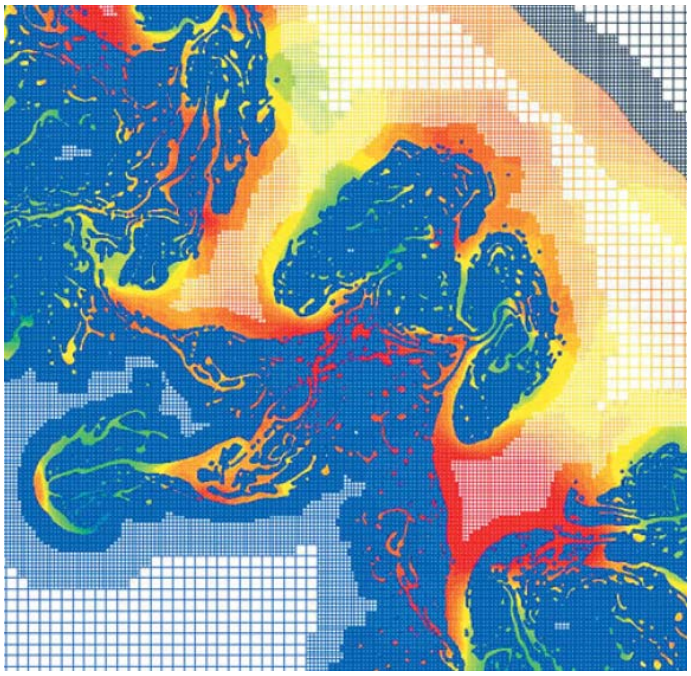


Fig. 16 : Exemple de simulation 2D avec maillage adaptatif

6.2] Les feux entre bâtiments :

De par leur plus grande complexité, les simulations d'incendies en milieu urbain ont connu un développement plus tardif. En effet, l'hétérogénéité des lieux, des matériaux mais aussi et surtout les déplacements d'air forment un ensemble d'éléments qu'il est délicat de modéliser. Les premières ébauches ont tenté de représenter les incendies de grande ampleur au Japon à la suite de catastrophes naturelles comme les tremblements de terre [HIM00] (dans certaines villes du Japon, la majorité des bâtiments ont une structure en bois). Outre les calculs de combustion d'un bâtiment et de l'environnement thermique associé, il convient d'étudier séparément la propagation entre les bâtiments. Pour cela, il est nécessaire d'intégrer les pertes d'énergie dans les murs, les ouvertures (fenêtres) et le vent extérieur. Le calcul du flux radiatif sur le bâtiment cible (Fig. 17 : Calcul du flux radiatif sur le bâtiment cible) prend en compte ces paramètres, mais en l'état actuel, ce modèle n'offre pas de résultat exploitable pour la prévision de la propagation du feu.

Dans le cas de groupes de bâtiments, un autre élément essentiel est à prendre en considération, la diffusion des fumées. Il existe une relation directe entre la géométrie du ou des bâtiments et la progression du feu, notamment en ce qui concerne la propagation des fumées par les balcons (Fig. 18 : Contribution d'un balcon à la dispersion des fumées) [HAR04]. Des simulations, obtenues par codes à champs montrent des résultats similaires sur les niveaux de températures des étages supérieurs à la source de l'incendie. Il est aussi notable que la forme du balcon (incrusté, à ouverture, etc.) ainsi que le matériau de construction ont

une très grande influence sur l'évacuation des fumées et la progression de l'incendie [MAM04]. Afin de valider l'approche par code à champs, des expérimentations ont été menées dans le cadre de la propagation d'incendie d'un bâtiment à un autre. A titre d'exemple, des essais ont été faits sur la résistance de murs coupe feu entre deux éléments se trouvant à seulement 1,8 mètre l'un de l'autre [MAR04]. Ce qui permet de calibrer le modèle FDS (Fire Dynamic System) et de plus de prouver la résistance des matériaux.

