

Etude du comportement au feu d'un entrepôt au moyen de codes 3D

G. Leroy^a, S. Rahman^a, B. Truchot^a

a. INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil-en-Halatte, France

Résumé :

L'ingénierie de la sécurité incendie est aujourd'hui un domaine nécessaire dans l'accompagnement des grands projets notamment dans le domaine de la logistique. Il s'agit alors de démontrer que la cinétique de développement de l'incendie permet l'évacuation des personnes et l'intervention des secours mais également valider l'absence de ruine en chaîne et le non effondrement des structures vers l'extérieur du bâtiment.

La démonstration de ces objectifs s'appuie sur des simulations numériques permettant de calculer le développement de l'incendie, la propagation des fumées, mais également le comportement thermomécanique de la structure. L'INERIS a pour ce faire développé une méthodologie s'appuyant sur un couplage du code de mécanique des fluides numérique (FDS) et d'un code thermomécanique de structures (SAFIR).

Si les modèles numériques nécessitent encore des développements pour devenir réellement prédictifs sur la propagation et la formation de composés toxiques, l'association de ces outils avec des résultats expérimentaux à grande échelle rend leur utilisation pertinente dans le domaine de la sécurité industrielle. L'approche permet ainsi à la fois la prise en compte des pertes de stratification mais également la prédiction des extrema locaux de température, critiques pour la tenue de la structure.

Le comportement de la structure est modélisé au moyen du code thermomécanique SAFIR, outil basé sur une approche éléments finis. La simulation est réalisée en deux étapes. La première consiste à calculer l'élévation de température dans chacun des éléments de la structure en utilisant les résultats de l'outil CFD. Le calcul de déformation de la structure s'appuie ensuite sur l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température, associée aux charges appliquées sur celle-ci.

Le présent papier expose le détail de cette méthodologie illustrée sur un cas réel d'étude spécifique d'ingénierie de la sécurité incendie pour une cellule d'entrepôt.

Mots clefs : Entrepôt, Structure, Ingénierie Incendie, CFD

1 Introduction

L'ingénierie de la sécurité incendie couvre à la fois les établissements recevant du public (ERP) au travers d'études de désenfumage mais également le domaine des entrepôts logistiques pour lesquels les conceptions spécifiques liées notamment à la taille des cellules de stockage ou la présence de mezzanine imposent la réalisation d'une telle étude. Il s'agit alors pour ces bâtiments de démontrer que la cinétique de développement de l'incendie permet l'évacuation des personnes mais également l'intervention des secours. Ces études comportent également un volet structurel pour valider l'absence de ruine en chaîne et le non effondrement des structures vers l'extérieur du bâtiment.

La démonstration de ces objectifs s'appuie sur des simulations numériques complexes permettant de calculer la cinétique de développement de l'incendie, la dynamique de propagation des fumées, ainsi que le comportement thermomécanique de la structure.

2 Rappels réglementaires

L'arrêté du 5 Aout 2002 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts [1] impose la réalisation d'une étude spécifique d'ingénierie à toutes les cellules de stockage qui présentent des caractéristiques particulièrement sensibles au regard de la sécurité des personnes (mezzanines, grande

surface d'exploitation ...). Une telle étude doit aborder deux aspects :

- un aspect structurel pour lequel la cinématique de ruine doit démontrer le non-effondrement de la structure vers l'extérieur et l'absence de ruine en chaîne,
- un aspect de cinétique d'incendie pour lequel le développement du feu doit être compatible avec l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours.

La méthodologie développée par l'INERIS pour traiter ces 2 aspects est détaillée dans les paragraphes suivants.

