

# CSTB - Risque incendie et développement durable : bilan 2010-2013

E. Blanchard, S. Vallerent

► **To cite this version:**

E. Blanchard, S. Vallerent. CSTB - Risque incendie et développement durable : bilan 2010-2013. 2014.  
hal-01026486

**HAL Id: hal-01026486**

**<https://hal-cstb.archives-ouvertes.fr/hal-01026486>**

Submitted on 21 Jul 2014

**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.

## Maîtrise des risques

# Risque incendie et développement durable

**Bilan 2010-2013**

Elizabeth BLANCHARD, Stéphanie VALLERENT

**Mars 2014**

**CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT**

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX. (33) 01 60 05 70 37 | SIRET 775 688 229 000 27 | [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS



**Maîtrise des risques**

**Risque incendie et développement durable**

Bilan 2010-2013

Elizabeth BLANCHARD, Stéphanie VALLERENT

Université Paris-Est, Centre scientifique et technique du bâtiment,  
Direction sécurité structure et feu

**Mars 2014**

© 2014 CSTB



Ce texte est distribué sous les termes de la licence Creative Commons Attribution 3.0 non transposé (CC BY 3.0).

Le texte complet de la licence est disponible à l'adresse suivante : <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode>

Résumé des droits et conditions de la licence :

⇒ **Vous êtes libre de :**

- partager (reproduire, distribuer et communiquer) l'œuvre ;
- remixer, adapter l'œuvre ;
- d'utiliser cette œuvre à des fins commerciales.

⇒ **Selon les conditions suivantes :**

- Attribution (paternité, crédit) : vous devez attribuer l'œuvre de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous approuvent, vous ou votre utilisation de l'œuvre).

Toute citation d'extraits, reproduction ou utilisation doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : **Blanchard E., Vallerent S., Projet de recherche "Risque incendie et développement durable" : bilan 2010-2013, CSTB, mars 2014, 40 p.**

⇒ **Comprenant bien que**

- les droits suivants ne sont en aucune manière affectés par la licence :
  - Vos prérogatives issues des exceptions et limitations aux droits exclusifs ou *fair use* ;
  - Les droits moraux de l'auteur que rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint.

→ A chaque réutilisation ou distribution de cette œuvre, vous devez faire apparaître clairement au public la licence selon laquelle elle est mise à disposition. La meilleure manière de l'indiquer est un lien vers cette page web : <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.fr>.

**Résumé :** Prévenir le risque incendie en l'évaluant à priori et en diminuer les conséquences en cas de départ de feu sont les objectifs qui ont guidé ce projet de recherche au cours du cycle 2010-2013. Les travaux réalisés portaient à la fois sur une évaluation globale du niveau de sécurité incendie d'un bâtiment, mais également sur l'amélioration des outils numériques et sur une meilleure compréhension du comportement au feu des matériaux et des structure.

**Mots clés :** incendie, physique du feu, mouvement de la fumée, analyse de risque, résistance au feu, simulation numérique, expérimentation, échelle réelle, approche par similitude

**Summary:** This project had two goals during the period 2010-2013: prevent the risk of a fire in a building and mitigate its consequences. The research focused on one hand on the evaluation of the global fire safety level of a building, on the other hand of the improvement of the numerical simulation and also on a better understanding of the behavior of structures and material under fire.

**Keywords:** fire dynamics, smoke movement, fire risk analysis, behavior of structures subjected to fire, numerical simulation, experimentation, real scale, scaling approach

## Table des matières

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>8</b>
<b>Contexte .....</b>	<b>8</b>
<b>Questions posées à la recherche.....</b>	<b>9</b>
<b>Organisation de la recherche .....</b>	<b>9</b>
<b>Contenu du document .....</b>	<b>11</b>
<b>1. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Approche globale du risque incendie des bâtiments durables.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Améliorer les capacités prédictives des modèles numériques.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Prévoir le comportement au feu des éléments de construction, équipements et structures .....</b>	<b>19</b>
<b>2. COLLABORATIONS.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 Collaboration avec les partenaires étrangers.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Collaboration avec les partenaires nationaux .....</b>	<b>26</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>28</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>29</b>
<b>ANNEXE 1 : CONTRIBUTEURS DU PROJET .....</b>	<b>30</b>
<b>Responsables des actions de recherche .....</b>	<b>30</b>
<b>Chercheurs associés.....</b>	<b>30</b>
<b>Doctorants .....</b>	<b>31</b>
<b>ANNEXE 2 : LIVRABLES ET PUBLICATIONS.....</b>	<b>32</b>
<b>Articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture .....</b>	<b>32</b>
<b>Communications publiées dans des actes .....</b>	<b>33</b>
<b>Rapports .....</b>	<b>34</b>
<b>Conférences organisées .....</b>	<b>35</b>
<b>ANNEXE 3 : THÈSES SOUTENUES ET HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES OBTENUES ENTRE 2010 ET 2013 .....</b>	<b>36</b>
<b>Thèses .....</b>	<b>36</b>
<b>Habilitations à diriger des recherches.....</b>	<b>39</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Mode de fonctionnement de l’outil développé .....	13
Figure 2 : Maquette en soufflerie climatique Jules Verne.....	15
Figure 3 : État de la façade après l’incendie .....	16
Figure 4 : Image de la simulation numérique réalisée avec le code FDS.....	16
Figure 5 : Configuration pièce-couloir à échelle réelle.....	20
Figure 6 : Effet d’atténuation du rayonnement issu de la flamme.....	21
Figure 7 : Efforts s’exerçant sur un panneau de compartimentage .....	23
Figure 8 : Approche adoptée pour le développement d’une méthode d’évaluation du comportement au feu des panneaux de compartimentage en béton de grandes dimensions .....	23
Figure 9 : Analyse à la rupture sous poids propre et chargement thermique du panneau en configuration déformée .....	24

## Acronymes

Cifi	Circulation dans un Immeuble des Fumées de l’Incendie
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ENS	Évènement Non-Souhaité
ENSOSP	École Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-Pompiers
FDS	Fire Dynamics Simulator
ISI	Ingénierie de Sécurité Incendie
LASIE	Laboratoire des Sciences de l’Ingénieur pour l’Environnement
LEMTA	Laboratoire d’Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
LMFA	Laboratoire de Mécanique des Fluides et l’Acoustique
MIPS	Modélisation, Intelligence, Processus et Systèmes
NIST	National Institute of Standards and Technology
Schema-SI	Stochastic Computation and Hybrid Event Modelling Approach - Sécurité Incendie
UHA	Université de Haute Alsace
VTT	Technical Research Centre of Finland - Business from technology



## **INTRODUCTION**

### **CONTEXTE**

Le risque incendie dans les bâtiments est un enjeu socio-économique majeur, à la fois pour les personnes et pour les biens. En cas d'incendie, les personnes présentes (public, personnel, habitants, pompiers) peuvent être blessées ou même décéder, au contact de la fumée ou suite à l'effondrement du bâtiment. En outre, le bâtiment et son contenu sont souvent fortement impactés par un incendie. S'en suit une période de rénovation/reconstruction qui, pour un particulier peut être difficile (impact psychologique de la perte partielle ou totale d'un bien mais également impact économique), et, pour une entreprise, peut engendrer des difficultés de maintien d'activité. Les statistiques publiées en 2011 par l'association de Genève ([www.genevaassociation.org](http://www.genevaassociation.org)) situent la France dans la médiane des pays de l'OCDE en ce qui concerne le coût direct annuel des pertes dues aux incendies (de l'ordre de 0,2% du PIB français en 2008) et du nombre de morts.

La mutation de la filière construction ainsi que les évolutions sociétales récentes font émerger de nouvelles problématiques liées au risque incendie. En effet, le développement de systèmes constructifs durables et l'emploi de nouveaux matériaux de construction sont des caractéristiques majeures du bâtiment d'aujourd'hui. Construire un bâtiment durable est motivé par la volonté de protéger l'environnement et d'inscrire le cadre bâti dans la durée, et non plus seulement dans les domaines de la sécurité ou du confort. Même si cette volonté est forte, les premiers concernés, les usagers des bâtiments durables, ne sont pas prêts à faire des concessions sur leurs exigences en termes de sécurité et de coût, pour vivre dans une construction durable. Par ailleurs, le vieillissement de la population et l'amélioration de son niveau d'information ainsi que l'augmentation de l'aversion au risque sont les trois principaux facteurs expliquant le souhait actuel d'un niveau de sécurité plus élevé.

En parallèle, les évolutions réglementaires récentes, en ouvrant la voie à l'ingénierie, offrent la possibilité d'étudier au cas par cas le niveau de sécurité d'un bâtiment en situation d'incendie. Cette ingénierie repose pour une grande partie sur l'utilisation de codes de calcul qui doivent donc être fiables, performants et évolutifs.

Dans ce contexte, la prise en compte du risque incendie dans la construction doit s'adapter à ces mutations et peut exploiter cette nouvelle approche

performantielle. C'est dans cette optique que s'inscrivaient les travaux menés de 2010 à 2013.

### **QUESTIONS POSÉES À LA RECHERCHE**

Parmi les questions posées à la recherche et auxquelles ce projet a contribué à apporter des éléments de réponse au cours de la période 2010-2013, on peut citer :

- Comment justifier objectivement le niveau de confiance que l'on peut avoir dans les approches d'ingénierie du feu et du désenfumage ?
- Comment ne pas accroître la vulnérabilité du parc bâti aux effets des aléas (ici incendie), tout en poursuivant la recherche légitime d'une performance énergétique élevée ?
- Comment augmenter la compétitivité et la capacité de production du secteur du bâtiment (en neuf comme en rénovation) sans abaisser le niveau de sécurité incendie d'un bâtiment ?