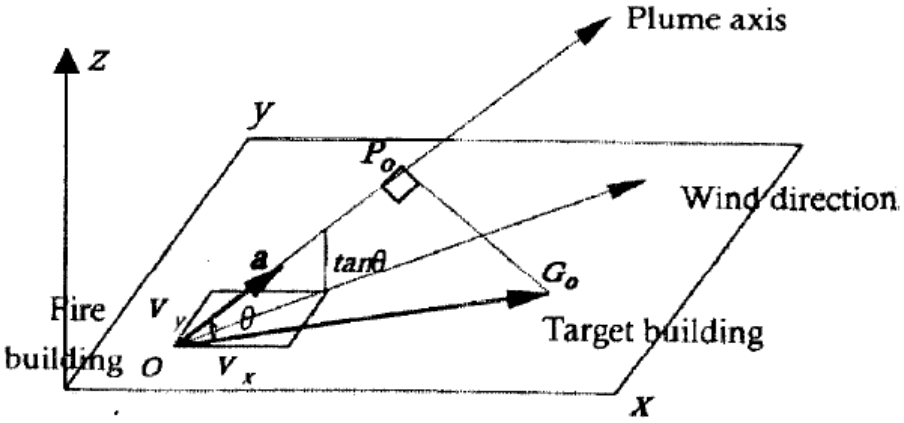


Fig. 17 : Calcul du flux radiatif sur le bâtiment cible

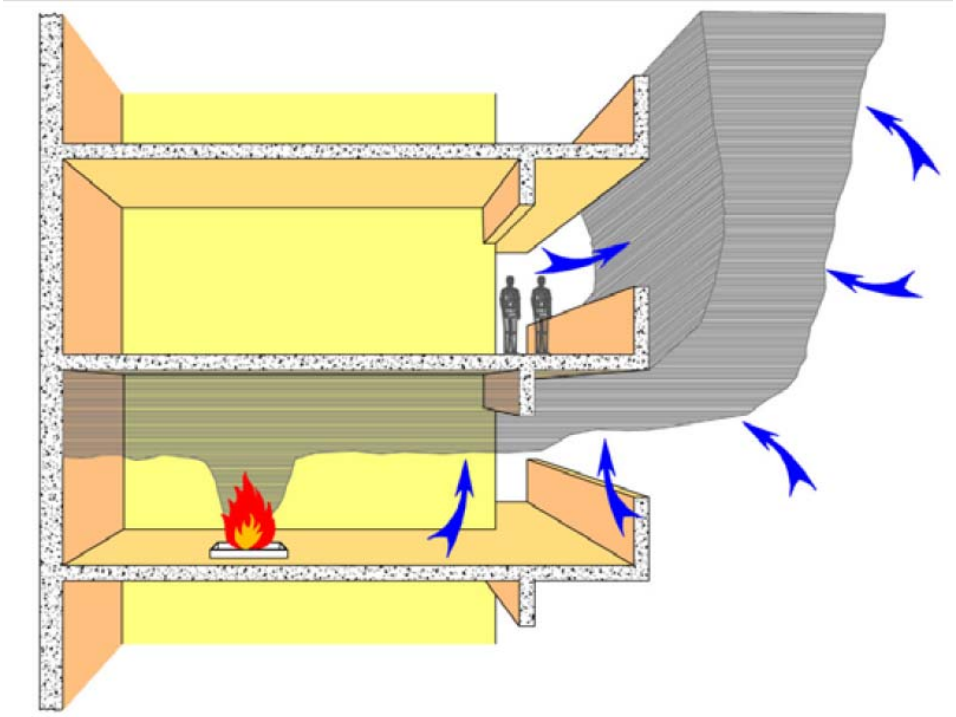


Fig. 18 : Contribution d'un balcon à la dispersion des fumées

Enfin, une approche entièrement basées sur des automates cellulaires à été mise au point récemment [OHG07]. Ce modèle, en deux dimensions, a été conçu pour prévoir l'évolution d'incendies de grande ampleur en milieu urbain au Japon. Pour la conception, il a été fait le choix d'un découpage d'un carré de 400 m par 400 dans l'est de la ville de Toyohashi (essentiellement composée de maisons en bois). Les cellules ont une taille de 3 m sur 3 (3 mètres est la moitié de la distance de propagation possible du feu lorsqu'il n'y a pas de vent) et peuvent prendre les cinq états suivants :

- 0 : Ininflammable.
- 1 : Ne brûlant pas, inflammable.
- 2 : Etat d'allumage, ne pouvant pas répandre le feu.
- 3 : Brûlant, pouvant propager le feu.
- 4 : Eteint, ou prêt à s'éteindre, ne pouvant pas répandre le feu.