2.1 Aspect cinétique de feu

On nomme tenabilité l'aptitude des individus à assurer des fonctions cognitives et motrices à un niveau acceptable lorsqu'ils sont exposés à un environnement d'incendie [2]. Du point de vue de la cinétique de feu, l'étude doit vérifier que les conditions de tenabilité thermiques, toxiques mais également la visibilité des personnes en présence soient compatibles avec leur évacuation. Autrement dit, la durée nécessaire pour l'évacuation des personnes doit être inférieure à leur durée de tenabilité dans le bâtiment. L'incapacitation d'une personne exposée à la chaleur peut être liée à trois mécanismes différents : l'hyperthermie, qui se traduit par une détérioration mentale ; des brûlures au second degré d'une surface significative du corps ; des brûlures des voies respiratoires [2]. Le 3^{ème} mécanisme est susceptible de se produire en cas d'inhalation d'air saturé en vapeur d'eau pour une température supérieure à 60°C. Ce seuil de température est généralement retenu dans les études spécifiques d'ingénierie. Par ailleurs, il convient d'évaluer les doses de gaz asphyxiants et de gaz irritants absorbées par les personnes au cours de leur évacuation. Les méthodes classiques telles que de FED (doses effectives fractionnelles) pour les gaz asphyxiant et FEC (concentration effective fractionnelle) pour les gaz irritants sont basées sur des outils mathématiques permettant le suivi au cours du temps des doses absorbées [2]. Le temps auquel ces doses dépassent des valeurs seuils spécifiées représente le temps disponible avant que les conditions de tenabilité ne soient compromises. Enfin, concernant l'obscurcissement des fumées, celles-ci sont considérées comme opaques lorsque la visibilité est inférieure à 10 m [3]. Une méthode se basant sur le coefficient d'extinction de lumière en fonction de la concentration de suies permet d'obtenir la visibilité en tout point de l'espace [4].

2.2 Aspect structurel

D'un point de vue bâtimentaire, l'étude doit vérifier:

- l'absence de ruine en chaîne au sein d'une même cellule ; autrement dit, la structure étant généralement composée d'enfilades de portiques, la ruine d'un des portiques ne doit pas entraîner celle des autres portiques.
- que la ruine des murs intercellulaires ne se fait pas vers l'extérieur :
 - o soit parce que les efforts produits par la dilatation des poutres avant leur ruine, conjugués avec la dissymétrie thermique sur les faces des poteaux, ne sont pas de nature à engendrer une ruine des poteaux vers l'extérieur ;
 - o soit parce que cette même dilatation des poutres provoque la plastification des poteaux vers l'extérieur, mais que la ruine des poutres conduit ensuite à des efforts de traction vers l'intérieur en tête de poteau.
- la ruine d'un élément n'entraîne pas la ruine de la cellule de stockage avoisinante ni la ruine du mur coupe-feu intercellulaire.

3 Démarche détaillée de la méthode

Le développement des machines massivement parallèles permet aujourd'hui la modélisation complète de l'incendie dans une cellule d'entrepôt en utilisant la résolution numérique des équations de la mécanique des fluides associées à un modèle de combustion.

Une telle approche permet d'obtenir la distribution des différentes grandeurs aérothermochimiques ou encore de la visibilité dans l'ensemble du domaine. Si ces modèles nécessitent encore des développements pour devenir réellement prédictifs sur le thème de la propagation du feu et de la formation de composés toxiques, l'association de ces outils performants avec des résultats expérimentaux à moyenne et grande échelle rend

leur utilisation pertinente dans le domaine de la sécurité industrielle. L'INERIS a développé une méthodologie s'appuyant sur un couplage d'un code de mécanique des fluides numérique (CFD) et un code thermomécanique de calcul de structure. Cette approche s'appuie sur le code de calcul FDS (Fire Dynamics Simulator) associé à des résultats expérimentaux pour évaluer la puissance unitaire des éléments combustibles ou encore la composition des gaz de combustion, éléments fondamentaux pour simuler le développement réel de l'incendie. Le comportement de la structure est ensuite modélisé au moyen du code thermomécanique SAFIR, outil basé sur une approche éléments finis. Dans SAFIR, la simulation est réalisée en deux étapes. La première consiste à calculer l'élévation de température dans chacun des éléments de la structure en utilisant l'agression thermique calculée au moyen de l'outil CFD. L'intérêt du couplage entre la CFD et le code SAFIR est de pouvoir appliquer, à chaque instant et sur chacun de ces éléments, les conditions réelles de température induites par le développement de l'incendie. Ce résultat est ensuite utilisé pour le calcul de déformation de la structure, l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température, associée aux charges appliquées sur celle-ci étant le point d'entrée de ce calcul de déformée.

4 Application

La méthodologie a été appliquée sur un bâtiment de stockage appartenant à la société FAPAGAU, du groupe L'OREAL [5]. Quelques éléments sont présentés ici.

4.1 Description du bâtiment

Le bâtiment, doté d'un système de défense incendie de type sprinklage, a pour surface au sol 5 500 m². Il a pour fonction principale le stockage sous forme de palettes dans une zone de stockage en racks de 3 300 m² et une en masse de 800 m². La structure principale du bâtiment est composée de poteaux métalliques HEB 240x240 et de deux sous-modèles de poutres métalliques en I 810x170 et 710x170. Le bâtiment et sa structure considérés dans FDS sont représentés sur la figure 1.