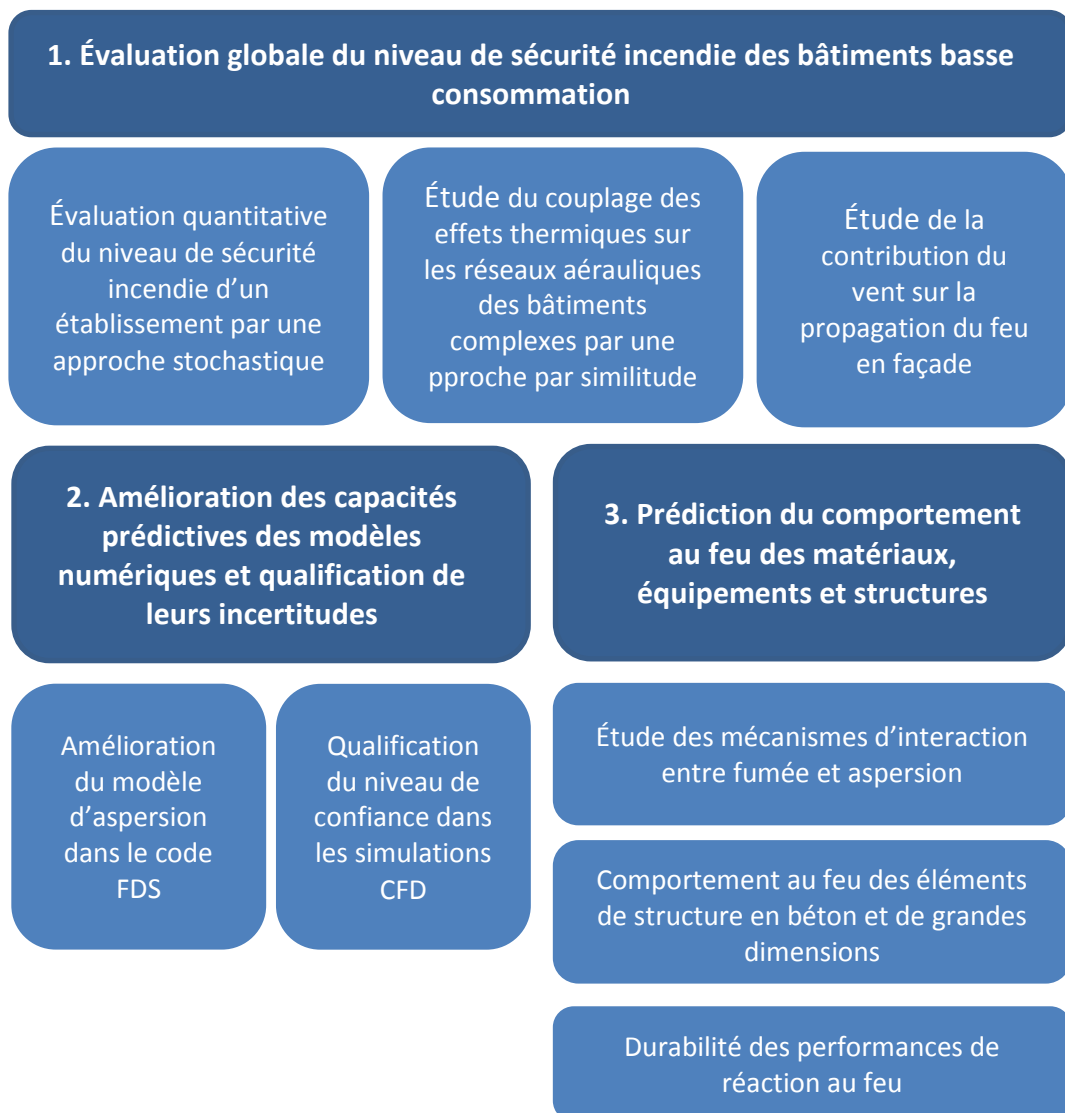
### **ORGANISATION DE LA RECHERCHE**

Afin de répondre à ces questions, les travaux du projet de recherche « Risque incendie et développement durable » ont été organisés en trois tâches pour la période 2010-2013 :

1. Évaluation globale du niveau de sécurité incendie des bâtiments durable ;
2. Amélioration des capacités prédictives des modèles numériques et qualification de leurs incertitudes ;
3. Prédiction du comportement au feu des matériaux, équipements et structures.

La première tâche portait sur l'influence de la mise en œuvre de nouveaux procédés constructifs sur la sécurité en cas d'incendie. Il s'agit par de là d'évaluer le niveau de sécurité incendie d'un bâtiment durable en utilisant les capacités prédictives des modèles de feu développés par la tâche 2 et alimentés par la base de données constituée dans la tâche 3. Pour ce faire, cette première tâche était organisée en trois sous-tâches dont la première portait sur une

nouvelle approche d'évaluation du niveau de sécurité incendie d'un établissement, approche intégrant l'interdépendance des mesures de sécurité, des modes organisationnels, du comportement humain et des phénomènes physiques du feu. La deuxième sous-tâche se concentrait sur l'influence de l'environnement (vent) sur les écoulements à l'intérieur d'un bâtiment complexe, en situation de fonctionnement normale, dégradée ou accidentelle avec un intérêt particulier pour la conjonction des effets du vent et du feu. La troisième sous-tâche portait également sur l'influence de l'environnement mais se concentrait sur l'incidence du vent sur la propagation d'un feu via la façade d'un bâtiment.



La deuxième tâche portait sur les capacités prédictives des modèles numériques aujourd'hui utilisés dans l'évaluation du niveau de sécurité d'un bâtiment. Cette

tâche comportait deux sous-tâches. La première visait à évaluer, améliorer puis exploiter les capacités prédictives d'un code de calcul pour modéliser l'interaction entre un brouillard d'eau et un feu dans un milieu confiné et ventilé. La seconde se concentrait sur les incertitudes liées aux résultats numériques fournis par ces logiciels de feu. Elle visait à donner une estimation robuste du degré de précision de ces codes de calcul.

La troisième tâche portait sur la caractérisation du comportement au feu des matériaux, des équipements et des structures, principalement en béton. Cette tâche comportait également trois sous-tâches. La première portait sur les mécanismes d'interaction entre la fumée produite par un feu et l'eau pulvérisée par un système d'aspersion, et plus particulièrement sur les conditions de visibilité dans un tel milieu. L'objectif était de caractériser expérimentalement et numériquement l'influence d'une aspersion sur l'environnement stratifié rencontré en cas de feu. Le travail mené dans ce cadre a également permis de constituer une base de données pour la validation des codes de calcul. La deuxième sous-tâche était consacrée au comportement au feu des éléments de structure en béton armé ou en béton précontraint de grandes dimensions. Elle visait à fournir une méthodologie de dimensionnement accessible aux professionnels et à développer un outil d'ingénierie pour la vérification au feu des structures. Enfin, la troisième sous-tâche portait sur la question de la durabilité des performances de réaction au feu de panneaux de bois ce, afin de mieux cibler les difficultés techniques inhérentes à ce type de tests pour de tels matériaux.

## **CONTENU DU DOCUMENT**

Le contenu de ces tâches et les résultats obtenus sont synthétisés dans la première partie de ce rapport. La seconde partie présente les collaborations qui seront développées lors du cycle de recherche 2010-2013. Enfin, sont présentées en annexe, l'ensemble des publications du projet au cours des quatre dernières années ainsi que les thèses soutenues et habilitations à diriger des recherches obtenues.

## 1. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS

### 1.1 APPROCHE GLOBALE DU RISQUE INCENDIE DES BÂTIMENTS DURABLES

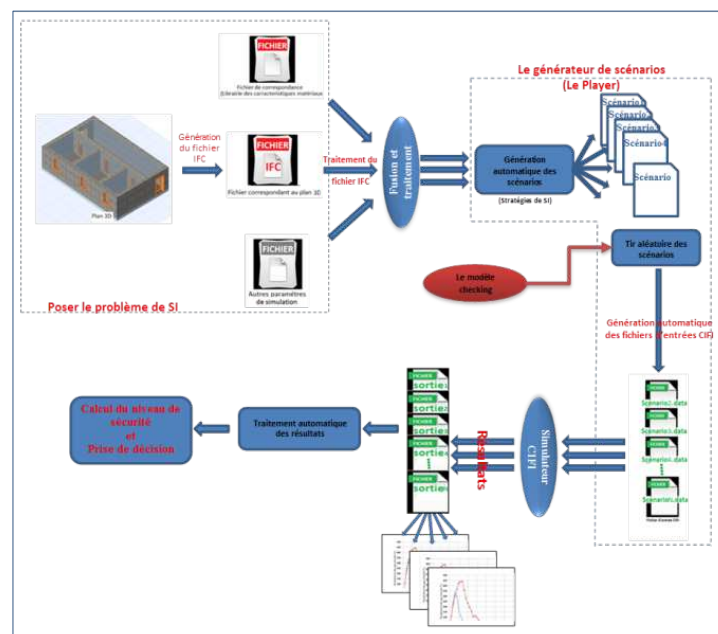
Un premier travail a porté sur **l'évaluation quantitative du niveau de sécurité incendie d'un établissement par une approche stochastique**. L'approche proposée est nouvelle et originale dans le paysage réglementaire français des établissements recevant du public, des immeubles de grande et très grande hauteur et des bâtiments d'habitation. En pratique, elle consiste à simuler sur un ordinateur un grand nombre d'histoires de feu à l'intérieur du bâtiment. Chaque histoire est caractérisée par un ensemble d'évènements qui peuvent être induits par le déroulement du feu (par exemple, le bris d'une fenêtre, la ruine d'une porte) ou être conséquents à l'intervention d'« acteurs » comme les occupants du bâtiment ou les pompiers (par exemple, l'ouverture d'une porte, d'une fenêtre). À partir d'objectifs de sécurité et de critères qui leur sont associés, la méthode employée dans cette recherche consiste à calculer pour ce nombre important d'histoires la fréquence d'occurrence d'évènements non-souhaités (ENS).