Pour parfaire à la simulation, les cellules peuvent représenter une partie de bâtiment (en bois, traité contre le feu, coupe feu) ou un espace vide. Le mode de développement du feu se fait par pas de temps successifs suivant une règle de probabilité de propagation en fonction du vent (Fig. 19 : Probabilité W_{ij} de propagation du feu d'une cellule à l'autre par vent d'ouest). La simulation peut être faite sur une période allant jusqu'à trois heures. Plusieurs essais sont réalisés avec les mêmes conditions initiales (50 fois est le compromis retenu entre la précision et les temps de calcul). Le résultat est retourné sous la forme d'une carte décrivant la probabilité d'extension de l'incendie (Fig. 20 : Exemple de probabilité de progression du feu en trois heures, sans vent). Enfin, les critères de propagation ont été affinés par comparaison à d'authentiques feux.

Si les résultats se révèlent fiables à 80%, les temps d'attentes (10 minutes avec un processeur à 1,4 GHz) ne le rendent pas directement exploitable pour les forces d'intervention. Néanmoins, ce modèle peut s'avérer efficace pour des simulations d'incendies urbains en y ajoutant des raffinements.

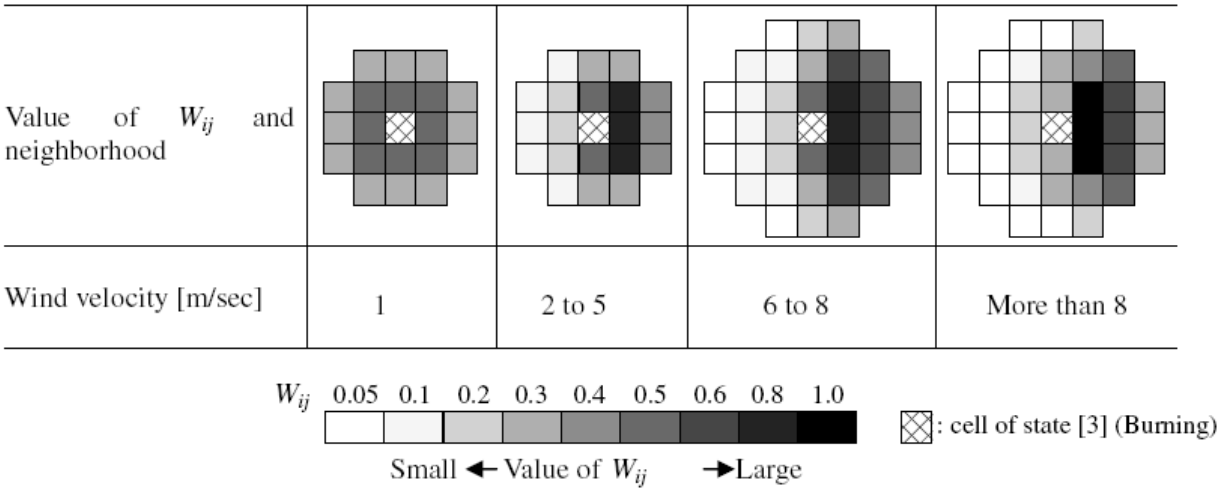


Fig. 19 : Probabilité W_{ij} de propagation du feu d'une cellule à l'autre par vent d'ouest