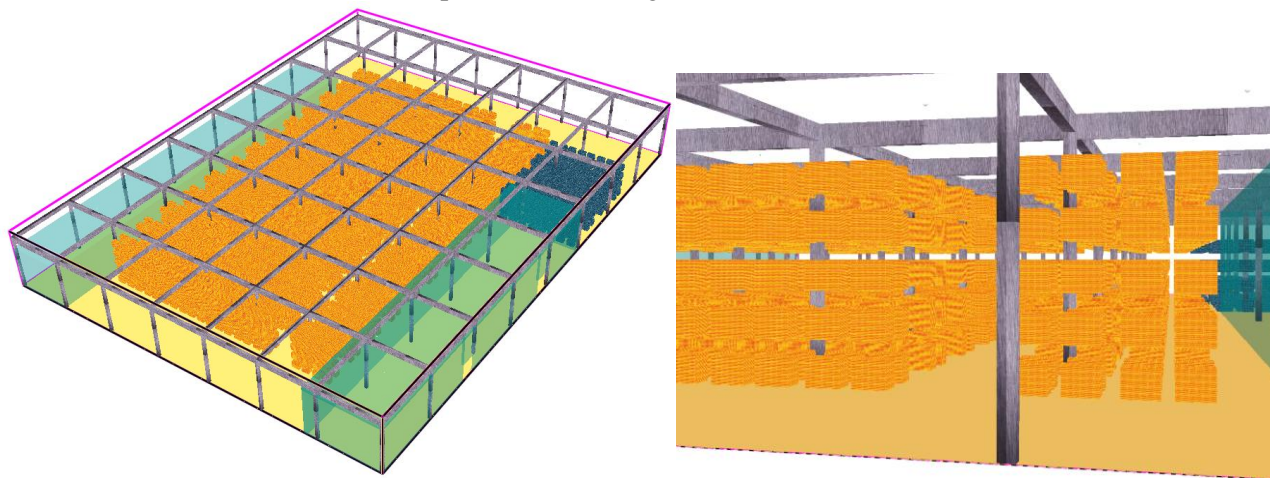


FIG. 1 – Représentation virtuelle du bâtiment

4.2 Hypothèses de calcul

4.2.1 Durée disponible pour l'évacuation

Quatre phases correspondant à une succession de 4 durées doivent être prises en compte pour évaluer le temps disponible pour l'évacuation :

- le temps de détection de l'incendie qui dépend de la sensibilité des têtes de sprinklage ou de tout autre système de détection installé par l'exploitant. Un calcul préliminaire non détaillé dans ce document donne un temps de détection de 4 min.
- le temps de réaction des personnes estimé à 1 min [6]
- le temps nécessaire aux personnes pour atteindre les issues de secours ; ce temps dépend de leur position initiale dans le bâtiment et de leur vitesse de déplacement. En l'absence de conditions incapacitantes causées par le développement de l'incendie, la vitesse de déplacement des personnes

est estimée à 1m/s [3].

- le temps de franchissement des portes, estimé à 0,8 personne / s/ porte [7]. Le nombre de personnes susceptibles d'être présentes en même temps dans la zone de stockage s'élève à 40 personnes. En supposant de manière défavorable que toutes les personnes situées dans la zone passent par la même issue d'évacuation, le temps de franchissement est donc estimé à 1 min.

4.2.2 Hypothèses relatives à la combustion des palettes

L'outil FDS ne permettant pas aujourd'hui de prédire l'ensemble des phénomènes associés à la combustion d'une palette (dégradation thermique, réactions chimiques de combustion ...), il est nécessaire de lui associer une autre approche. L'INERIS s'appuie pour cela sur les essais réalisés dans le cadre de la campagne Flumilog mais également sur le modèle de prédiction de la puissance palette développée dans ce même programme [8-9].

4.3 Résultats

4.3.1 Aspect cinétique

L'évolution de l'incendie dans l'entrepôt pour une inflammation se produisant au centre de la zone de stockage en rack est illustrée par les figures 2 et 3.

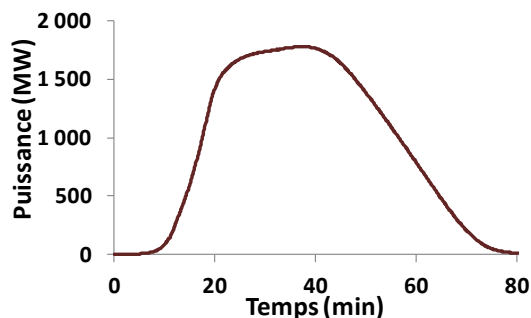


FIG. 2 – Courbe de puissance totale de l'incendie

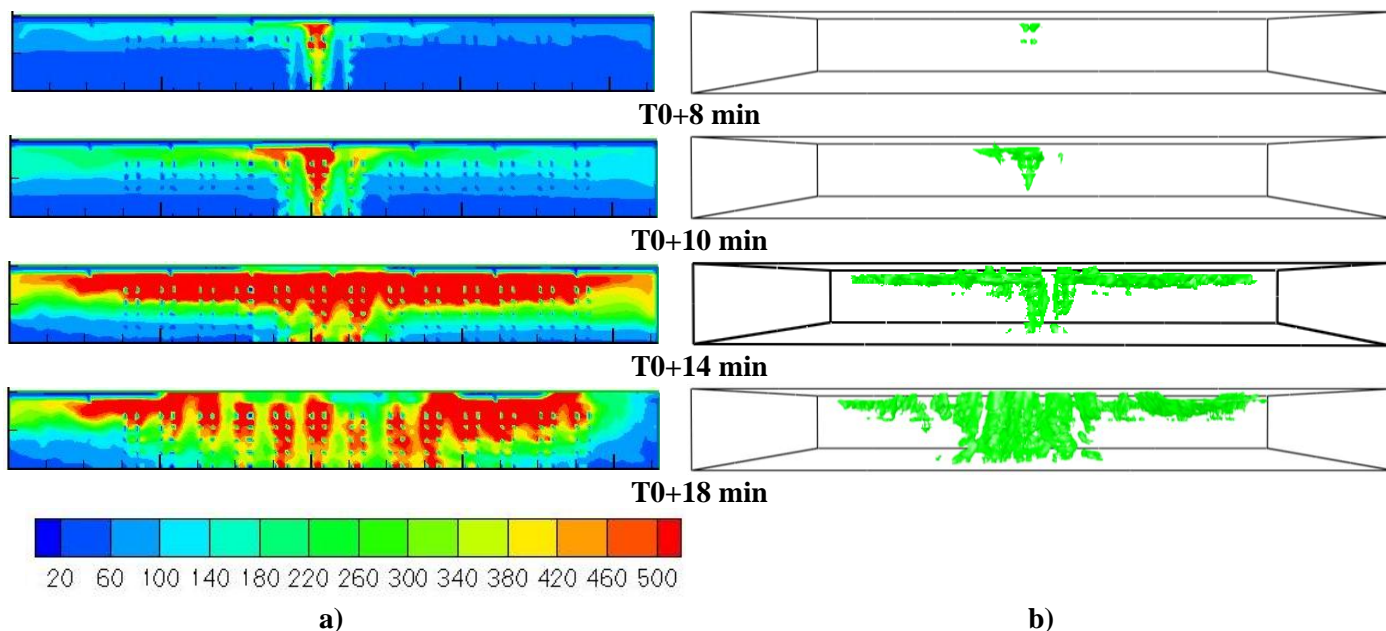


FIG. 3 –a) Vues en coupe des températures dans l'axe du point d'inflammation b) Iso-température à 500 °C

Après 10 min, l'incendie a pris la forme caractéristique d'un « V » classique et les flammes rabattues par la toiture en partie haute enflamment les racks voisins. La stratification thermique en partie haute se distingue également. Il est à remarquer qu'une perte de stratification des fumées s'opère lorsque celles-ci interagissent avec la paroi. Ce phénomène serait susceptible, en d'autres circonstances (plafond plus bas, cellules plus

étroite ...) de bloquer les issues de secours. L'embrèvement généralisé de l'entrepôt, caractérisé par des températures mesurées au niveau des couches chaudes supérieures à 500°C, est atteint environ 14 min après le départ de feu entraînant l'effondrement d'une partie de la toiture. Le pic de puissance est atteint au temps t_0+23 min. Ces observations sont cohérentes avec les essais grande échelle réalisés par l'INERIS dans le cadre du projet Flumilog [8].

La durée de tenabilité des individus estimée à 9 min est ici conditionnée par la perte de visibilité. En effet, bien que le stade d'incapacitation ne soit pas encore atteint, les fumées sont susceptibles de désorienter les personnes, de masquer les points de balisage et ainsi de retarder leur évacuation ce qui a pour conséquence de les exposer plus longtemps aux autres effets.

4.3.2 Aspect structurel

Le code SAFIR permet de modéliser l'échauffement de chacun des éléments constituant la structure en appliquant les températures calculées au préalable au moyen du code FDS. Les résultats de ces calculs d'échauffement sont ensuite utilisés pour évaluer la déformation de la structure, l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température, associée aux charges appliquées sur celle-ci étant le point d'entrée de ce calcul de déformée. Les règles de déformation imposées dans SAFIR sont celles détaillées dans l'Eurocode 3 partie 1-2 [10].

La figure 4 présente la déformée de la partie centrale de la structure au cours du temps pour un départ de feu au pied du poteau central.

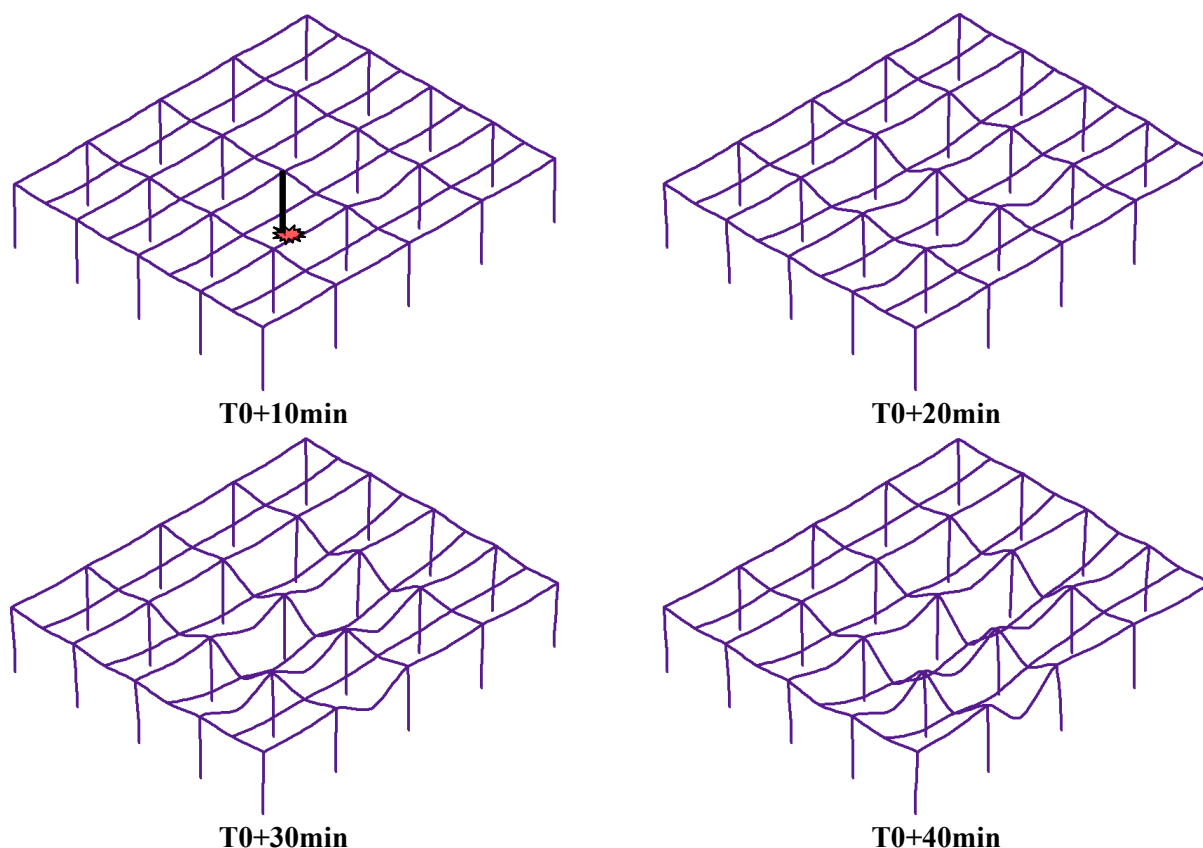


FIG. 4 – Déformée de la structure – les déplacements sont multipliés par un facteur 5

L'évolution de la déformée met en évidence une ruine locale des travées situées au droit du départ de feu dans un premier temps puis la propagation de la ruine au fur et à mesure du développement du feu. Cela se traduit par un écartement des têtes des poteaux de rives dans un premier temps vers l'extérieur de la structure lié à la dilatation des poutres agressées thermiquement puis leur rapprochement dans un second temps du fait de l'affaiblissement des poutres qui tendent à tirer les éléments de toiture vers le bas (figure. 5). Le non effondrement de la structure vers l'extérieur est donc vérifié.

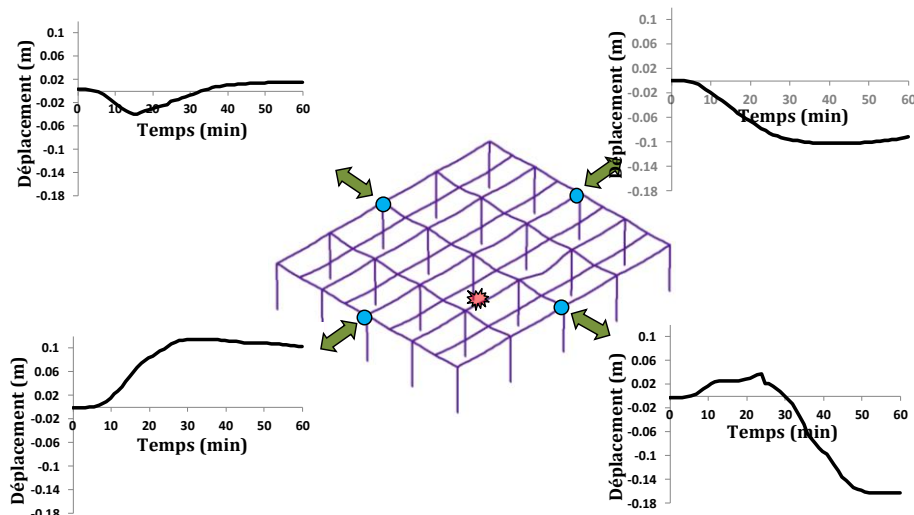


FIG. 5 – Déplacement des têtes de poteaux de rives

5 Conclusion

Le couplage d'un code de mécanique des fluides numérique (FDS) et d'un code thermomécanique de calcul de structure (SAFIR) permet de modéliser la cinétique du feu dans un bâtiment et le mode de ruine de sa structure agressive thermiquement. Les résultats ainsi obtenus permettent de conclure sur les conditions d'évacuation des personnes ainsi que les conditions d'intervention des services de secours en comparant les temps caractéristiques d'évacuation ou d'intervention avec les temps de tenabilité en terme de cinétique de développement du feu et de mode de ruine de la structure associés à chacun d'eux.

Lorsqu'elle est alimentée par les données d'entrée expérimentales adéquates, la simulation numérique est capable de décrire de manière satisfaisante le comportement des fumées et notamment la perte de stratification aux parois, un phénomène physique essentiel dans l'évaluation de l'accessibilité des personnes aux issues de secours. En outre, le calcul couplé fluide-structure permet d'envisager une multitude de scénarios de départ de feu et d'agression structurelle relatifs à la sécurité des individus.

Les auteurs remercient la société FAPAGAU de leur avoir permis d'utiliser les résultats de l'étude en support de cette publication.

References

- [1] Arrêté du 05/08/02 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts soumis à autorisation sous la rubrique 1510.
- [2] AFNOR, NF ISO 13571, Lignes directrices pour l'estimation du temps disponible avant que les conditions de tenabilité ne soient compromises, Composants dangereux du feu, Novembre 2012
- [3] AFNOR, GA P92-600, Ingénierie de la sécurité incendie – Entrepôts – guide des modalités d'application de l'article 6 – 6ième alinéa de l'arrêté du 5 août 2002
- [4] Mulholland G. W. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002. 163
- [5] Rapport référencé: INERIS-DRA-11-120417-06996A
- [6] AFNOR, ISO/TR 16738, Ingénierie de la sécurité incendie – Evaluation du comportement et du mouvement des personnes
- [7] Joyeux D., Recommandations du Projet National sur les ouvertures réglementaires à l'ingénierie de sécurité incendie, PN ISI.
- [8] www.ineris.fr/flumilog
- [9] Truchot B., Patej S., Duplantier S., Development of an innovative method for elementary Heat Release Rate Computation, Interflam, 2013
- [10] Eurocode 3 – Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : règles générales – Calcul du comportement au feu