Un travail sur l'interdépendance des acteurs a permis au CSTB de développer un premier logiciel en 2007, Schema-SI, basé sur les réseaux de Petri et l'utilisation d'un modèle à zones. En 2010, le travail a montré la faisabilité de l'automatisation de la mise en données d'un problème de sécurité incendie en développant la méthode ISI-Systema. Les travaux menés depuis 2010 et prévus jusqu'en 2017 sont menés en collaboration avec l'Université de Haute-Alsace (UHA). Ils portent sur la construction d'un outil « métier », c'est-à-dire intégrant les pratiques et les langages des métiers de la sécurité incendie (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, ingénieur sécurité incendie, préventionniste, réglementeur), capable d'évaluer la performance de stratégies de mise en sécurité à l'échelle du niveau d'un bâtiment, voire d'un bâtiment. Ces travaux ont trois objectifs :

- Élaborer un outil qui évalue automatiquement le niveau de sécurité d'un établissement, en se basant sur son architecture, les caractéristiques thermophysiques du feu et le comportement humain ;
- Définir les différents langages/modèles utilisés par les intervenants lors de la description du système de sécurité incendie ;
- Intégrer dans une approche stochastique et un outil de calcul associé les différents aspects de mise en sécurité d'un établissement.

Une partie du travail effectué entre 2010 et 2013 s’est concentrée sur la mise en données des paramètres et des variables qui caractérisent le système étudié et simulé par le logiciel développé pour répondre en partie au premier et au deuxième objectifs. Ces paramètres et ces variables concernent le bâtiment (sa géométrie, son agencement intérieur, ses constituants, etc.), son contenu (foyers potentiels), et les mesures de sécurité mises en place. Les verrous à lever par la réalisation de cette action de recherche sont alors liés à la diversité des acteurs du projet et à leur langage respectif. Par exemple, pour l’un, une porte présentera une performance en résistance au feu, pour l’autre, elle sera caractérisée par des propriétés thermiques.

Le logiciel en cours de développement extrait les données d’entrée de trois types de fichiers. Le premier type est sous le format IFC (Industry Foundation Classes). Il est produit par un outil CAO communément employé par les architectes. Ce fichier renseigne sur la géométrie des lieux, la position et les dimensions des ouvertures ainsi que sur la nature des matériaux. Le second type de fichier s’apparente à des bibliothèques de données. Il fournit par exemple les propriétés thermiques des matériaux identifiés avec l’outil CAO. Le troisième et dernier type est le fruit des discussions entre les acteurs du projet. Il précise un certain nombre de paramètres essentiels à l’emploi du logiciel tel que par exemple, la définition de l’ENS du projet. En effet, un ENS peut être soit un évènement isolé (décès d’un occupant, destruction d’un local), soit une combinaison d’évènements (décès de plusieurs occupants). Suivant la destination du bâtiment et l’objectif que se fixent les acteurs, l’ENS varie donc.



**Figure 1 : Mode de fonctionnement de l’outil développé**

Une seconde partie du travail effectué sur la période 2010-2013 s'est attaché à adapter et à étendre le logiciel Cifi de simulation du développement du feu et du mouvement de la fumée à l'intérieur d'un bâtiment pour une utilisation stochastique et discrète à l'aide de Schema-SI. Ce travail contribue au premier et au dernier objectif de la recherche. L'adaptation du code Cifi a consisté à restructurer le code en vue de la simulation d'un nombre important d'histoires, et ce, en limitant le nombre de variables de type *pointer/target* associées à chaque classe d'objet et en modifiant le mode d'écriture des sorties pour limiter la mémoire vive nécessaire. Le travail d'extension du code Cifi a consisté à étendre les possibilités des contrôleurs pour Cifi. Ces-derniers permettent de faire le lien entre l'outil de simulation de feu Cifi et l'outil stochastique Schema-SI dans la mesure où, dans chaque histoire, des évènements discrets (ouverture d'une porte, actionnement de l'alarme incendie) agissent sur le foyer et/ou modifient la configuration du bâtiment. Ainsi, la notion de relations logiques de contrôleurs a été ajoutée au code Cifi.

Aujourd'hui, les verrous scientifiques et techniques qui restent à lever pour la réalisation de cette action de recherche portent principalement sur la prise en compte de l'interdépendance entre les technologies, les modes d'organisation, l'Homme et les phénomènes physiques, et ce, pour l'intégration de modes de représentation d'évènements continus, discrets de manière déterministe, stochastique et/ou probabiliste.

Pour appréhender le niveau de sécurité incendie d'un établissement, qui est lui-même dans un environnement (urbanisé par exemple), **un second travail portait sur les conséquences d'une conjonction du vent et des effets du feu**. De manière plus précise, cette recherche s'intéressait à l'influence du vent sur les transferts de masse au sein des réseaux de ventilation de bâtiments complexes, résidentiels et industriels, en situation de fonctionnement normale, dégradée (arrêt de la ventilation) ou accidentelle (surpression interne).

Afin d'étudier ces transferts de masse, une méthodologie permettant d'établir des expérimentations à échelle réduite a été développée pour l'étude des écoulements isothermes, en régime permanent ou transitoire. Cette méthodologie a été validée numériquement et expérimentalement dans la soufflerie climatique Jules Verne du CSTB sur des configurations simples, puis appliquée à deux configurations de référence, représentatives de celles rencontrées dans le domaine industriel.



**Figure 2 : Maquette en soufflerie climatique Jules Verne**

Ces travaux ont permis de mettre en évidence notamment que les effets du vent, couplés ou non à une surpression interne, peuvent entraîner une perte partielle ou globale du confinement des polluants au sein des installations. De plus, la turbulence du vent peut induire des inversions instantanées des débits de fuite, qui ne sont pas identifiées en régime permanent. Par ailleurs, l'analyse de sollicitations transitoires montre la faible influence de l'inertie des branches sur les écoulements transitoires, pour des grandeurs caractéristiques d'une installation réelle. Enfin, des essais de traçage gazeux ont été réalisés afin d'étudier la dispersion d'un polluant au sein d'une configuration de référence soumise aux effets couplés du vent, de la ventilation mécanique et d'une surpression interne.

Aujourd'hui, la question posée à la recherche concerne l'influence du vent sur les transferts de masse au sein des réseaux de ventilation des bâtiments résidentiels et industriels, en situation de feu. De la même manière que précédemment, ces travaux sont menés en collaboration avec le LASIE et l'IRSN. Ils ont débutés en 2012.

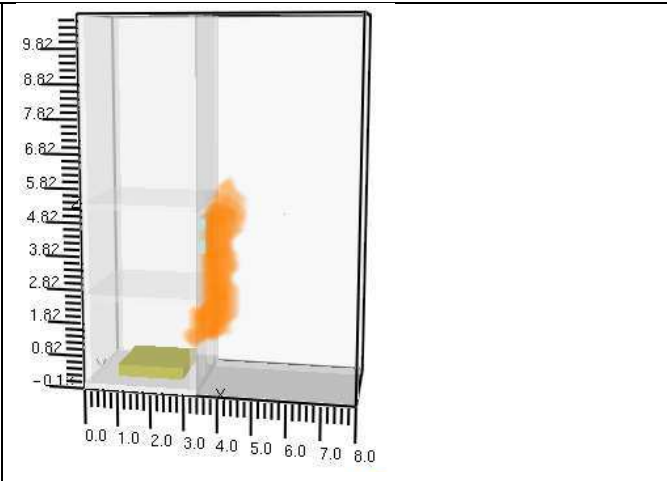
Concernant les effets du vent sur le développement d'un incendie, le CSTB a également mené **un travail de recherche suite à l'incendie du foyer Adoma à Dijon** qui, en novembre 2010, a provoqué la mort de sept personnes. Initié par un feu de poubelle extérieure, dans un angle rentrant du bâtiment, le feu s'est rapidement propagé sur la hauteur de la façade. Les conditions de vent étant fortement marquées lors de cet événement, le travail mené au CSTB a permis d'évaluer l'impact du vent dans la manifestation éventuelle d'un effet de cheminée dans le cas d'une configuration d'angle. Pour ce faire, des simulations numériques ont été réalisées avec l'outil de calcul Fire Dynamics Simulator pour différentes configurations, dont celle qui correspond au cas de l'incendie du foyer



Adoma. Un effet de cheminée, au sens propre du terme, n'a pas été relevé mais l'impact de la vitesse et de l'orientation du vent sur l'orientation des flammes et du panache thermique a pu être mis en évidence.



**Figure 3 : État de la façade après l'incendie**



**Figure 4 : Image de la simulation numérique réalisée avec le code FDS**

## 1.2 AMÉLIORER LES CAPACITÉS PRÉDICTIVES DES MODÈLES NUMÉRIQUES

L'évaluation du niveau de sécurité d'un bâtiment, qu'elle soit conduite de manière déterministe ou probabiliste, repose sur des outils de simulation des phénomènes physiques liés à la dégradation de matériaux (pyrolyse), à la combustion, à l'écoulement de fumée, aux transferts thermiques et au comportement des éléments de structure.

Des nombreuses recherches portent dans le monde sur la modélisation de ces phénomènes. Leurs capacités prédictives sont aujourd'hui questionnées du fait de l'apparition de pratiques architecturales ou de produits et procédés nouveaux, motivés par les exigences du Grenelle concernant la réduction des gaz à effet de serre produits par les bâtiments. Le CSTB a mené entre 2010 et 2013 trois actions de recherche relatives à l'amélioration des capacités prédictives de modèles numériques.