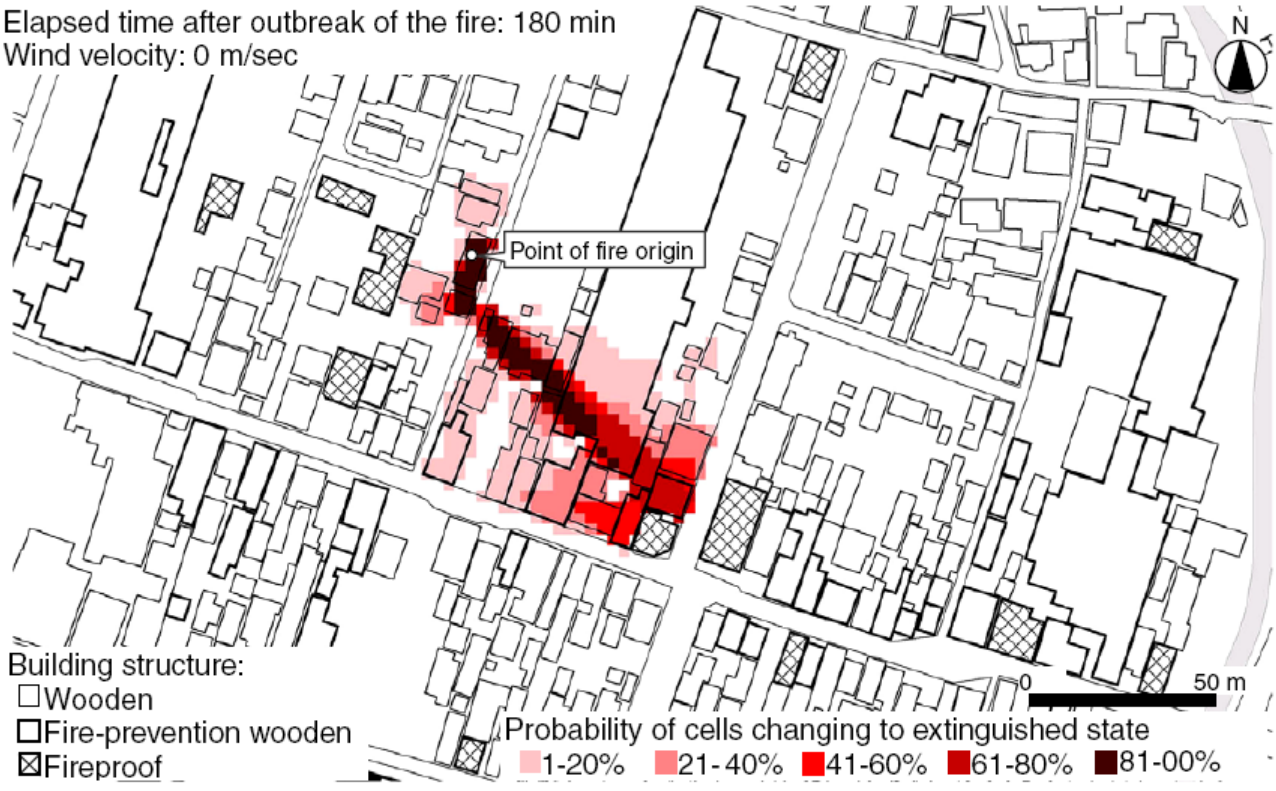


Fig. 20 : Exemple de probabilité de progression du feu en trois heures, sans vent

7] Conclusion et perspectives :

Malgré de nombreuses études sur les incendies, chaque simulation est confrontée à plusieurs limitations. Le feu est un phénomène complexe dont certains processus ne sont pas bien connus (formation des suies, flammes fantômes, etc.). De plus, la progression des flammes et des fumées répond aux phénomènes d'écoulements turbulents, dont la représentation nécessite la résolution des équations différentielles de Navier-Stokes, très coûteuse en temps de calcul. Les simplifications possibles (moyenne, maillage adaptatif, etc.) ne permettent pas à ces modélisations une application en temps réel. Pour remédier à ce problème, il est possible d'utiliser des codes à zones. Cependant, ceux-ci ne peuvent s'appliquer qu'à des feux en milieu clos (ou semi-ouvert) et uniquement dans des conditions précises. Enfin, l'approche par automates cellulaires peut s'avérer efficace dans certaines configurations mais elle nécessite non seulement une bonne définition des règles de propagation mais aussi des essais pour affiner une prédiction basée sur des probabilités.

La prévision de la progression des incendies par les toitures dans une démarche d'aide à la décision pour les forces d'intervention demande un temps de réponse le plus court possible. Une approche par codes à champs n'est donc pas envisageable. Il en est de même pour les codes à zones, du fait que le milieu n'est pas adapté. En revanche, les automates cellulaires sont plus appropriés pour ce type de propagation, bien que certains points restent à définir. En effet, les principaux éléments entrant en jeu sont les déplacements d'air, la météo (vitesse et direction du vent, taux d'humidité, température), la géométrie des lieux, les matériaux exposés ainsi que l'intensité du feu. A une certaine hauteur, le vent suit globalement une direction unique, ce qui n'est plus le cas au niveau des bâtiments où les déplacements sont turbulents et où peuvent apparaître des couloirs d'air (rue "cañon"). Néanmoins, des approximations peuvent se révéler suffisantes dans la mesure où une approche statistique permet d'affiner les résultats. Les conditions météorologiques, la géométrie des lieux ainsi que l'intensité du feu peuvent être connues (ou approximées) avant le lancement de la simulation. Les matériaux en jeu (nature, composition chimique, usure, etc.) ne peuvent qu'être estimés, ce qui ne doit pas provoquer une erreur d'appréciation trop importante. Enfin, deux phénomènes n'ont encore jamais été pris en compte dans ce genre de simulation, la ruine vers l'extérieur d'une partie du toit et la propagation du feu par le transport aérien de matières enflammées (dans des situations de vent fort, Toulouse étant particulièrement exposé à ceux-ci). Le choix et le paramétrage des règles doit aussi être apprécié en fonction de l'étude d'incendies réels, données difficilement accessibles du fait de la rareté des feux de grande ampleur en ville et surtout du manque de données enregistrées.

En sous-sol, le déroulement des incendies de voitures peut se rapprocher des feux en tunnel (sous certaines conditions). L'approche par code à zones peut alors s'avérer efficace si quelques ajouts sont réalisés. Le principal but étant de contenir les fumées toxiques (ou de

conserver une stratification le temps d'une évacuation), la géométrie du lieu doit être bien définie, de même que l'aération et les possibilités de ventilation. Comme il est important de porter son attention sur ces dernières, l'espace doit être décomposé pour estimer les risques d'un enfumage partiel du parking. Enfin, il est important de savoir si le feu est isolé ou proche d'autres véhicules au quel cas, la ventilation devra être réduite pour diminuer les risques de propagation. Les risques d'explosion, bien que relativement rares, ne doivent être négligés puisqu'ils représentent un réel danger.

Les incendies les plus violents se produisent bien évidemment avec les matières les plus dangereuses. Les entrepôts et usines "à risque" sont régis par des normes de sécurité et font partie des ETARE (Etablissements Répertoriés). Un incident peut très vite se révéler une catastrophe dont l'ampleur est difficilement appréciable pour plusieurs raisons. La disposition et la quantité de produits dangereux ne peut souvent être connue que partiellement, du fait des mouvements internes à l'entreprise. De plus, la géométrie des entrepôts (notamment la hauteur) fait que les codes à zones ne sont pas directement opérationnels. Néanmoins, l'ajout d'un maillage peut permettre des estimations. Certains produits pouvant être extrêmement toxiques, le premier défi est l'évacuation de tout le personnel. De plus, les risques de flashover (embrasement quasi-immédiat de la totalité de la pièce) et d'explosion rendent très délicat les conditions d'intervention. Sans une connaissance précise des produits chimiques, toute prévision devient aléatoire. De même, la complexité de certaines usines (Fig. 21 : Une usine pétrochimique, un modèle de complexité) rend impossible toute modélisation fidèle.