La première action fait suite aux questions soulevées par l'emploi de systèmes de lutte active contre l'incendie de type brouillard d'eau dans les tunnels, les établissements recevant du public et les immeubles de grande hauteur. Cette action a consisté à **évaluer puis à exploiter les capacités prédictives d'un code de calcul pour modéliser l'interaction entre un brouillard d'eau et**

**un feu.** Une application pratique de ce travail de recherche était de définir les conditions d'utilisation de la modélisation pour aider à la compréhension de l'interaction entre une aspersion, un feu et une ventilation forcée. La modélisation peut en effet aider à définir les scénarios d'essais dans des campagnes à échelle réelle, à exploiter les valeurs expérimentales, voire à limiter le nombre d'essais. Cette action de recherche s'appuie sur le code de calcul Fire Dynamics Simulator (FDS) développé par l'institut américain NIST en collaboration avec l'institut finlandais VTT. Ce code présentait notamment trois avantages pour cette action de recherche. Tout d'abord, il est très employé par la communauté scientifique dans le domaine de la science du feu. Cela lui permet de bénéficier d'un large retour d'expérience, notamment sur les feux de bâtiments ou en tunnel. Ensuite, les sources de ce code sont librement disponibles sur le site du NIST, ce qui permet d'implémenter facilement de nouveaux modèles ainsi que de nouvelles sorties. Enfin, sa version 5, puis sa version 6, possèdent un modèle d'aspersion c'est-à-dire un modèle de génération, de transport, d'évaporation et de transfert thermique des gouttes d'eau.

La démarche adoptée a consisté à évaluer puis exploiter l'outil numérique FDS. La recherche a été menée de manière évolutive en commençant par des cas simples d'évaluation du code à l'échelle du laboratoire, pour ensuite s'intéresser à la simulation de feux en tunnel, et enfin aboutir à une étude exploratoire en amont d'une campagne d'essais en bâtiment.

Les travaux réalisés durant le cycle 2010-2013 ont conduit à proposer des améliorations du code FDS concernant les modèles d'évaporation des gouttes d'eau et le modèle de transfert de chaleur rayonnée au travers d'un milieu semi-transparent (méthode de calcul des coefficients d'absorption et de diffusion des gouttes d'eau). Les travaux réalisés sur cette période ont également permis de démontrer la bonne capacité du code à reproduire les phénomènes physiques mis en jeu, illustrant ainsi le fait que le recours à la simulation numérique est un complément intéressant à l'expérimentation pour ce type de cas. Cet outil numérique a ensuite été exploité pour quantifier le rôle énergétique du brouillard d'eau et de chacun des modes de transfert de chaleur associés aux gouttes.

Le CSTB a également participé à la rédaction des manuels du code FDS et à la traduction de l'outil de visualisation en français.

**Par ailleurs, une action de recherche s'est concentrée sur les incertitudes générées lors de simulations numériques d'incendie.** Ces travaux sont motivés par le contexte réglementaire français qui autorise, depuis 2004, le recours à l'approche performantielle. Dans ce cadre, les ingénieurs en sécurité incendie utilisent les outils qui leur semblent nécessaires pour dimensionner une solution de désenfumage ou pour évaluer la résistance au feu d'un élément ou d'une partie de construction. Or, les résultats de simulations numériques intègrent des incertitudes qui ont pour origine soit les choix des modélisations (par exemple, approximation du faible nombre de Mach, modèles de turbulence, rayonnement et combustion utilisés), soit le choix des paramètres (par exemple, conditions aux limites, précision de la reproduction de la géométrie). Ces incertitudes, en se cumulant, posent des questions vis-à-vis de la pertinence des résultats de simulations. L'objectif de l'action de recherche est d'estimer, de manière robuste, ces incertitudes, l'objectif final étant, d'ici quelques années, d'établir un « guide de bonnes pratiques » des outils de simulation feu employés pour l'évaluation du niveau de sécurité d'un bâtiment.

Cette action s'appuie sur le code de calcul Fire Dynamics Simulator, qui présente l'avantage fondamental d'être très employé par la communauté scientifique dans le domaine de la science du feu, parmi lesquels les ingénieurs en sécurité incendie. En outre, le fait que ses sources soient librement disponibles, permet aux chercheurs du CSTB d'implémenter facilement de nouveaux modèles ainsi que de nouvelles sorties nécessaires à l'avancée du travail sur ce thème.

L'approche adoptée consiste à simuler numériquement des configurations, puis à apprécier le degré de précision du code de calcul dans cette configuration via une comparaison avec des données expérimentales de la littérature scientifique. Comme l'action précédente, celle-ci a été menée de manière évolutive de sorte de travailler le plus indépendamment possible sur certaines parties du code pour ensuite s'intéresser à une configuration plus complexe. Ainsi, les chercheurs ont commencé par des cas simples d'évaluations académiques, à savoir des panaches libres et des panaches impactant, pour ensuite s'intéresser à la simulation de configurations qui auraient pu être étudiées par un ingénieur en sécurité incendie, à savoir des feux compartimentés. Le cas des panaches libres a été choisi de manière à se concentrer sur la partie mécanique des fluides du code. Le cas des panaches impactants a été réalisé de manière à employer le modèle de transferts thermiques du code en sus de la mécanique des fluides. Le cas des feux compartimentés a été choisi de manière à se rapprocher des cas d'étude en ingénierie de sécurité incendie.

Les travaux réalisés durant le cycle 2010-2013 ont permis de développer un outil d'estimation des incertitudes. Cet outil a permis, pour chacune des trois configurations, d'évaluer l'influence de paramètres d'entrée (I) sur les résultats numériques, en se basant sur une simulation dite de référence. Pour les cas des panaches libres et impactants, les paramètres dont l'influence a été évaluée sont la nature de la source de chaleur (plaque chauffée, injection de gaz chauds, foyer), la puissance dégagée par celle-ci, la surface impliquée au sol, la température ambiante, la constante de Smagorinsky, et la discrétisation spatiale. Pour le cas des feux compartimentés, en plus de certains des paramètres étudiés pour les cas des panaches libres et impactants, la recherche s'est intéressée à l'influence du modèle de transfert de chaleur au niveau des murs et du plafond, ainsi qu'à l'effet de la ventilation au sein du compartiment.

L'estimation des incertitudes par l'outil développé est effectuée à partir de variable d'intérêt ( $V_i$ ) et du coefficient ( $\gamma_I$ ) du paramètre (I) changé par rapport à la simulation de référence s'écrit :

$$V_i = \frac{1}{S} \iint_{z \text{ fixé}} \frac{T(x, y, z) - T_{\text{ambient}}}{T_0} dx dy \quad \text{Avec } T_0 = T_a^{\text{ref}}$$

$$\alpha_I = \frac{I^{\text{ref}}}{V_i^{\text{ref}}} \frac{dV_i}{dI} = \frac{I^{\text{ref}}}{V_i^{\text{ref}}} \times \frac{V_i(I) - V_i(I^{\text{ref}})}{I - I^{\text{ref}}}$$

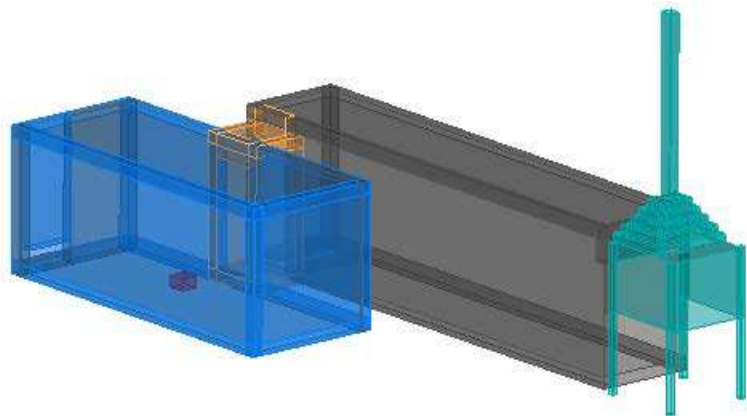
Par ailleurs, dans le cadre de cette action de recherche, une nouvelle méthode de calcul du coefficient d'entraînement ( $\alpha$ ) d'air frais au sein de panaches a été développée puis évaluée via une comparaison à des résultats expérimentaux de la littérature. Cette méthode est basée sur le calcul des flux de masse (G) et de quantité de mouvement (M) au sein d'un panache.

$$G(z) = \iint_S \rho(z) \cdot w(z) dS \quad \text{Flux de masse} \quad M(z) = \iint_S \rho(z) \cdot w(z)^2 dS \quad \text{Flux de quantité de mouvement} \quad \alpha(z) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sqrt{\rho_a} \cdot M(z)} \frac{dG(z)}{dz} \quad \text{Coefficient d'entraînement}$$

### 1.3 PRÉVOIR LE COMPORTEMENT AU FEU DES ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION, ÉQUIPEMENTS ET STRUCTURES

L'approche globale décrite précédemment demande à être alimentée en résultats. Durant la période 2010-2013, ces résultats ont été acquis à travers trois actions de recherche, sur la physique du feu, la résistance des éléments et la réaction des matériaux.

Depuis 2012, **une action de recherche est consacrée à l'étude des mécanismes d'interaction entre la fumée et l'eau pulvérisée**. L'objectif est de caractériser expérimentalement et numériquement l'influence d'une aspersion sur l'environnement stratifié rencontré en cas de feu : une couche chaude et opaque en partie haute et une couche froide et transparente en partie basse. Dans le cadre de cette action, les technologies brouillard d'eau et sprinkler sont toutes deux étudiées dans un but comparatif. La recherche s'appuie sur trois outils : une campagne d'essais menée dans une configuration pièce-couloir à échelle réelle (le local expérimental se trouve au CSTB sur le site de Champs-sur-Marne), le code à champs FDS et un outil numérique développé au LEMTA permettant une étude approfondie des conditions de visibilité dans un milieu fumée-gouttelettes. Ce projet est mené en partenariat avec le LEMTA. Il bénéficie de surcroît du soutien de l'industriel DEF et d'un expert en sciences du feu, le Professeur Jean-Pierre Vantelon.



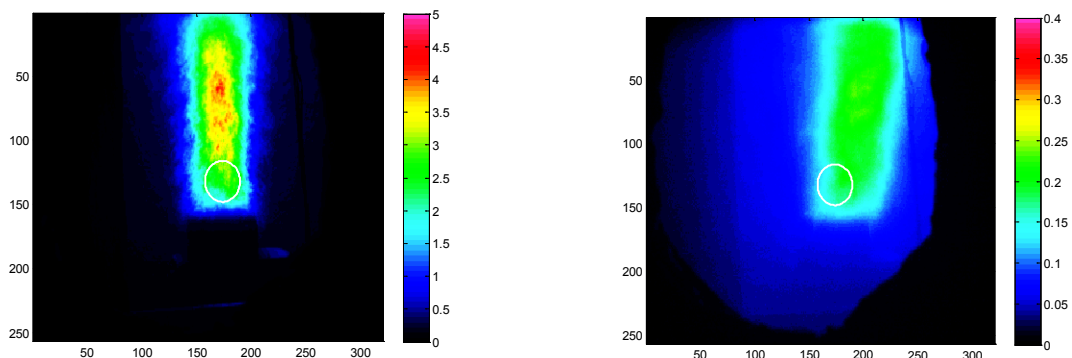
**Figure 5 : Configuration pièce-couloir à échelle réelle**

Un travail numérique préliminaire à la campagne de tests a d'abord permis de définir la configuration et les protocoles expérimentaux, le but étant d'obtenir une couche de fumée homogène et stable le long du couloir et des gradients verticaux suffisants en température et en concentration en suie. Une métrologie a été également développée pour mesurer les phénomènes mis en jeu (refroidissement par puits de chaleur, atténuation du rayonnement dans les domaines infra-rouge et visible).

Une fois l'installation expérimentale configurée, et après plusieurs tests relatifs à la calibration de la métrologie, une première série d'essais ont été conduits, mettant en œuvre pour certains une aspersion par brouillard d'eau. Les résultats d'essais, obtenus en 2013 avec un foyer heptane, ont mis en évidence la stratification thermique et optique de l'environnement dans le couloir avant déclenchement de l'aspersion. Ils ont aussi démontré que ces aspects thermique

et optique sont fortement décorrélés lorsque des gouttes d'eau sont pulvérisées dans le couloir. En effet, l'injection descendante des fines gouttelettes d'eau, alliée à un fort pouvoir d'évaporation, provoque un refroidissement instantané du milieu mais aussi un rabattement de la fumée vers le bas provoquant une perte de visibilité en partie basse.

En parallèle, d'autres essais ont été menés avec la participation du laboratoire LEMTA en se concentrant sur l'interaction entre le brouillard d'eau et le rayonnement issu des flammes. Une métrologie adaptée mise à disposition par le LEMTA, à savoir spectromètre à transformée de Fourier et caméra infrarouge multi-spectrale, ont mis en évidence l'effet bouclier radiatif produit par le brouillard d'eau, dû à l'effet combiné de l'absorption et de la diffusion du rayonnement par les gouttelettes d'eau et la fumée. Durant les essais, un niveau de transmission du rayonnement de l'ordre de 5 % a été mesuré, ce qui, en d'autres termes, signifie que 95 % du rayonnement issu de la source est atténué. Les essais prévus en 2014 avec le système sprinkler permettront de reconduire ces expériences et de les comparer aux résultats obtenus avec brouillard d'eau.



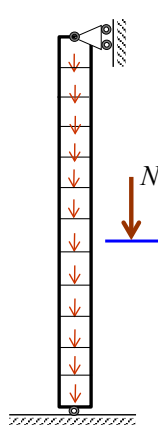
**Figure 6 : Effet d'atténuation du rayonnement issu de la flamme**

Aujourd'hui, les verrous scientifiques et techniques que cette recherche doit contribuer à lever concernent principalement la mesure d'opacité. En effet, des tests en étuve sur la métrologie utilisée jusqu'alors ont mis en évidence une dérive du signal au-delà de 50°C. Par conséquent, la mesure ne pouvait être réalisée sur toute la hauteur du couloir. En 2013, une nouvelle métrologie a ainsi été envisagée. Elle repose sur l'idée de déplacer les éléments thermosensibles hors de la zone enfumée et de conduire le rayonnement à travers un système de fibre optique. La métrologie doit être livrée et assemblée au cours du premier semestre 2014. La mesure d'opacité par fibre optique dans un milieu enfumé

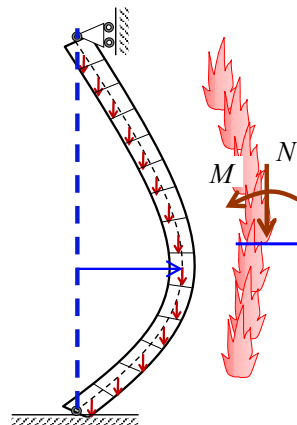
sous aspersion par brouillard d'eau et par sprinkler n'a, à notre connaissance, jamais été réalisée à ce jour.

La bonne connaissance du comportement des structures en situation d'incendie est nécessaire pour arriver à une approche performantielle complète. Depuis 2010, **une action de recherche est consacrée au comportement au feu des éléments de structure en béton armé ou en béton précontraint de grandes dimensions**. Cette action, menée en collaboration avec l'institut Navier, est motivée par le fait qu'il n'existe pas de modèles de comportement au feu pour de tels éléments. En effet, sous l'action du gradient thermique associé à leur exposition au feu, les ouvrages de grandes dimensions subissent des déplacements hors plan importants. Il en résulte alors, du fait de l'excentrement du poids propre, l'apparition de sollicitations de flexion qui, combinées aux efforts de compression (poids propre et précontrainte éventuelle), peuvent provoquer la ruine de l'ouvrage. En outre, les éléments en béton armé ou en béton précontraint sont rendus complexes de par la non-linéarité des propriétés des matériaux et les changements de géométrie.

L'ambition de cette action est de pallier le manque de données sur le comportement des éléments de structure en béton armé de grandes dimensions en fournissant une méthodologie de dimensionnement accessible aux professionnels et en développant un outil d'ingénieur pour la vérification au feu des structures. Elle fait suite à un premier travail mené en 2009 qui avait permis de proposer une approche pour modéliser le comportement au feu des panneaux préfabriqués se présentant sous la forme de bandeaux verticaux mais dont la modélisation demandait à être enrichie pour viser le cas des panneaux en bandeaux horizontaux.



**À température ambiante**

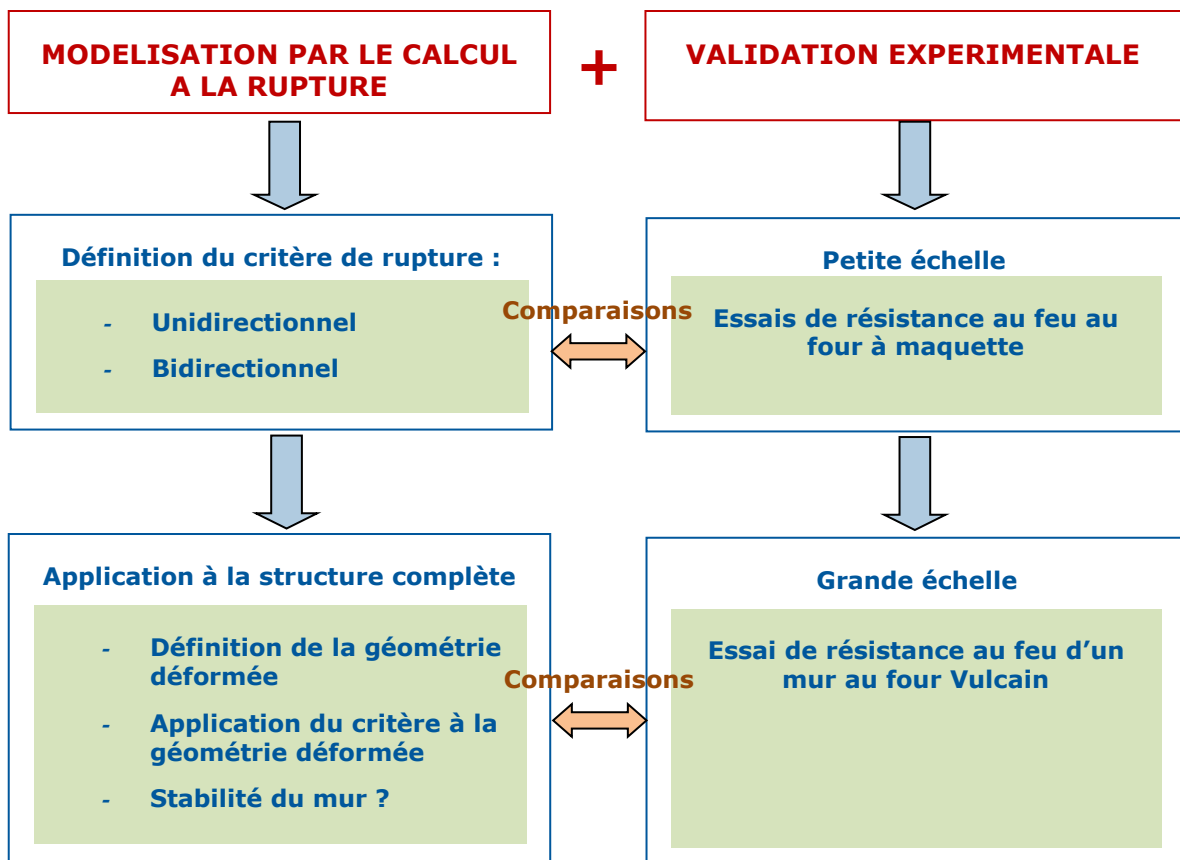


**En conditions d'incendie**

**Figure 7 : Efforts s’exerçant sur un panneau de compartimentage**

La méthode choisie pour cette action est du type calcul à la rupture. Ce type de méthode présente l’avantage de conduire de façon directe et rigoureuse à la détermination des charges limites ou de ruine à partir uniquement de la géométrie et du critère de résistance des matériaux constitutifs de l’élément, et ce, sans prise en compte de l’histoire de chargement, c’est-à-dire en s’affranchissant des difficultés liées à l’utilisation de lois de comportement non-linéaires de type plasticité ou endommagement.