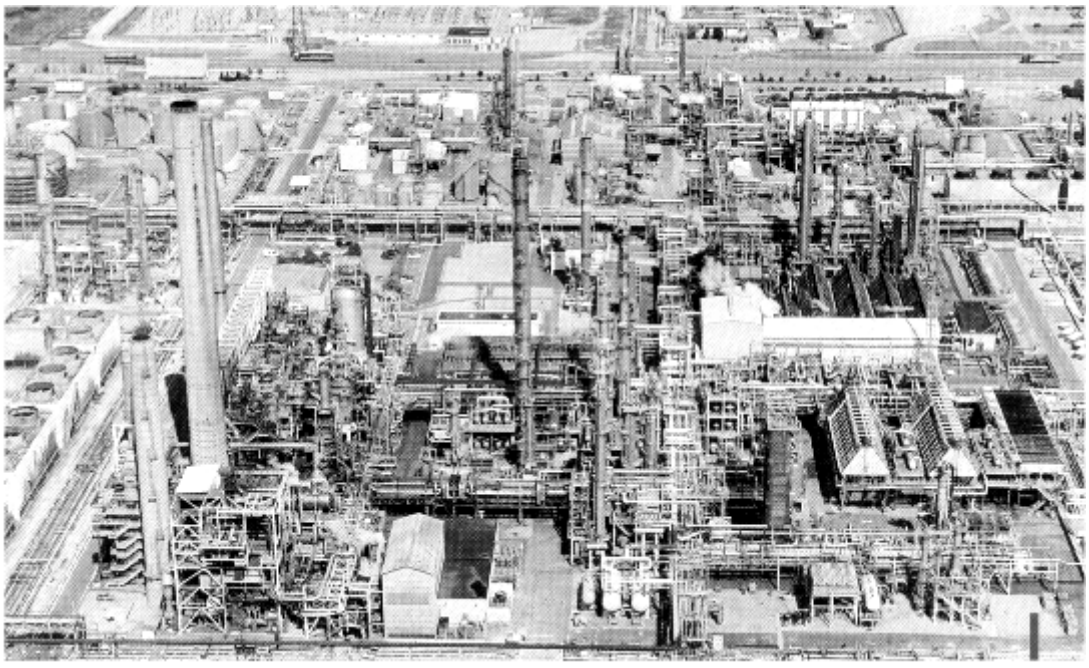


Fig. 21 : Une usine pétrochimique, un modèle de complexité

Bibliographie :

[ACH03] - Gary L. Achtemeier - “Rabbit Rules” - An Application of Stephen Wolfram’s - “New Kind of Science” to Fire Spread Modeling, 2003

[AYM05] - N. Ayme, D. Joyeux - Méthode de vérification du comportement au feu d'entrepôts en acier - Construction Métallique n° 1, 2005

[ALT97] - M.S. Altinakar, A. Weatherill, P.H. Nash - The use of zone model in predicting fire and smoke propagation in tunnels - 9th international symposium on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, BHR Group, Aosta Valley, Italy, 1997

[BER01] - Stephen G Berjak, John W Hearne - An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system - Ecological modelling n° 148, pp. 133 à 151, 2001

[BER02] - Gilles Bertin, Jean-Michel Most, Mickaël Coutin - Wall fire behavior in an under-ventilated room - Fire Safety Journal 37, pp. 615 à 630, 2002

[CAR01] - R. O. Carvel, A. N. Beard, P. W. Jowitt, D. D. Drysdale - Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels - Fire Safety Journal 36, pp. 569 à 596, 2001

[CAR03] - Pierre Carlotti - Ventilation - Dossier pilote des tunnels équipements - Centre d'étude des tunnels (CETU), 2003

[CAR05] - Pierre Carlotti - Comportement au feu des tunnels routiers - Centre d'étude des tunnels (CETU), 2005

[CHA94] - D.A. Charters, W.A. Gray, A.C. McIntosh - A computer model to assess fire hazards in tunnels (FASIT) - Fire Techology, vol 30, pp 134-154, 1994

[CRE00] - F. Cretin, A. Carrau - Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt - Rapport intermédiaire d'Opération Modélisation de l'incendie en milieu confiné, décembre 2000

[DIM07] - Johannes A. W. Dimyadi – Generating FDS fire simulation input using IFC-based building information model - Fire Engineering Research Report 07/1, Université de Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2007

[DIN02] - DiNenno, D. Walton, C. Beyler, J. Watts, D. Custer, D. Drysdale, J. Hall - The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Second edition, NFPA (National Fire Protection Association), 2002

[DUC02] - Frédéric Ducros - La simulation des feux d'hydrocarbure - Simuler pour agir, Clefs CEA n° 47, 2002

[FER07] - L. Ferragut, M. I. Asensio, S. Monedero - A numerical method for solving convection-reaction-diffusion multivalued equations in fire spread modelling - ScienceDirect, Advances in Engineering Software 38, pp. 366 à 371, 2007

[HAR04] - Roger Harrison - Smoke control in Atrium buildings, a study of the thermal spill plume - Fire Engineering Research Report 04/1, july 2004

[HIM00] - Keisude Himoto, Takeyoshi Tanaka - Fifteenth meeting of the UNJR panel on fire research and safety, NISTIR 6588, vol. 2, pp. 309 à 319, DPRI, Université de Kyoto, Japon, 2000

[HWA05] - C.C. Hwang, J. C. Edwards - The critical ventilation velocity in tunnel fires, a computer simulation - Fire Safety Journal 40, pp. 213 à 244, 2005

[JON00] - Walter W. Jones, Glenn P. Forney, Richard D. Peacock, Paul A. Reneke - A Technical Reference for CFAST: An Engineering Tool for Estimating Fire and Smoke Transport - National Institute of Standards and Technology, 2000

[ING05] - Haukur Ingason, Anders Lönnermark - Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels - Fire Safety Journal 40, pp. 646 à 668, 2005

[KAR97] - Ioannis Karafyllidis , Adonios Thanailakis - A model for predicting forest fire spreading using cellular automata - Democritus University of Thrace, Department of Electrical and Computer Engineering, Greece, 1997

[KUN02] - J.P. Kunsch - Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel - Fire Safety Journal 37, pp. 67 à 81, 2002

[LEF04] - J. Lefebvre, B. Bastin, M. Le Bras, S. Duquesne, C. Ritter, R. Paleja, F. Poutch - Flame spread of flexible polyurethane foam : comprehensive study - ScienceDirect, Polymer Testing 23, pp. 281 à 290, 2004

[LIM02] - Linus Lim, Colleen Wade - Experimental fire tests of two-way concrete slabs - Fire Engineering Research Report 02/12, Université de Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2002

[MAM04] - John H. Mammoser III, Francine Battaglia - A computational study on the use of balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires – ScienceDirect, Fire Safety Journal 39, pp. 277 à 296, 2004

[MAR04] - Alex Maranghides, John Blair - NIST Lab Experiments Simulate House-to-House Fire Spread - National Institute of Standards and Technology (NIST), 2004

[MER99] - G. P. Mercier, Y. Jaluria - Fire-induced flow of smoke and hot gases in open vertical enclosures - Experimental Thermal and Fluid Science 19, pp. 77 à 84, 1999

[MIT95] - Henri E. Mitler, Kenneth D. Steckler - Wall fires and the approach to flashover in an enclosure - National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD 20899, USA - Safety Science 20, pp. 71 à 78, 1995

[MOR03] - Dominique Morvan, Jean Luc Dupuy - Modèle multiphasique de comportement d'un feu de surface se propageant à travers une garrigue Méditerranéenne

[MOS05] - Antoine Mos - Modèles phénoménologiques pour la simulation d'incendies en tunnel routier - Thèse à l'université de Lyon 1, 2005

[MOW99] - Frederick W. Mowrer - Enclosure smoke filling revisited - Fire Safety Journal 33, pp. 93 à 114, 1999

[OHG07] - A. Ohgai, Y. Gohnai, K. Watanabe - Cellular automata modeling of fire spread in built-up areas. A tool to aid community-based planning for disaster mitigation - ScienceDirect, Computers, Environment and Urban Systems 31, pp. 441 à 460, 2007

[QUI02] - James G. Quintiere - Fire behavior in building compartments - Proceeding of the Combustion Institue, vol. 29, pp. 181 à 193, 2002

[REN06] - Christophe Renaud - Arrêté du 5 août 2002 - Guide de verification des entrepôts en structure métallique en situation d'incendie - CTICM, Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, juin 2006

[ROT72] - R.C. Rothermel - A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels - Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, 1972

[SAT06] - Hiroomi Satoh, Tomoyuki Mizuno - Fire source model based on the ignited material and its burning property in the early stages of fire in residential accomodations - Fire Science and Technology, vol.25 n° 3, pp. 163-188, 2006

[ZAN03] - Tomasz Zaniewski, Shaun Bangay - Simulation and Visualization of Fire using Extended Lindenmayer Systems - Department of Computer Science Department of Computer Science, Rhodes University, Association for Computing Machinery, 2003

[ZHO05] - X. Zhou, S. Mahalingam, D. Weise - Modeling of marginal burning state of fire spread in live chaparral shrub fuel bed – ScienceDirect, Combustion and Flame 143, pp. 183 à 198, 2005