L’approche adoptée sur la période 2010-2013 comprend deux étapes principales, à savoir la définition d’un critère de rupture puis son évaluation via une comparaison avec des résultats issus soit de modélisations de type calcul béton armé, soit de résultats expérimentaux publiés, soit de données expérimentales obtenues à échelle réduite.



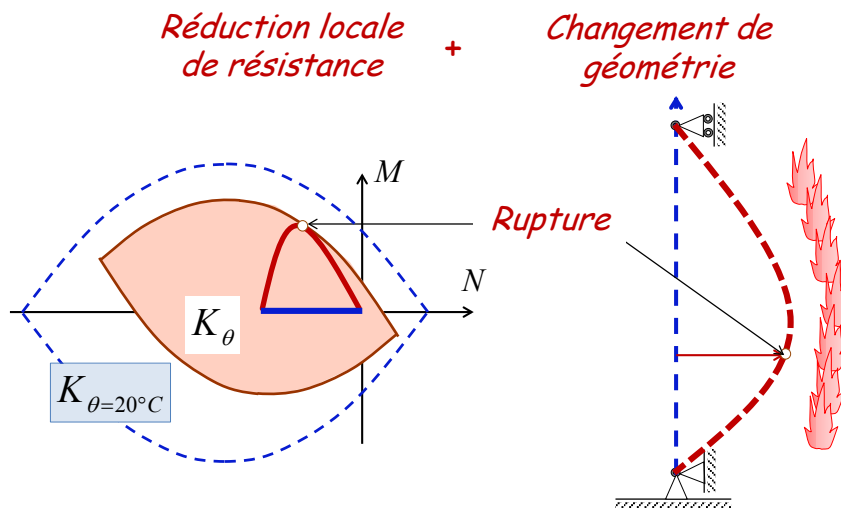
**Figure 8 : Approche adoptée pour le développement d’une méthode d’évaluation du comportement au feu des panneaux de compartimentage en béton de grandes dimensions**

S’appuyant sur un certain nombre d’hypothèses simplificatrices, les travaux réalisés ont permis d’élaborer une démarche complète et cohérente d’évaluation



de la tenue au feu de panneaux de grande hauteur (supérieure à celle des fours d'essais conventionnels). La méthode développée repose sur la théorie du calcul à la rupture, tant pour ce qui concerne la détermination du critère de résistance exprimé sous forme d'un diagramme d'interaction fonction du chargement thermique, que pour ce qui a trait à l'analyse de la tenue des panneaux en configuration déformée.

Parallèlement aux travaux de modélisation, une campagne d'essais, à échelle réduite, a été menée sur le four à maquette sur des dalles en béton armé reposant sur deux appuis. Cette campagne a notamment mis en lumière le rôle que joue l'orientation du renforcement et a permis ainsi d'obtenir des éléments d'informations complémentaires pour généraliser le critère de rupture développé pour une orientation d'armatures quelconque. L'analyse des résultats expérimentaux a permis en outre de vérifier *a posteriori* la pertinence de certaines hypothèses faites sur le comportement des matériaux pour développer la méthode.



**Figure 9 : Analyse à la rupture sous poids propre et chargement thermique du panneau en configuration déformée**

Aujourd'hui, les perspectives pour cette action de recherche sont multiples. Tout d'abord, la démarche développée durant le cycle 2010-2013 pourra être étendue au cas plus complexe des panneaux de grandes dimensions se déformant dans leurs deux directions (grande hauteur et grande longueur) et ce, grâce à une approche par lignes de rupture et à l'enrichissement du critère de rupture avec des paramètres de flexion/compression bidirectionnels, mais aussi de torsion. La démarche pourra également être complétée pour la prise en compte des joints entre panneaux pour arriver à la constitution complète de la méthode d'évaluation à chaud des murs de compartimentage en bandeaux

horizontaux.

Ensuite, du point de vue expérimental, la campagne sur le four à maquette sera complétée par des essais sur dalles en béton armé soumises à une flexion pour différentes combinaisons (M,N) afin de mettre en évidence les effets des efforts membranaires, en sus de l'angle du renforcement, sur la capacité portante des éprouvettes en conditions d'incendie.

Enfin, un essai grandeur réelle sur le grand équipement du CSTB Vulcain sera réalisé en 2014 afin de comparer les résultats obtenus avec ceux issus de la démarche appliquée aux panneaux de grande hauteur décrite ci-avant.

Concernant la réaction au feu des matériaux, **une action de recherche s'est intéressée à la question de la durabilité des performances de réaction au feu** du bois ignifugé. La collaboration avec l'institut FCBA sur ce sujet a permis de réaliser les premiers tests de vieillissement accéléré sur des panneaux bois et de mieux cibler les difficultés techniques inhérentes à ce type de tests.

## **2. COLLABORATIONS**

Pendant le cycle 2010-2013, le CSTB a collaboré avec des partenaires dans le cadre de ses actions de recherche relatives au risque incendie et au développement durable.

### **2.1 COLLABORATION AVEC LES PARTENAIRES ETRANGERS**

Dans le cadre de la convention signée avec le National Institute of Standard and Technology (NIST, USA) en novembre 2009, le NIST a accueilli en 2011 une doctorante du CSTB pour une durée de six mois. Cette dernière a pris part au développement du code de calcul Fire Dynamics Simulator. Le NIST fut également membre du jury de sa thèse en décembre 2011. Les travaux de collaboration autour du code FDS, initiés au cours de cette thèse, ont été poursuivis en 2012 et 2013. Le CSTB a ainsi pris part aux travaux de validation de la nouvelle version du code (FDS 6).

Le CSTB a également aidé son homologue suédois, SP Fire Technology, dans l'organisation de sa conférence ISTSS (International Symposium on Tunnel Safety and Security) qui se déroulera en France en mars 2014.

Enfin, le CSTB a organisé la première conférence internationale sur la sécurité au feu des façades (*1<sup>st</sup> international seminar for fire safety of facade*, 14-15 novembre 2013), pour laquelle il a travaillé avec 18 experts internationaux choisis pour constituer le comité scientifique de cette conférence. Celle-ci a également été l'occasion de renforcer la collaboration avec SP Fire Technology qui a présidé le comité scientifique.

### **2.2 COLLABORATION AVEC LES PARTENAIRES NATIONAUX**

Les travaux de collaboration du CSTB avec ses homologues nationaux étaient étroitement liés aux thèses engagées au cours de ce cycle de recherche. Ces partenaires sont : l'IRSN, l'Université de Haute-Alsace (laboratoire MIPS), l'université de Lyon1 (LMFA), l'université de Lorraine (LEMETA) et l'université Paris Est (laboratoire Navier).

Enfin, dans le cadre de la convention signée en 2009 avec l'École Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-Pompiers (ENSOSP), le CSTB a participé à la formation des officiers de sapeurs-pompiers en 2011, 2012 et 2013. Cet enseignement s'inscrit dans le cadre de la mission du CSTB de soutien aux pouvoirs publics pour accompagner les mutations de la filière construction et

encourager l'innovation. Les enseignements portent sur l'ingénierie du désenfumage et l'ingénierie de la résistance au feu en application du règlement de sécurité, sur la réaction et la résistance au feu et sur les dispositifs d'aspersion à eau.

## CONCLUSION

Le projet de recherche *Risque incendie et développement durable* a pour objectif de garantir la sécurité des personnes et la préservation des biens. Le projet, sur la période 2010-2013, s'est attaché à contribuer au développement d'une approche nouvelle et originale permettant d'évaluer la performance globale d'un bâtiment vis-à-vis du risque incendie en intégrant les comportements et les usages des personnes, son contenu, son organisation, ses équipements et son environnement. Les chercheurs ont mené ce projet avec l'ambition finale de pouvoir étendre la liberté des acteurs du secteur du bâtiment et de promouvoir l'innovation tout en garantissant la sécurité des personnes.

Les axes de travail pour la période 2014-2017 conserveront cette démarche globale de performance vis-à-vis du risque incendie ce, en intégrant le contexte actuel de transition écologique et énergétique marqué par la rénovation massive du parc existant, la mise en œuvre de nouveaux procédés constructifs, par exemple en façade, et par l'emploi de nouveaux systèmes de mise en sécurité. Les travaux engagés au cours de la période 2010-2013 seront pour la plus part poursuivis. Le nouveau grand équipement de recherche du CSTB, le four Vulcain, inauguré en mars 2013, sera un outil précieux pour mener à bien les travaux de ce projet. Il permettra de réaliser une recherche ambitieuse pour contribuer au développement d'une approche performantielle de la résistance au feu. Cette nouvelle période sera également marquée par une collaboration accrue avec les équipes du CSTB travaillant sur la performance énergétique du bâtiment. L'enjeu est de concevoir des ouvrages présentant une qualité globale, en énergétique et en sécurité incendie notamment. Les traiter indépendamment, comme c'est le cas aujourd'hui, peut conduire à des déséquilibres de performance et impose, en tous les cas, des contraintes fortes et quelques fois contreproductives sur les autres aspects d'un bâtiment. Avec une approche mieux intégrée et plus interopérable, il sera possible de mesurer à tout moment les conséquences de l'amélioration d'une performance sur l'ensemble d'un projet architectural donné. Le projet de recherche 2014-2017 sera enfin marqué par une utilisation et un développement accrus des logiciels de calcul, considérés aujourd'hui dans une approche globale, comme des outils primordiaux de prédiction, d'évaluation et d'aide à la décision.

## **ANNEXES**

---

## **ANNEXE 1 : CONTRIBUTEURS DU PROJET**

---

*Nota : les noms suivis d'une \* sont ceux des personnes ayant quitté le CSTB*

### **RESPONSABLES DES ACTIONS DE RECHERCHE**

BLANCHARD Elizabeth  
BONHOMME Martial  
CARLOTTI Pierre \*  
DAGUERRE Jean-Pierre \*  
FAURE Xavier  
FLORENCE Céline  
FROMY Philippe  
LECHÊNE Sullivan  
MARTINEZ-RAMIREZ Bernardo  
NGUYEN Hong Hai

### **CHERCHEURS ASSOCIÉS**

ALLESSANDRINI Jean-Marie  
BLANCHARD Elizabeth  
BONHOMME Martial  
BOUGEARD Philippe  
BOUSSA Hocine  
CARLOTTI Pierre \*  
DAGUERRE Jean-Pierre \*  
DEMOUGE François  
DHIMA Dhionis  
FAURE Xavier  
FLORENCE Céline  
FROMY Philippe  
GIOVANNELLI Gabriel  
HECK Jean-Vivien  
HOGNON Bernard  
LECHÊNE Sullivan  
PARDON Dominique  
MARTINEZ-RAMIREZ Bernardo  
NGUYEN Hong Hai  
SAKJI Seddik  
TAILLEFER Nicolas \*

VALLERENT Stéphanie

**DOCTORANTS**

BLANCHARD Elizabeth

CHANTI Houda

LAMALLE Damien

LE DEZ Thomas

LE ROUX Nicolas

MORLON Romain

MULLER-GRAMLING Anne

PHAM Duc Toan



---

**ANNEXE 2 : LIVRABLES ET PUBLICATIONS**

---

**ARTICLES SCIENTIFIQUES PUBLIÉS DANS DES REVUES À COMITÉ DE LECTURE**

1. MULLER A., DEMOUGE F., JEGUIRIM M., FROMY P., VANTELON J.P. The use of Petri nets and a two-zone model for fire scene reconstruction. *Fire Safety Journal*, 55, January 2013, p. 139-151
2. LE ROUX N., FAURE X., INARD C., SOARES S., RICCIARDI L. Reduced-scale study of wind influence on mean airflows inside buildings equipped with ventilation systems. *Building and Environment*, 58, December 2012, p. 231-244
3. LECHENE S., ACEM Z., PARENT G., JEANDEL G., BOULET P. Upward vs downward injection of droplets for the optimization of a radiative shield. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 54/9-10, April 2011, p. 1689-1697
4. MULLER A., DEMOUGE F., JEGUIRIM M., FROMY P. SCHEMA-SI: a hybrid fire safety engineering tool. Part I: tool theoretical basis. *Fire Safety Journal*, 58, May 2013, p. 132-141
5. MULLER A., DEMOUGE F., JEGUIRIM M., FROMY P. SCHEMA-SI: a hybrid fire safety engineering tool. Part II: case study. *Fire Safety Journal*, 58, May 2013, p. 58-64
6. LE ROUX N., FAURE X., INARD C., SOARES S., RICCIARDI L. Reduced-scale study of transient flows inside mechanically ventilated buildings subjected to wind and internal overpressure effects. *Building and Environment*, 62, April 2013, p. 18-32
7. CARLOTTI P., VALLERENT S., FROMY P., DEMOUGE F. Smoke motion: comparison of experimental data with simulations. *Proceedings of the ICE - Engineering and Computational Mechanics*, 165/4, November 2012, p. 235-244
8. BLANCHARD E., BOULET P., FROMY P., DESANGHERE S., CARLOTTI P., VANTELON J.P., GARO J.P. Experimental and numerical study of the interaction between water mist and fire in an intermediate test tunnel. *Fire Technology*, May 2014, 50/3, p 565-587 .
9. JEGUIRIM M., MULLER A., BRENEZ F., FROMY P., DEMOUGE F., BRILHAC J.F. Reconstruction of an arson fire scene in accommodation unit using fire dynamic simulator. *Journal of Applied Fire Science*, 19/2 2009-2010, p. 133-151
10. FAURE X., LE ROUX N. Time dependent flows in displacement ventilation considering the volume envelope heat transfers. *Building and Environment*, 50, April 2012, p. 221-230
11. BLANCHARD E., BOULET P., DESANGHERE S., CESMAT E., MEYRAND R., GARO J.P., VANTELON J.P. Experimental and numerical study of fire in a midscale test tunnel. *Fire Safety Journal*, 47/1, January 2012, p. 18-31

**COMMUNICATIONS PUBLIÉES DANS DES ACTES**

1. LECHENE S., ACEM Z., PARENT G., COLLIN A., BOULET P. Radiative shielding by water mist: comparisons between downward, upward and impacting injection of droplets. Eurotherm 5/16 conference n°95: Computational thermal radiation in participating media IV, April 18-20, 2012, Nancy, FRA, Journal of Physics: Conference Series, 369, 2012, 10 p.
2. LE ROUX N., FAURE X., INARD C., SOARES S., RICCIARDI L. Study of the influence of wind on the containment of pollutants inside industrial buildings. Ventilation 2012, 10th International conference on industrial ventilation, September 17-19, 2012, Paris, FRA, 6 p.
3. BLANCHARD E., BOULET P., CARLOTTI P. Capability of a CFD tool for assessing a water mist system in a tunnel. ISAVFT 15, 15th International Symposium on aerodynamics, ventilation & fire in tunnels, September 18-20, 2013, Barcelona, ESP, p. 717-727
4. CARLOTTI P., LAMALLE D. Sensitivity to boundary conditions for simulations of fire plumes in enclosures. CFM 2013, 21e Congrès français de mécanique, 26-30 août 2013, Bordeaux, FRA, 6 p.
5. MORLON R., BOULET P., PARENT G., LECHENE S., BLANCHARD E., REBUFFAT C., FROMY P., VANTELON J.P., BALAYRE C. Experimental and numerical studies of smoke/mist interactions in a corridor. Interflam 2013, 13th International fire science & engineering conference, June 24-26, 2013, Egham, GBR, p. 339-350
6. PHAM D.T., DE BUHAN P., FLORENCE C., NGUYEN H.H. Analytical interaction diagrams for reinforced concrete sections in fire conditions. Interflam 2013, 13th International fire science & engineering conference, June 24-26, 2013, Egham, GBR, p. 1095-1106
7. LAMALLE D., CARLOTTI P., SALIZZONI P., PERKINS R.J. Simulation aux grandes échelles de panaches. CFM 2013, 21e Congrès français de mécanique, 26-30 août 2013, Bordeaux, FRA, 6 p.
8. MORLON R., LECHENE S., BLANCHARD E., FROMY P., BOULET P., PARENT G., VANTELON J.P., BALAYRE C., GUILLOU M. Etude expérimentale des interactions entre fumées et aspersion. SFT 2013, Congrès français de thermique, 28-31 mai 2013, Gérardmer, FRA, 8 p.
9. PHAM D.T., DE BUHAN P., FLORENCE C., HECK J.V., NGUYEN H.H. Approche par la théorie du calcul à la rupture du dimensionnement au feu de panneaux de grande hauteur. CFM 2013, 21e Congrès français de mécanique, 26-30 août 2013, Bordeaux, FRA, 6 p.
10. MORLON R., LECHENE S., BOULET P., PARENT G., BLANCHARD E., FROMY P., BALAYRE C. Experimental study of smoke/mist interactions in a configuration combining a corridor adjacent to a room. CFM 2013, 21e Congrès français de mécanique, 26-30 août 2013, Bordeaux, FRA, 6 p.
11. LOVAS S., CARLOTTI P., DESANGHERE S., MOS A. Optimization of the repartition of extraction vents in transverse ventilation. ISAVT 14, Proceedings of the 14th international symposium on aerodynamics and ventilation of tunnels, May 11-13, 2011, Dundee, GBR, BHR Group Ltd, 2011, p. 199-209
12. BLANCHARD E., BOULET P., DESANGHERE S., CESMAT E. Use of Computer Modelling for the Interpretation of Midscale Tunnel Fire Test Results. Interflam

- 2010, 12th International Fire Science & Engineering Conference, July 5-7, 2010, Nottingham, GBR, 13 p.
13. BLANCHARD E., BOULET P., DESANGHERE S., CARLOTTI P. Energy balance in a tunnel fire: midscale tests and CFD simulations. ISAVT 14, Proceedings of the 14th international symposium on aerodynamics and ventilation of tunnels, May 11-13, 2011, Dundee, GBR, BHR Group Ltd, 2011, p. 349-362
  14. BLANCHARD E., DESANGHERE S., BOULET P. Quantification of energy balance during fire suppression by water mist in a mid-scale test tunnel. Fire Safety Science, Proceedings of the 10th international symposium, June 19-24, 2011, College Park, University of Maryland, USA, p. 119-132
  15. MULLER A., DEMOUGE F., JEGUIRIM M., FROMY P., BRILHAC J.F. SCHEMA-SI: a hybrid fire safety engineering tool. MCS-7, Proceedings of the 7th Mediterranean Combustion Symposium, September 11-15, 2011, Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, ITA, 12 p.
  16. BLANCHARD E., BOULET P., CARLOTTI P., COLLIN A., JENFT A., LECHENE S. Modeling water spray: from laboratory scale to fire safety application. FireSeat 2011, "The Science of suppression", November 9, 2011, Edinburgh, GBR, p. 63-78
  17. PHAM D.T., DE BUHAN P., FLORENCE C., HECK J.V., NGUYEN H.H. Yield design-based analysis of high rise concrete walls subjected to fire loading conditions, SIF 2014, 12-14 février 2014, Poitiers, FRA
  18. PHAM D.T., DE BUHAN P., FLORENCE C., HECK J.V., CHARUEL S., AVENEL R. Reinforced concrete slabs in fire: experimental investigations on reinforcement mesh orientation, SIF 2014, 12-14 février 2014, Poitiers, FRA
  19. DELPECH P., DUFRESNE DE VIREL M., TETARD Y. Snow load testing of smoke vents. Snow Engineering 7, June 6-8, 2012, Fukui, JPN, 11 p.

## **RAPPORTS**

1. CARLOTTI P. Éléments de mécanique des fluides pour la modélisation des incendies, 2013, 172 p.
2. BONHOMME M. Durabilité des performances de réaction au feu, 2012, 16 p.
3. LOVAS S., CARLOTTI P. Smoke motion in large enclosures: comparison of experimental data with simulations, 2011, 43 p.
4. Opacimétrie, visibilité et rayonnement dans le cadre de l'utilisation des brouillards d'eau : interactions eau - feu - fumées et conséquences sur la visibilité, 2011, 25 p.
5. HOGNON B. Feux naturels : exemples de séries d'essais réalisés sur la base feu du CSTB, 2012, 11 p.
6. LOVAS S., CARLOTTI P., DESANGHERE S. Optimization of the repartition of extraction vents in transverse ventilation, 2011, 54 p.
7. DEMOUGE F., FROMY P. CIFI2009 : application d'un modèle à deux zones gazeuses à l'étude de l'influence des caractéristiques d'un local sur l'activité d'un feu s'y développant. Rapport final, 2010, 67 p.
8. BLANCHARD E., DESANGHERE S. Utilisation de brouillard d'eau en tunnel : étude bibliographique et confrontation de simulations et d'essais à l'échelle 1/3, 2010, 165 p.
9. HOGNON B. Note sur l'essai LEPİR 2 et son application à deux ETICS, 2010, 31 p.

10. MULLER A. Développement d'une méthode de modélisation pour l'évaluation de la performance de stratégies de sécurité incendie, Th. doct. Génie des procédés, Université de Haute-Alsace, décembre 2010, 243 p.
11. BLANCHARD E. Modélisation de l'interaction entre un brouillard d'eau et un feu en tunnel, Th. doct. Mécanique et énergétique, Université Henri Poincaré - Nancy I, novembre 2011, 219 p.

### **CONFERENCE ORGANISÉE**

1. VALLERENT S., FLORENCE C., (Eds.) Proceedings of 1<sup>st</sup> International Seminar on Fire Safety of Facades, 14-15 Novembre 2013, Paris, FRA. *Matec Web of Conferences*, 9, EDP Sciences

---

**ANNEXE 3 : THÈSES SOUTENUES ET HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES OBTENUES ENTRE 2010 ET 2013**

---

**THÈSES****Elizabeth BLANCHARD – thèse soutenue le 4 novembre 2011**

Sujet : Modélisation de l'interaction entre un brouillard d'eau et un foyer : application à la sécurité contre l'incendie en tunnel

## Résumé :

Ce travail de thèse est consacré à l'étude de l'interaction entre une aspersion par brouillard d'eau et un feu. Il s'appuie sur une modélisation existante figurant dans le code à champs Fire Dynamics Simulator. L'approche consiste en premier lieu à appréhender, par le biais d'une synthèse bibliographique, les phénomènes physiques mis en jeu lors d'un feu en tunnel et lors d'une aspersion par brouillard d'eau. Ensuite, un travail d'évaluation est mené. L'évaluation se veut évolutive, en commençant par des cas simples à l'échelle du laboratoire afin de travailler le plus indépendamment possible sur certaines parties du modèle d'aspersion, pour ensuite s'intéresser à la configuration tunnel. Ce travail d'évaluation permet de mieux cerner les aptitudes du code à simuler les phénomènes physiques mis en jeu lors d'un feu en tunnel soumis ou non à une aspersion. Des comparaisons sont effectuées avec plusieurs essais réalisés entre 2005 et 2008 sur une maquette de tunnel à échelle 1/3. Une fois cette évaluation accomplie, l'outil est exploité pour améliorer notre compréhension des phénomènes d'interaction entre le brouillard d'eau, la ventilation du tunnel et le feu. En particulier, l'influence de l'aspersion sur l'écoulement longitudinal est analysée, le rôle énergétique du brouillard d'eau est mesuré et les modes de transfert de chaleur associés aux gouttes sont quantifiés. Cette exploitation permet également d'évaluer numériquement l'influence de quelques paramètres sur l'efficacité de l'aspersion telles que la vitesse de ventilation longitudinale, la puissance du feu et la taille des gouttes pulvérisées. En dernier lieu, le code à champs est exploité dans le cadre d'une étude numérique exploratoire en vue d'une campagne d'essais en bâtiment pour appréhender l'interaction entre l'aspersion, la nappe de fumée et le désenfumage mécanique.

La thèse est disponible en ligne à l'adresse suivante : [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD\\_T\\_2011\\_0103\\_BLANCHARD.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2011_0103_BLANCHARD.pdf)

**Nicolas LEROUX – thèse soutenue le 5 décembre 2011**

Sujet : Étude par similitude de l'influence du vent sur les transferts de masse et de chaleur dans les bâtiments complexes

Résumé :

Les bâtiments résidentiels et industriels munis d'un réseau de ventilation constituent des installations complexes, susceptibles d'être le siège de transferts de masse et d'énergie variés, selon les situations de fonctionnement. Afin d'étudier ces transferts de masse, une méthodologie permettant d'établir des expérimentations à échelle réduite pour l'étude des écoulements isothermes, en régime permanent ou transitoire, a été développée. Cette méthodologie a été validée numériquement et expérimentalement sur des configurations simples, puis appliquée à deux configurations de référence, représentatives de celles rencontrées dans le domaine nucléaire.

L'influence du vent sur les transferts de masse au sein de ces configurations, en situation de fonctionnement normale, dégradée (arrêt de la ventilation) ou accidentelle (surpression interne), a été étudiée dans la soufflerie climatique Jules Verne du CSTB. Les effets du vent, couplés ou non à une surpression interne, peuvent alors entraîner une perte partielle ou globale du confinement des polluants au sein des installations. De plus, la turbulence du vent peut induire des inversions instantanées des débits de fuite, qui ne sont pas identifiées en régime permanent. Par ailleurs, l'analyse de sollicitations transitoires montre la faible influence de l'inertie des branches sur les écoulements transitoires, pour des grandeurs caractéristiques d'une installation réelle. Enfin, des essais de traçage gazeux ont été réalisés afin d'étudier la dispersion d'un polluant au sein d'une configuration de référence soumise aux effets couplés du vent, de la ventilation mécanique et d'une surpression interne.

La robustesse du code à zones Sylvania, utilisé notamment pour appuyer les évaluations de sûreté des installations nucléaires, a été analysée à partir de ces résultats expérimentaux. La prise en compte des phénomènes physiques observés expérimentalement a été validée, en régimes permanent et transitoire. Toutefois, quelques limitations ont été identifiées pour l'étude de la dispersion d'un scalaire passif, du fait des hypothèses utilisées dans le code Sylvania, comme dans tout code à zones (concentration homogène dans les locaux, propagation instantanée dans les branches et dans les locaux).

La thèse est disponible en ligne à l'adresse suivante :

[http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation\\_recherche/Theses/Theses-soutenues/DSU/Documents/2011-these-Le\\_Roux.pdf](http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation_recherche/Theses/Theses-soutenues/DSU/Documents/2011-these-Le_Roux.pdf)

**Anne MULLER- GRAMLING – thèse soutenue le 8 décembre 2010**

Sujet : Développement de méthodes de diagnostic et d'évaluation de la sécurité incendie

Résumé :

Aujourd'hui en France, l'évaluation de la performance de stratégies de sécurité à déployer pour mettre un bâtiment en sécurité vis-à-vis de l'incendie repose sur une étude d'ingénierie en sécurité incendie. Cette étude a pour objectif l'estimation du risque incendie pour différentes stratégies, et pour des scénarios d'incendies jugés pertinents. Pour parvenir à cette estimation, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment français (CSTB) a mis au point un outil de simulation appelé Schema-SI. Cet outil utilise des réseaux de Petri prédicat-transition différentiels orientés objets et des simulations de Monte Carlo pour générer de multiples scénarios d'incendie. Ces scénarios sont ensuite utilisés pour évaluer le risque incendie encouru avec une stratégie de sécurité. La stratégie est alors jugée d'autant plus performante que le risque incendie est faible. L'objectif de la thèse consiste { contribuer au développement d'une méthode d'analyse de risque incendie utilisant l'outil de simulation Schema-SI. La réflexion a débuté par la définition de ce que devrait être cette méthode. A ce stade, il est apparu que l'une des difficultés que la méthode doit surmonter est celle de la mise en données du problème par un groupe d'acteurs impliqués dans la sécurité incendie du bâtiment étudié. Pour résoudre cette difficulté, une méthode de modélisation spécifique a été construite. Cette méthode, baptisée ISISystema, repose sur deux fondements principaux :

d'une part, un langage graphique de modélisation permettant au groupe d'acteurs de réfléchir à la mise en données du problème en s'appuyant sur une approche systémique ;

d'autre part, une démarche de traduction des modèles graphiques obtenus avec le langage systémique en réseaux de Petri compatibles avec Schema-SI.

Enfin, une application pratique de cette méthode de modélisation est proposée.

La thèse est disponible en ligne à l'adresse suivante : [http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/68/03/73/PDF/These\\_Anne\\_Muller.pdf](http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/68/03/73/PDF/These_Anne_Muller.pdf)

**HABILITATIONS À DIRIGER DES RECHERCHES**

Nom	Titre	Soutenance
DHIMA Dhima	Ingénierie de la sécurité incendie : comportement au feu des assemblages bois ; identification des caractéristiques thermo physiques des matériaux de protection	avril 2013
CARLOTTI Pierre	Éléments de mécanique des fluides pour la modélisation des incendies  Disponible à l'adresse suivante : <a href="http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00978098">http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00978098</a>	septembre 2013



**SIEGE SOCIAL**

84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2  
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33) 01 60 05 70 37 | [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

**CSTB**  
*le futur en construction*

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS