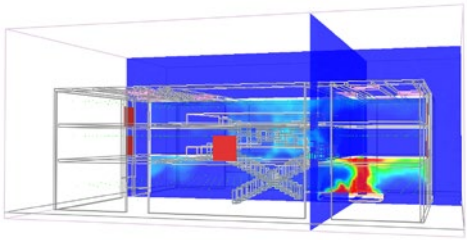
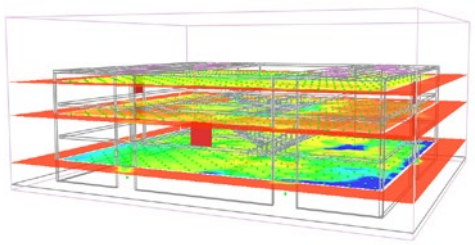
MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR

PRÉFECTURE DE POLICE



GUIDE DE BONNES PRATIQUES POUR LES ÉTUDES D'INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE

ÉTABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC



LCPP

LABORATOIRE CENTRAL DE LA PRÉFECTURE DE POLICE

MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR
PRÉFECTURE DE POLICE

GUIDE DE BONNES PRATIQUES POUR LES ÉTUDES D'INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE

ÉTABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC

Ce document s'adresse à tous les acteurs impliqués dans une étude d'ingénierie du désenfumage et tout particulièrement aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre.

PARTICIPANTS

Ce guide a été élaboré par le Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP), avec la participation de plusieurs partenaires, que nous remercions pour leur concours.

Le groupe de travail conduit par madame Anne Thiry-Muller, ingénieure au LCPP, était constitué de représentants de maîtres d'ouvrage privés et publics, des 5 organismes reconnus compétents en ingénierie du désenfumage au moment de la rédaction du guide*, de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP), de la Fédération Nationale des Sapeurs-Pompiers de France (FNSPF), de la Direction Générale de la Gestion de Crise et des Risques Courants (DGSCGC – ministère de l'Intérieur), de la Direction Générale des Patrimoines (DGP – ministère de la Culture et de la Communication) et du Centre d'Étude des Tunnels (CETU).

** Dans l'ordre alphabétique : Centre National de Prévention et de Protection (CNPP), Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Efectis France, Laboratoire National d'Essai et de Métrologie (LNE), WSP France. D'autres organismes ont été reconnus compétents depuis cette date (liste actualisée disponible sur le site du ministère de l'Intérieur).*

PRÉAMBULE

Pierre Carlotti – Directeur du LCPP

Introduites en 2004, les études d'ingénierie du désenfumage dans les établissements recevant du public sont maintenant des objets matures. Elles ne sont plus aujourd'hui réservées aux projets de grande envergure. Le nombre d'organismes reconnus compétents est passé de 2 à 7, et il est probable que ce nombre va encore croître. Les actions de formation menées, notamment au sein de l'École Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-Pompiers, ont été une tribune pour l'implantation de cette ingénierie et ont contribué à élargir son usage.

Le Laboratoire Central de la Préfecture de Police possède une expérience forte en matière d'ingénierie du désenfumage, notamment du fait qu'il exerce son activité sur Paris et la petite couronne, territoire sur lequel, en un peu plus de douze ans, plus d'une cinquantaine d'études ont été réalisées. De plus, depuis 2012, le Laboratoire Central réalise au profit de la Direction générale de la Sécurité civile et de la gestion de crise une mission d'instruction du volet technique des candidatures à la reconnaissance de compétence.

Depuis 2004, les outils de calculs numériques ont beaucoup évolué, et ils permettent aujourd'hui une précision et une valeur ajoutée fortes, dès lors que leur emploi est fait avec doigté et que les scénarios choisis sont pertinents.

Nous avons voulu le présent guide utile en premier lieu aux maîtres d'ouvrage, afin qu'ils puissent s'en servir pour préparer leur démarche de choix d'organismes reconnus compétents, et pour ce faire, il a été nécessaire, sans pour autant en sacrifier le contenu technique et scientifique, d'avoir une démarche pédagogique. Il a été rédigé, sous le pilotage du Laboratoire Central, par un groupe plénier regroupant une vingtaine d'acteurs, dont, notamment, des maîtres d'ouvrage privés et publics, des sapeurs-pompiers, des organismes reconnus compétents et des représentants de deux ministères, dont celui de l'Intérieur. Pour les parties les plus techniques, des travaux en sous groupe avec l'ensemble des organismes reconnus compétents ont été menés.

Les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre trouveront dans le chapitre 1 une clarification du rôle et des responsabilités de chacun, ainsi qu'une aide à la rédaction des clauses techniques relatives à la commande d'une étude de désenfumage. La vie administrative d'un dossier d'ingénierie du désenfumage y est également décrite, leur permettant d'anticiper au mieux les contraintes temporelles. La lecture des premiers paragraphes des chapitres suivants leur permettra également d'appréhender rapidement les grands principes de l'ingénierie de désenfumage ainsi que la sémantique associée.

Les chapitres 2 à 4 donnent une description des éléments inhérents à l'ingénierie de désenfumage. Ces éléments, indispensables pour le maître d'ouvrage, sont aussi utiles pour les membres des commissions de sécurité.

Les organismes reconnus compétents trouveront aussi un certain nombre de points que nous espérons utiles, notamment dans les chapitres 2 et 3, ainsi que dans les annexes.

SOMMAIRE

INTRODUCTION 10
Le désenfumage, une composante de la stratégie de sécurité incendie

1 INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE 11

1 1 DÉFINITIONS 11

1 2 ACTEURS IMPLIQUÉS 11
1 2 1 Maître de l'ouvrage ou d'ouvrage 11
1 2 2 Exploitant ou responsable de l'établissement 12
1 2 3 Maître de l'œuvre ou d'œuvre 12
1 2 4 Entreprise chargée de l'exécution des travaux 13
1 2 5 Contrôleur technique 13
1 2 6 Commission de sécurité 13
1 2 7 Organisme reconnu compétent 13

1 3 RECOURS À L'INGÉNIERIE DE DÉSENFUMAGE ET SES CONSÉQUENCES 14
1 3 1 Recours à l'ingénierie 14
1 3 2 Conséquences possibles de l'étude d'ingénierie 14

1 4 VIE ADMINISTRATIVE D'UN DOSSIER D'INGÉNIERIE DE DÉSENFUMAGE 15

1 5 DISPOSITIONS CONTRACTUELLES À ENVISAGER ENTRE L'ORGANISME RECONNU COMPÉTENT ET LA MAÎTRISE D'OUVRAGE 18
1 5 1 Expression du besoin de la maîtrise d'ouvrage 18
1 5 2 Autres échanges à prévoir entre l'organisme reconnu compétent et la maîtrise d'ouvrage 18
1 5 3 Documents produits par l'organisme reconnu compétent 18

2 SCÉNARIOS D'INCENDIE DE DIMENSIONNEMENT 20

2 1 DÉFINITIONS ET PRINCIPES D'ÉLABORATION DES SCÉNARIOS D'INCENDIE DE DIMENSIONNEMENT 20

2 2 BÂTIMENT ET INSTALLATIONS DE SÉCURITÉ 21
2 2 1 Modélisation du bâtiment et de ses propriétés 21
2 2 2 Prise en compte de l'installation de désenfumage 22
2 2 3 Prise en compte d'autres mesures de sécurité 23

2 3 FEUX DE DIMENSIONNEMENT 23
2 3 1 Définitions, phénomènes, ordres de grandeurs 23
2 3 2 Élaboration des feux de dimensionnement 24

2.4 ESTIMATION DE LA DURÉE D'ÉVACUATION DES PERSONNES 26
2.4.1 Définitions et phénomènes 27
2.4.2 Recommandations concernant l'estimation de la durée d'évacuation 30

2.5 ENVIRONNEMENT ET CONDITIONS EXTÉRIEURES 30

3 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'INSTALLATION DE DÉSENFUMAGE 31

3.1 DÉFINITIONS 31

3.2 DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE 31
3.2.1 Méthode absolue 32
3.2.2 Méthode relative 32
3.2.3 Lien entre objectif de sécurité et choix de méthode 33

3.3 ÉLÉMENTS PERMETTANT D'APPRÉCIER LA PERFORMANCE D'UNE INSTALLATION DE DÉSENFUMAGE 33
3.3.1 Grandeurs physiques 33
3.3.2 Critères d'acceptabilité, seuils d'acceptabilité 35
3.3.3 Analyse qualitative des résultats 36
3.3.4 Analyse quantitative des résultats 36

4 ESSAIS DE DÉSENFUMAGE *IN SITU* 40

4.1 DÉFINITIONS 40

4.2 OBJECTIFS DES ESSAIS DE DÉSENFUMAGE ACCOMPAGNANT UNE ÉTUDE D'INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE 40

4.3 DISPOSITIONS À METTRE EN ŒUVRE LORS DE LA RÉALISATION DES ESSAIS 41

NOTA FINAL 42

A 1 MODÈLES IMPLIQUÉS DANS L'INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE 43

A 1 1 MODÈLES DE FEU ET DE FUMÉES 43
A 1 1 1 Modèles analytiques 43
A 1 1 2 Modèles numériques de zone 43
A 1 1 3 Modèles numériques de champ 44

A 1 2 MODÈLES D'ÉVACUATION DES PERSONNES EN SITUATION D'INCENDIE 46

A 1 3 VÉRIFICATION ET VALIDATION DES MODÈLES, DES OUTILS DE CALCUL 48

A 2 DONNÉES POUR LES SCÉNARIOS D'INCENDIE DE DIMENSIONNEMENT 49

A 2 1 FEUX IMPOSÉS 49
A 2 1 1 Détail des feux imposés possibles 49
A 2 1 2 Feu à sélectionner parmi les feux possibles 50

A 2 2 BÂTIMENT, INSTALLATION DE DÉSENFUMAGE 52
A 2 2 1 Extension du maillage autour du bâtiment 52
A 2 2 2 Écoulement dans un conduit, à travers une section 53
A 2 2 3 Reproduction des obstacles 53
A 2 2 4 Considérations spécifiques au désenfumage naturel 53
A 2 2 5 Considérations spécifiques au désenfumage mécanique 53

A 3 CALCUL DE LA SOLLICITATION POUR L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU DÉSENFUMAGE 54

A 3 1 DÉTAIL PAS À PAS DU CALCUL DE LA SOLLICITATION, POUR UN LOGICIEL AYANT RECOURS À LA SIMULATION DES GRANDES ÉCHELLES 54
A 3 1 1 Étape 1 : identification de la zone d'intérêt 54
A 3 1 2 Étape 2 : échantillonnage de la zone 55
A 3 1 3 Étape 3 : collecte des données brutes 55
A 3 1 4 Étape 4 : calcul d'une moyenne temporelle à fenêtre gaussienne glissante centrée pour la grandeur obtenue en chaque point 57
A 3 1 5 Étape 5 : calcul de la moyenne spatiale des grandeurs obtenues à l'étape 4 pour tous les points de mesure 58

A316 Étape 6 : calcul de l'écart-type des grandeurs obtenues à l'étape 4 pour tous les points de mesure 59
A317 Étape 7 : calcul de la sollicitation 60

A32 CONSIDÉRATIONS ADDITIONNELLES QUANT À CETTE MÉTHODE DE CALCUL 61
A321 Clefs de lecture 61
A322 Pourquoi cette méthode de calcul ? 63

A4 TYPES D'ESSAIS DE DÉSENFUMAGE *IN SITU* ET ÉLÉMENTS PERMETTANT DE CHOISIR L'ESSAI APPROPRIÉ 64

A41 INTÉRÊT DES MESURES ET ESSAIS IN SITU 64

A42 TYPES D'ESSAIS DE DÉSENFUMAGE 64
A421 Essais aérauliques 64
A422 Essais de fumées 65
A423 Source thermique 65

A43 CHOIX DU TYPE D'ESSAI À RÉALISER 65
A431 Lien entre l'approche de la gestion de fumée et les essais 66
A432 Lien entre les contraintes liées au site et les essais de fumées 66

DANS LE TEXTE, LES SYMBOLES SUIVANTS RENVOIENT :

12 aux chapitres du présent document

A2 aux annexes du présent document

Fig. Tab. aux illustrations listées page 68

G aux termes définis dans le glossaire page 69

B aux références bibliographique page 72

INTRODUCTION

Le désenfumage, une composante de la stratégie de sécurité incendie

En France, les règles à respecter en matière de sécurité incendie dans les établissements recevant du public sont édictées par le « règlement de sécurité contre l'incendie relatif aux établissements recevant du public » B1, initialement approuvé par l'arrêté du 25 juin 1980, par les arrêtés relatifs aux dispositions particulières [1] et aux établissements dits spéciaux [2]. Dans la suite de ce guide, cet ensemble de textes est appelé simplement « règlement de sécurité ».

Le désenfumage fait partie des mesures prescrites dans ce règlement. L'article DF 1 en annonce l'objet. Plus précisément, il s'agit : d'une part d'extraire, en début d'incendie, une partie des fumées et des gaz de combustion afin de maintenir praticables les cheminements utilisés pour l'évacuation du public ; d'autre part de concourir à limiter la propagation de l'incendie et à faciliter l'intervention des secours. Toutefois, le désenfumage n'est pas de nature à assurer seul la sécurité incendie d'un bâtiment. C'est la raison pour laquelle d'autres mesures de sécurité sont prévues par le règlement (p. ex. : les dispositions constructives). Le présent guide porte uniquement sur le désenfumage. Il ne traite pas de l'évaluation par l'ingénierie des capacités de stabilité, d'étanchéité aux gaz et d'isolation thermique des produits, des éléments de construction et d'ouvrages (résistance au feu).

Les dispositions réglementaires relatives au désenfumage, figurant dans le règlement de sécurité, indiquent quels sont les espaces qui doivent être désenfumés dans chaque type d'établissement recevant du public. De plus, le dimensionnement d'une installation de désenfumage peut être réalisé selon l'une ou l'autre des possibilités suivantes : *(i)* soit l'application des solutions toutes faites prévues par les instructions techniques numéros 246 et 263 ; *(ii)* soit le dimensionnement d'une solution sur mesure, par exemple en faisant appel à l'ingénierie du désenfumage [3]. Dans le premier cas, les objectifs de sécurité prévus à l'article DF 1 sont réputés atteints, sans qu'aucune autre justification ne soit exigible que celle du respect des règles d'installation prescrites. En revanche, dans le second cas, il s'agit de prouver que le désenfumage est acceptable. Cela revient à prouver qu'il est suffisamment efficace, au regard de certains objectifs dits ***objectifs de sécurité*** G.

[1] Par exemple, les arrêtés du 22 décembre 1981 (magasins de vente et centres commerciaux) et du 21 juin 1982 (restaurants et débits de boissons).

[2] Par exemple, les arrêtés des 24 décembre 2007 (gares) et du 9 mai 2006 (parcs de stationnement).

[3] Dans le cadre de l'article DF 4 § 2 et du paragraphe 8 de l'instruction technique n°246 en vigueur depuis 2004.

Le présent chapitre détaille, de manière formelle, le processus de recours à l'ingénierie de désenfumage et ses conséquences. Il clarifie également le rôle et les responsabilités des différents acteurs impliqués, ainsi que les échanges à prévoir entre eux.

1 INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE

1 1 DÉFINITIONS

Selon la norme NF EN ISO 13 943 de mars 2011 B 2, l'*ingénierie de la sécurité incendie* G désigne « l'application des méthodes d'ingénierie fondées sur des principes scientifiques au développement ou à l'évaluation de conceptions dans un environnement bâti au moyen de l'analyse de *scénarios d'incendie* G spécifiques (...) ». Un *environnement bâti ou construit* G y est défini comme un « immeuble ou autre structure ». En France, l'*ingénierie du désenfumage* G désigne l'application de ces méthodes dans le but d'évaluer l'acceptabilité d'une installation de désenfumage dans un ou plusieurs espaces prédéfinis (p. ex. : une circulation, un local, un atrium...). Ainsi, une étude d'*ingénierie du désenfumage* G est la mise en œuvre d'une démarche d'ingénierie du désenfumage pour une ou plusieurs zones de désenfumage. Une *zone de désenfumage* G (ZF) est une « zone géographique dans laquelle la fonction de désenfumage est assurée », selon la norme NF S 61-931 de février 2014 B 3. L'étude de désenfumage repose sur des scénarios d'incendie spécifiques, appelés *scénarios d'incendie de dimensionnement* G et définis au paragraphe 2. Dans un établissement recevant du public, l'étude revient à prouver, généralement par le calcul numérique, qu'au minimum l'objectif de sécurité premier évoqué à l'article DF 1 du règlement de sécurité est atteint (maintien de cheminements praticables pour l'évacuation du public). Cette évaluation repose sur des critères prédéfinis, appelés *critères d'acceptabilité* G dans la norme NF EN ISO 13 943 de mars 2011 B 2 et plus amplement détaillés au § 3 3 2 ci-après. En France, une telle étude est réalisée uniquement par un organisme reconnu compétent (cf. § 1 2 7) par le ministère de l'Intérieur pour ce travail d'ingénierie.

1 2 ACTEURS IMPLIQUÉS

1 2 1 Maître de l'ouvrage ou d'ouvrage

Le mot de « maître de l'ouvrage » (MOA) désigne le commanditaire des travaux. Ce terme apparaît dans le code civil, lequel précise son rôle, ses droits et devoirs, qui sont notamment les suivants :

- payer la construction de l'ouvrage et garantir ce paiement dans les conditions de l'article 1799-1 (du code civil) ;
- être coresponsable, à compter de la réception [4)] des travaux, des défauts de la chose vendue en application des articles 1792, 1792-1, 1792-2 et 1792-3 dans le cadre de l'article 1646-1 ;
- conserver les pouvoirs de maître de l'ouvrage en cas de vente de l'ouvrage, tant que l'ouvrage n'est pas réceptionné (art. 1601-3).

4) La réception est « l'acte par lequel le maître de l'ouvrage déclare accepter l'ouvrage avec ou sans réserves. Elle intervient à la demande de la partie la plus diligente, soit à l'amiable, soit à défaut judiciairement. Elle est, en tout état de cause, prononcée contradictoirement. » (art. 1792-6 du code civil).

Dans le cas où le maître de l'ouvrage est une personne publique, la loi 85-704 du 12 juillet 1985 modifiée, dite « loi MOP » B4, précise son rôle et ses relations avec la maîtrise d'œuvre privée. Elle indique notamment, dans son article 2, que le maître d'ouvrage est la « personne morale (…) pour laquelle l'ouvrage est construit ». Il s'agit du « responsable principal de l'ouvrage » et il lui appartient de « s'être assuré de la faisabilité et de l'opportunité de l'opération envisagée, d'en déterminer la localisation, d'en définir le programme, d'en arrêter l'enveloppe financière prévisionnelle, d'en assurer le financement, de choisir le processus selon lequel l'ouvrage sera réalisé et de conclure, avec les maîtres d'œuvre et entrepreneurs qu'il choisit, les contrats ayant pour objet les études et l'exécution des travaux ».

Dans le cas où le maître d'ouvrage est une personne privée, la loi MOP peut être utilisée comme référence, sans que cela ne revête de caractère obligatoire.

1 2 2 Exploitant ou responsable de l'établissement

L'exploitant de l'établissement est la personne physique ou morale qui exploite, commercialement ou non, l'établissement. Il bénéficie de la jouissance des lieux, bien qu'il n'en soit pas forcément le propriétaire. Il peut être différent du maître d'ouvrage.

L'établissement est dirigé et géré par une personne physique, appelée indifféremment responsable de l'établissement, gérant, chef d'établissement, directeur, etc.

Dans certains cas, ce responsable peut être la même personne physique que l'exploitant. Dans le cadre d'un recours à l'ingénierie du désenfumage, l'exploitant et le responsable de l'établissement ont un rôle important à jouer. D'une part, ils sont capables de préciser les conditions d'exploitation des locaux et ces dernières sont indispensables pour définir correctement les scénarios d'incendie. D'autre part, ils devront, le cas échéant, respecter les contraintes d'exploitation pouvant découler de l'étude (cf. § 1 3 2).

1 2 3 Maître de l'œuvre ou d'œuvre

Le maître de l'œuvre (MOE) est la personne physique ou morale chargée de concrétiser le projet du maître de l'ouvrage, au sens des articles 1779 et suivants du code civil. Le maître d'œuvre est « responsable des dommages (…) qui compromettent la solidité de l'ouvrage ou qui (…) le rendent impropre à sa destination. » (art. 1792 du code civil).

Les missions du maître d'œuvre sont définies au titre 2 de la loi « MOP » susmentionnée. Peuvent notamment être cités « les éléments de conception et d'assistance suivants :

- les études d'esquisse ;
- les études d'avant-projets ;
- les études de projet ;
- l'assistance apportée au maître de l'ouvrage pour la passation du contrat de travaux ;
- les études d'exécution ou l'examen de la conformité au projet et le visa de celles qui ont été faites par l'entrepreneur ;
- la direction de l'exécution du contrat de travaux ;
- l'ordonnancement, le pilotage et la coordination du chantier ;
- l'assistance apportée au maître de l'ouvrage lors des opérations de réception et pendant la période de garantie de parfait achèvement. »

Cette mission est généralement remplie par un architecte, un bureau d'architectes ou d'études, auquel sont associés un ou plusieurs bureaux d'études techniques. Le bureau d'études techniques responsable du dimensionnement de l'installation de désenfumage est appelé « bureau d'étude fluide ». La performance de cette installation peut être évaluée en ayant recours à une étude d'ingénierie du désenfumage. Une telle étude est réalisée uniquement par un organisme reconnu compétent. Dans le cas particulier où l'organisme reconnu compétent exerce également des missions de maîtrise d'œuvre, il ne peut pas, pour un même projet, exercer à la fois le rôle de bureau d'étude fluide et celui d'organisme reconnu compétent. Cette restriction est explicitement formulée dans l'avis du ministère de l'Intérieur rendant publique l'obtention de la

reconnaissance de compétence par l'organisme, le cas échéant.

1 2 4 Entreprise chargée de l'exécution des travaux

Les travaux sont réalisés par une ou plusieurs entreprises, liées au maître d'ouvrage par un « contrat de louage d'ouvrage », tel que défini à l'article 1779 du code civil. La maîtrise d'œuvre est généralement chargée, pour le compte du maître de l'ouvrage de vérifier que l'entreprise a bien rempli son contrat. À l'issue des travaux survient leur réception par le maître de l'ouvrage. Cette notion de réception de travaux est définie à l'article 1792-6 du code civil et est rappelée dans la note figurant au bas de la page 11.

1 2 5 Contrôleur technique

La notion de « contrôle technique » (CT) est introduite dans le code de la construction et de l'habitation. L'article L111-23 est ainsi formulé : « le contrôleur technique a pour mission de contribuer à la prévention des différents aléas techniques susceptibles d'être rencontrés dans la réalisation des ouvrages. Il intervient à la demande du maître de l'ouvrage et donne son avis à ce dernier sur les problèmes d'ordre technique, dans le cadre du contrat qui le lie à celui-ci. Cet avis porte notamment sur les problèmes qui concernent la solidité de l'ouvrage et la sécurité des personnes. »

Par ailleurs, l'article R111-38 de ce même code précise les travaux nécessitant l'intervention d'un contrôleur technique. Les établissements recevant du public du 1er groupe et les immeubles de grande hauteur y sont explicitement cités.

Enfin, les missions du contrôleur technique sont détaillées à l'article R. 111-39 (du code de la construction et de l'habitation). D'autres missions existent, en plus de celles expressément définies dans cet article. Par ailleurs, les missions de contrôle technique après travaux prévues par le règlement de sécurité dans les établissements recevant du public doivent être réalisées par un organisme agréé par le ministère de l'Intérieur pour cette mission.

Que le désenfumage ait fait l'objet d'une étude d'ingénierie ou non, le contrôleur technique vérifie : d'une part que l'installation de désenfumage prévue par le maître d'ouvrage est bien celle mise en œuvre ; d'autre part qu'elle l'est correctement. Le contrôleur technique n'émet pas d'avis sur le contenu de l'étude d'ingénierie mais se prononce quant au respect des avis rendus par les autorités compétentes. Dans ce cadre, il vérifie que les préconisations découlant de l'étude d'ingénierie sont bien mises en œuvre dans le bâtiment, notamment lorsqu'il s'agit de mesures constructives.

1 2 6 Commission de sécurité

Le terme « commission de sécurité » (CS) est générique et peut désigner plusieurs commissions relatives à la sécurité incendie, dont le fonctionnement est régi par le décret du 8 mars 1995 modifié.

En matière d'ingénierie du désenfumage, la commission de sécurité compétente peut, dans certains cas, demander qu'une étude d'ingénierie du désenfumage soit initiée. De plus, conformément à l'article DF 4 §2 [5] du règlement de sécurité, la commission de sécurité compétente est consultée à différentes phases du projet, qui seront précisées au § 1 4. De même, la commission compétente donne un avis quant à la solution de désenfumage proposée par la maîtrise d'ouvrage, sur la base des résultats de l'étude.

1 2 7 Organisme reconnu compétent

Il s'agit de l'organisme qui réalise l'étude d'ingénierie du désenfumage. La réalisation d'une telle étude nécessite une reconnaissance de compétence, délivrée par le ministère de l'Intérieur (article DF 4) et publiée au journal officiel sous la forme d'un avis. Par ailleurs, la liste actualisée des organismes reconnus compétents est disponible sur le site Internet [6] du ministère. Cette reconnaissance de compétence implique

[5] Dans la suite de ce guide, le terme « DF 4 » sera utilisé pour faire référence de manière abrégée à cet article.

[6] Au 10/11/2016 : http://www.interieur.gouv.fr/Le-ministere/Securite-civile/Documentation-technique/Lessapeurs-pompiers/La-reglementation-incendie

notamment que les modélisateurs appliquent une méthode de travail rigoureuse et assurent le maintien de la qualité de leurs études de désenfumage. Cependant, cette reconnaissance de compétence est limitée à l'ingénierie du désenfumage. Il n'y a donc pas de garantie que les organismes reconnus compétents (ORC) le soient également pour vérifier les autres exigences réglementaires (p. ex. : structure, électricité, dimensionnement des issues, réaction au feu).

L'organisme reconnu compétent est missionné au minimum par le maître de l'ouvrage et joue auprès de ce dernier un rôle d'assistant. À ce titre, il a un devoir de conseil. Ses missions sont plus précisément les suivantes :

- conseiller le maître de l'ouvrage en matière d'ingénierie du désenfumage ;
- rendre compte du résultat de son travail à la maîtrise d'ouvrage et, le cas échéant, l'assister lors des rendez-vous avec les services techniques chargés de l'instruction du dossier administratif ;
- proposer une méthode adéquate pour évaluer la performance de l'installation de désenfumage ;
- effectuer une analyse de risque pour définir l'objectif de l'étude et proposer des scénarios d'incendie de dimensionnement ;
- proposer le nombre de scénarios d'incendie nécessaires pour atteindre les objectifs ;
- procéder aux simulations numériques, à l'analyse des résultats et aux conclusions ;
- fournir les documents demandés à l'article DF 4.

L'organisme reconnu compétent ne doit en aucun cas se substituer au maître d'œuvre ou à l'un des membres de son équipe. Plus particulièrement, le rôle de l'organisme reconnu compétent ne saurait être confondu avec celui d'un bureau d'étude fluide. En effet, **l'organisme reconnu compétent ne dimensionne pas une installation de désenfumage, il en évalue la performance.** Si, suite au résultat de son étude, il conclut qu'une installation de désenfumage n'est pas suffisamment performante, il peut conseiller au maître de l'ouvrage de la faire modifier par le bureau d'étude fluide. Suite à ces modifications, l'organisme reconnu compétent peut alors réaliser un complément d'étude.

Par ailleurs, l'organisme reconnu compétent est responsable de son étude et de ses conclusions.

1 3 RECOURS À L'INGÉNIERIE DE DÉSENFUMAGE ET SES CONSÉQUENCES

1 3 1 Recours à l'ingénierie

La commission centrale de sécurité a indiqué, dans son avis du 2 décembre 2004, que le recours à l'ingénierie du désenfumage n'était pas limité aux seules situations où l'application des instructions techniques est impossible, par exemple pour des raisons techniques ou des contraintes liées au classement ou à l'inscription au titre des monuments historiques. La commission centrale a donc estimé que l'ingénierie s'applique à toutes les situations et que l'article DF 4 ne limite pas son emploi. Dans la pratique, l'ingénierie est effectivement utilisée quelle que soit la nature du bâtiment. Son usage n'est limité ni aux configurations hors normes, ni à la réhabilitation de l'existant.

Le recours à l'ingénierie peut être proposé soit par la maîtrise d'ouvrage, soit par la maîtrise d'œuvre, soit par la commission de sécurité, soit par le contrôleur technique. En tout état de cause, quelle que soit l'origine de la proposition de recours à l'ingénierie du désenfumage, le maître de l'ouvrage est seul responsable de décider de la commande.

Par ailleurs, si l'étude d'ingénierie ne débute pas à l'initiative de la commission de sécurité, il faut savoir qu'il est possible de consulter cette dernière avant de commencer le processus de l'étude. En effet, en vertu de l'article R 123-13 du code de la construction et de l'habitation, la commission peut accepter des dérogations aux règles de sécurité prescrites par le règlement de sécurité, avec ou sans mesure(s) compensatoire(s).

Concrètement, cela signifie que la commission de sécurité peut accepter que le désenfumage ne soit pas conforme aux solutions détaillées dans les instructions techniques, sans pour autant s'appuyer sur les résultats d'une étude d'ingénierie. Cette solution est alors généralement plus rapide qu'une étude d'ingénierie.

Par ailleurs, lorsque le désenfumage est conforme aux solutions décrites dans les instructions techniques, et qu'il s'agit d'un établissement sans complexité architecturale, les solutions préconisées dans les instructions techniques sont réputées efficaces, sans que la preuve de cette efficacité ne soit exigible.

1.3.2 Conséquences possibles de l'étude d'ingénierie

Si l'étude d'ingénierie conclut que l'installation de désenfumage est suffisamment efficace, alors l'installation est acceptable et peut-être présentée à la commission de sécurité en l'état. En revanche, si l'étude démontre qu'aucune solution de désenfumage techniquement, historiquement ou financièrement réalisable n'est suffisamment efficace, alors des mesures spéciales destinées à compenser cette efficacité insuffisante peuvent être imposées. Ces mesures spéciales sont appelées indifféremment mesures compensatoires ou dispositions de sécurité adaptées. Elles sont définies par le maître de l'ouvrage, de préférence avec l'assistance de l'organisme reconnu compétent et du maître d'œuvre. Ces mesures sont définies d'une part au moyen d'une analyse des risques s'appuyant entre autres sur les résultats de l'étude d'ingénierie, et d'autre part par des justifications techniques et scientifiques de leur pertinence. Enfin, ces mesures sont soumises à la commission de sécurité pour avis.

À titre illustratif, les mesures compensatoires suivantes sont envisageables en fonction des situations :

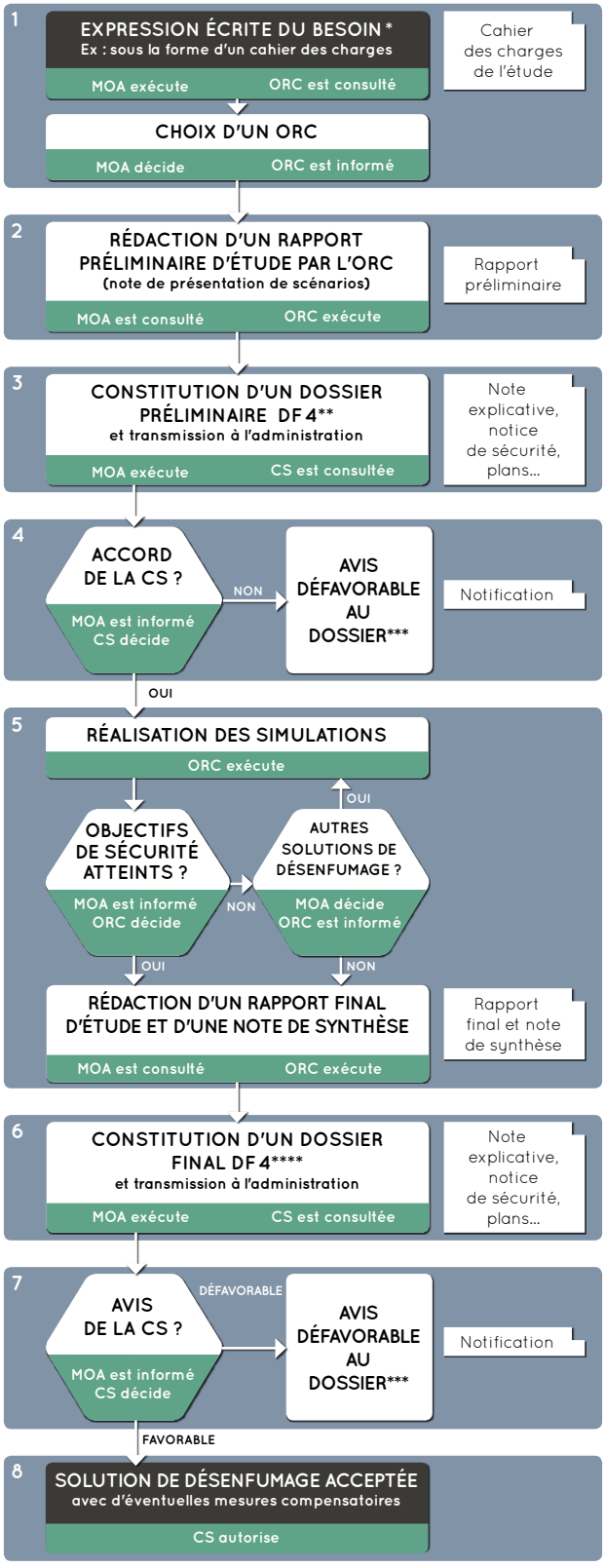
- recoupement des espaces par ajout de compartimentage fixe ou mobile (p. ex. : encloisonnement d'une passerelle) ;
- diminution de la temporisation entre les alarmes restreinte et générale ;
- mise en place de mesures organisationnelles spécifiques, avec éventuellement augmentation de l'effectif du service de sécurité ;
- ajout d'un système d'extinction à commande automatique (p. ex. : sprinkler, brouillard d'eau) ;
- limitation des aménagements intérieurs, de la décoration ou du mobilier (p. ex. : durcissement du classement de réaction au feu requis ou limitation de la charge calorifique) ;
- création de dégagement(s) supplémentaire(s) ;
- installation d'une détection automatique d'incendie ou son extension.

Cependant, les mesures impactant directement les conditions d'exploitation (p. ex. : limitation de la charge calorifique, diminution de la temporisation entre les alarmes restreinte et générale) doivent faire l'objet d'une attention particulière. En effet, elles nécessitent l'adhésion de l'exploitant, qui doit s'engager à les respecter tout au long de l'exploitation. Or, ce dernier n'est pas toujours consulté lors de l'étude d'ingénierie.

1.4 VIE ADMINISTRATIVE D'UN DOSSIER D'INGÉNIERIE DE DÉSENFUMAGE

Le logigramme suivant synthétise la vie administrative d'un dossier (cf. figure 1). Chaque étape (cf. numérotation du logigramme) est commentée ci-après. Par ailleurs, la durée généralement observée entre la commande passée à l'organisme reconnu compétent (fin de l'étape 1 dans la figure 1) et l'avis final de la commission de sécurité (étape 8 dans la figure 1) est comprise entre 6 et 12 mois. Toutefois, ce délai peut varier en fonction de la complexité du projet, du nombre de dossiers déposés aux services de l'État pour instruction, des délais d'instruction desdits services, de la disponibilité de l'organisme reconnu compétent, des modifications du projet au cours du temps, des difficultés du projet, etc.

Fig.1 **LA VIE ADMINISTRATIVE D'UN DOSSIER D'INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE**



LÉGENDE

- ÉTAPES D'UN DOSSIER D'INGÉNIERIE
- ACTION
- DÉCISION
- ACTEURS ET RÔLES
  MOA : Maître de l'ouvrage
  CS : Commission de sécurité
  ORC : Organisme reconnu compétent
- DOCUMENTS ÉMIS

* *Cette étape n'est pas systématique.*

** *Le dossier préliminaire est plus complet que le seul rapport émis par l'ORC.*

*** *En cas d'avis défavorable, le dossier remonte à l'une des étapes précédentes, à déterminer au cas par cas.*

**** *Le dossier DF 4 est plus complet que les seuls rapports émis par l'ORC.*

1 La maîtrise d'ouvrage décide de recourir à l'ingénierie du désenfumage. La première possibilité consiste à contacter directement l'organisme reconnu compétent de son choix. La seconde possibilité consiste à réaliser un appel d'offres ou une mise en concurrence pour sélectionner l'organisme reconnu compétent. Si l'expression écrite du besoin, par exemple sous la forme d'un cahier des charges de l'étude, est indispensable dans le second cas, elle est également souhaitable dans le premier.

2 L'étude préliminaire de désenfumage est réalisée par l'organisme reconnu compétent. À l'issue de cette étude, l'organisme reconnu compétent produit un rapport préliminaire, qu'il transmet au maître de l'ouvrage. Cette étape est nécessaire, car les scénarios d'incendie (de dimensionnement) retenus sont soumis à l'accord de la commission de sécurité (cf. étape 4). À ce stade, il est possible de commencer les simulations numériques. Cependant, si certains scénarios sont refusés à l'étape 4, une partie du travail déjà réalisé par l'organisme reconnu compétent devient alors caduque.

3 Lorsqu'il réceptionne ce rapport, le maître de l'ouvrage constitue un dossier appelé « dossier préliminaire DF 4 » en référence à l'article éponyme du règlement de sécurité. Le maître d'ouvrage demeure le seul responsable de la constitution de ce dossier, qu'il transmet à la commission de sécurité. Ce dossier peut coïncider avec une autre demande (p. ex. : permis de construire, dossier d'aménagement). Le dossier préliminaire DF 4 doit contenir toutes les informations nécessaires pour permettre à la commission de sécurité de se prononcer. Les pièces suivantes devraient idéalement le constituer :

- une lettre d'accompagnement, rappelant le contexte, la raison d'être de l'étude et l'identité du demandeur de l'étude ;
- un rapport préliminaire, établi par l'organisme reconnu compétent ;
- une notice de sécurité, si elle existe ;
- des plans et un schéma de principe de l'installation de désenfumage (dont le format et la qualité assurent la lisibilité).

4 La commission de sécurité étudie ce dossier préliminaire. Dans le cas où la commission donne son accord sur les scénarios d'incendie et les hypothèses, le maître de l'ouvrage est informé et l'étude d'ingénierie se poursuit par l'étude finale. Dans le cas où la commission de sécurité ne donne pas son accord sur les scénarios (p. ex : si des scénarios complémentaires sont demandés ou si certains scénarios sont jugés inopportuns), deux cas de figure sont possibles. Soit la commission demande une révision du rapport préliminaire et l'étude est alors renvoyée à l'étape 2 ; soit la commission ne demande pas de révision du rapport et l'étude peut poursuivre vers l'étape 5, en intégrant directement les modifications demandées. Si c'est la constitution du dossier préliminaire qui ne convient pas, le dossier est alors généralement renvoyé à l'étape 3 par la commission. Par ailleurs, la commission peut, à ce stade, décider d'accepter l'installation de désenfumage prévue sans estimer avoir besoin des résultats de l'étude. Dans ce cas, une dérogation est accordée et la poursuite de l'étude est laissée à l'entière appréciation du maître de l'ouvrage. La commission n'a alors pas besoin d'être informée des suites de l'étude.

5 L'étude finale d'ingénierie de désenfumage est réalisée par l'organisme reconnu compétent. Il procède aux simulations numériques et à l'analyse des résultats afin de déterminer si les objectifs de sécurité définis sont atteints. Si les objectifs de sécurité ne sont pas atteints, le maître de l'ouvrage propose des solutions de désenfumage alternatives que l'organisme reconnu compétent évaluera. Si aucune solution alternative réalisable ne permet d'atteindre les objectifs de sécurité, alors des mesures compensatoires devront être définies par le maître de l'ouvrage (étape 6). Une fois les simulations achevées, l'organisme reconnu compétent rédige un rapport d'étude et, éventuellement, une note de synthèse, qu'il transmet au maître d'ouvrage.

6 Le maître d'ouvrage constitue un dossier appelé « dossier final DF 4 » et le transmet à la commission de sécurité. Ce dossier contient idéalement les pièces suivantes :

- une lettre d'accompagnement, rappelant le contexte, la raison d'être de l'étude et l'identité du demandeur de l'étude ;
- le rapport d'étude et, le cas échéant, la note de synthèse, établi(s) par l'organisme reconnu compétent ;
- éventuellement la liste des mesures compensatoires proposées (si l'étude montre que le désenfumage n'est pas suffisamment efficace) ;
- une notice de sécurité, si elle existe ;
- des plans et un schéma de principe de l'installation de désenfumage (dont le format et la qualité assurent la lisibilité).

7 La commission de sécurité donne son avis sur le dossier final DF 4. Quand il y a un avis favorable, le projet se poursuit de manière classique. Il est de la responsabilité des acteurs de la construction (MOE/CT) de s'assurer que ce qui est réalisé est conforme à l'étude d'ingénierie. S'il s'avère que l'avis de la commission est négatif, le dossier remonte à l'une des étapes précédentes, à déterminer au cas par cas. De plus, s'il apparaît que des mesures compensatoires sont nécessaires et n'ont pas été proposées, la commission demande au maître de l'ouvrage de les définir. Enfin, si le projet est amené à être modifié (p. ex. : position des exutoires, dégagements, etc.), il faut, selon la nature des modifications, consulter l'organisme reconnu compétent. Ce dernier indiquera au maître d'ouvrage s'il est nécessaire de recommencer à l'une des étapes précédentes.

1 5 DISPOSITIONS CONTRACTUELLES À ENVISAGER ENTRE L'ORGANISME RECONNU COMPÉTENT ET LA MAÎTRISE D'OUVRAGE

1 5 1 Expression du besoin de la maîtrise d'ouvrage

La première étape d'une étude d'ingénierie débute par l'expression du besoin par le maître d'ouvrage. Idéalement, il convient de réaliser un écrit, qui peut prendre la forme d'un cahier des charges de l'étude. Celui-ci peut servir de base pour un appel d'offre ou une mise en concurrence. Il doit apporter certaines précisions permettant à l'ORC de rédiger une offre et de réaliser une étude dans les meilleures conditions.

Dans la mesure du possible, les informations suivantes devraient figurer dans le cahier des charges de l'étude :

- le descriptif du bâtiment et de son fonctionnement ;
- des précisions sur les raisons du recours à l'ingénierie et l'identité du demandeur de l'étude ;
- les derniers avis de commission de sécurité et procès-verbaux de visite, s'ils existent ;
- la notice de sécurité ;
- les plans de niveau et, si possible, de coupe du local ou des locaux concernés par l'étude, sur lesquels doit figurer le découpage en zones de désenfumage.

D'autres informations peuvent être ajoutées. Par exemple, si les délais constituent un élément sensible, il faut les intégrer dans le cahier des charges de l'étude.

À l'inverse, il est des points qui relèvent du savoir-faire des organismes reconnus compétents et sur lesquels ils devraient être en mesure de faire librement des propositions dans leur offre. Il s'agit notamment des informations suivantes :

- le nombre de scénarios d'incendie de dimensionnement à prévoir ;
- le logiciel à utiliser ou sa version ;
- la méthode d'évaluation à utiliser (relative ou absolue – cf. § 3 2).

Chaque organisme reconnu compétent dispose d'un savoir-faire qui lui est propre et les offres des uns et des autres ne sont pas forcément facilement comparables. Le critère le plus facile à comparer est le nombre de scénarios d'incendie proposés. Cependant, ce critère n'est pas le seul à prendre en compte.

1 5 2 Autres échanges à prévoir

Des échanges entre l'organisme reconnu compétent et la maîtrise d'ouvrage sont particulièrement utiles pour assurer la qualité de l'étude. Ces échanges sont laissés à l'appréciation de la maîtrise d'ouvrage, seule à décider ce qu'elle souhaite communiquer et à quel moment. Toutefois, pour un résultat optimal, le maître d'œuvre et l'exploitant devraient être également associés à ces échanges. Idéalement, il faudrait également pouvoir prévoir un processus d'échange entre l'organisme reconnu compétent et les maîtrises d'œuvre et d'ouvrage tout au long de la phase conception, voire durant les phases exécution et réception du projet. En effet, il est important d'informer sans délai l'organisme reconnu compétent de toute modification des documents de référence ou du projet.

Les temps d'échanges suivants sont le plus souvent observés dans la pratique :

- lancement du projet, avec éventuellement une visite sur site, pour un établissement existant ;
- présentation de l'étude préliminaire (les scénarios d'incendie) ;
- présentation de l'étude finalisée.

1 5 3 Documents produits par l'organisme reconnu compétent

Comme illustré par le logigramme de la figure 1, la réalisation d'une étude d'ingénierie par l'organisme reconnu compétent se déroule en deux étapes successives :

– l'élaboration des scénarios d'incendie de dimensionnement incluant la définition des hypothèses ;
– la simulation numérique des scénarios d'incendie et l'exploitation des résultats afin de déterminer si les objectifs de sécurité sont atteints.

La première étape donne naissance à un rapport dit « rapport préliminaire », la deuxième étape donne naissance à deux documents, le « rapport d'étude » et la « note de synthèse » :

Étape 1 :

• Le rapport préliminaire

Ce rapport est soumis à l'accord de la commission de sécurité. Il contient généralement les informations suivantes :

– le contexte et la raison d'être de l'étude ;
– la description de l'établissement et du système de désenfumage ;
– la description de la méthode d'évaluation retenue ;
– le logiciel et la version utilisés ;
– les objectifs de sécurité proposés ;
– les critères d'acceptabilité associés à ces objectifs de sécurité pour définir de l'acceptabilité de la solution de désenfumage testée ;
– les scénarios d'incendie de dimensionnement retenus, comprenant non seulement les hypothèses relatives aux feux, mais aussi celles relatives au comportement humain, au système de sécurité (dont l'installation de désenfumage), au bâtiment, etc.

Étape 2 :

• Le rapport d'étude

Ce document contient l'intégralité des hypothèses, les éventuelles études paramétriques réalisées. Il présente les résultats détaillés et commentés. Ce document a vocation à garder la trace détaillée de l'étude. Il sert notamment à la définition d'éventuelles mesures compensatoires.

Le maître d'ouvrage peut demander une version allégée de ce document pour l'envoi à la commission de sécurité. L'idéal est que la commission de sécurité précise le niveau de détail souhaité. Dans tous les cas, le rapport transmis doit impérativement être conclusif quant à l'efficacité de l'installation de désenfumage.

• La note de synthèse

Ce document n'est pas obligatoire mais est observé dans la pratique. Il s'agit d'un document très synthétique qui rappelle les grandes lignes de l'étude et les conclusions principales. Cette note a vocation à être conservée par l'exploitant. Idéalement, elle pourrait être annexée au registre de sécurité.

Le présent chapitre clarifie les notions relatives aux scénarios d'incendie de dimensionnement ainsi que la terminologie utilisée pour décrire les feux et l'évacuation des personnes. De plus, des recommandations quant à l'élaboration de ces scénarios sont proposées. Il ne s'agit que de recommandations et non d'obligations. L'organisme reconnu compétent reste libre de ne pas en tenir compte en justifiant sa démarche.

2 SCÉNARIOS D'INCENDIE DE DIMENSIONNEMENT

2.1 DÉFINITIONS ET PRINCIPES D'ÉLABORATION DES SCÉNARIOS D'INCENDIE DE DIMENSIONNEMENT

La norme NF EN ISO 13 943 de mars 2011 [B.2] indique qu'un scénario d'incendie est une « description qualitative du déroulement d'un incendie dans le temps, identifiant les événements clés qui caractérisent l'incendie et le différencient des autres incendies potentiels ». Cependant, le nombre de scénarios d'incendie possibles est pratiquement infini. Il est impossible de les analyser tous. C'est la raison pour laquelle des scénarios d'incendie de dimensionnement sont identifiés. Il s'agit, selon la norme précitée d'« un scénario d'incendie spécifique sur lequel sera réalisée une analyse *déterministe* [G][7] d'ingénierie de la sécurité incendie ». En d'autres termes, un scénario de dimensionnement est quantitatif et judicieusement choisi. En ingénierie du désenfumage, un tel scénario regroupe **l'ensemble des éléments susceptibles d'influencer l'enfumage du bâtiment et ses conséquences.** Ces éléments incluent le feu, mais également des facteurs humains (p. ex. : évacuation), organisationnels (p. ex. : personnel chargé de mettre le désenfumage en fonctionnement), bâtimentaires (p. ex. : recoupement des locaux), sécuritaires (p. ex. : type de désenfumage, extinction) et environnementaux (p. ex. : température extérieure, vent). Tous ces éléments sont plus amplement détaillés aux § 2.2 à 2.5.

La définition des scénarios d'incendie de dimensionnement est la pierre angulaire de l'étude. Ce travail incombe à l'organisme reconnu compétent, après discussion avec le maître d'ouvrage, et éventuellement d'autres intervenants concernés (p. ex. : maîtres d'œuvre, exploitant, services d'incendie et de secours, etc). La méthode à utiliser est laissée à l'appréciation de l'ORC, car il est reconnu compétent pour ce travail. Elle doit toutefois faire l'objet d'une brève description dans le rapport préliminaire. De plus, les hypothèses retenues pour élaborer ces scénarios doivent être explicitées. À visée pédagogique, les grands principes sur lesquels repose cette définition sont toutefois brièvement décrits dans les paragraphes suivants.

La norme NF ISO 16 733-1 de mars 2016 [B.5] est entièrement dédiée à la sélection de ces scénarios. Elle stipule que « chaque scénario d'incendie de dimensionnement est sélectionné pour représenter un groupe d'incendies à risque significatif ». Elle stipule également que « lorsqu'une évaluation déterministe est envisagée, une estimation qualitative de la probabilité et de la conséquence » de ces scénarios « suffit ». Selon le cas, cette estimation peut être plus ou moins poussée.

Le risque s'appréciant à la fois au regard de la probabilité d'occurrence de l'incendie et de la gravité de ses conséquences, le scénario dimensionnant n'est pas forcément très probable ou très

[7] *À ce jour en France, l'ingénierie de la sécurité incendie repose sur une analyse déterministe.*

grave. Ce qui est déterminant est la combinaison de ces deux facteurs de probabilité et de gravité. Concernant la gravité plus spécifiquement, une vigilance particulière doit être portée aux scénarios extrêmes (minimalistes ou catastrophiques), car ils peuvent conduire à rendre le bâtiment impropre à sa destination, c'est-à-dire dans lequel les activités possibles ne correspondent pas à ce pour quoi il a été construit.

De plus, les scénarios proposés doivent impérativement être adaptés à l'exploitation, mais aussi aux objectifs de sécurité retenus. En effet, parmi tous les scénarios possibles, ceux qui seront jugés comme dimensionnants pour évaluer les conditions d'évacuation des personnes ne sont pas identiques à ceux qui seraient retenus pour évaluer les conditions d'intervention ou encore la propagation du feu.

Par ailleurs, ces scénarios doivent également être adaptés à la nature de l'étude. En effet, les scénarios d'incendie de dimensionnement d'une étude de désenfumage ne sont pas du tout similaires avec ceux qui seraient jugés dimensionnants pour évaluer la stabilité au feu d'un bâtiment. C'est la raison pour laquelle les scénarios de dimensionnement d'une étude de désenfumage ne doivent en aucun cas être utilisés pour une étude de structure, et vice-versa. Il en va de même pour les scénarios des études spécifiques des dangers dans les tunnels, pour lesquelles il s'agit d'analyser la robustesse des systèmes de sécurité (notamment en termes de redondance, de fiabilité des systèmes et de modes dégradés) avec des scénarios suffisamment pénalisants pour mettre en défaut une ou plusieurs parties de ces systèmes. Dans ce sens, les scénarios retenus dans les tunnels vont au-delà d'un scénario de dimensionnement. Ainsi, la philosophie d'une étude de dangers est différente de celle d'une étude de désenfumage. Par conséquent, toute extrapolation des données utilisées pour les tunnels à une étude de désenfumage doit être réalisée avec une grande prudence.

De manière synthétique, les scénarios de dimensionnement peuvent être vus comme des déroulés d'événements crédibles conduisant à des situations dangereuses au regard de la nature de l'étude, des objectifs de sécurité retenus et du caractère d'exploitation de l'établissement. Ils sont jugés comme représentatifs de nombreux autres scénarios possibles. Ils doivent être élaborés par l'organisme reconnu compétent, en consultation avec différents acteurs du projet, au moyen d'une analyse qualitative des risques dont les résultats sont explicitement présentés au maître de l'ouvrage, au minimum dans le rapport préliminaire. Enfin, toute extrapolation d'une étude à une autre doit être réalisée avec une grande prudence.

2 2 BÂTIMENT ET INSTALLATIONS DE SÉCURITÉ

2 2 1 Modélisation du bâtiment et de ses propriétés

La démarche de modélisation peut être présentée en trois étapes, chacune faisant l'objet d'un paragraphe ci-dessous.

Étape 1 : il est nécessaire de définir quel est l'espace géométrique concerné par l'étude. S'agit-il de tout l'établissement ou seulement d'une partie (p. ex. : une zone de désenfumage) ?

Recommandations

Dans la mesure du possible, il convient de modéliser tous les espaces étant en communication aéraulique directe les uns avec les autres, même si l'étude de désenfumage ne porte que sur un seul de ces espaces. Par exemple, si un espace est en communication avec un autre par l'intermédiaire d'un escalier non encloisonné, il convient, si cela est possible, de modéliser les deux espaces et l'escalier, afin justement de vérifier si un passage de fumée se produit via cet escalier.

Étape 2 : il est nécessaire de s'interroger sur la manière de reproduire la géométrie.

Recommandations

Le but de la modélisation étant le désenfumage, il convient de porter un soin tout particulier, d'une part aux interconnexions entre les différents espaces du bâtiment (p. ex. : escaliers, dessous de scène, passerelles, etc.), et d'autre part à tous les éléments pouvant perturber le passage des

fumées (p. ex. : poutres, caillebotis, mezzanines). Évidement, la reproduction de la géométrie est soumise aux contraintes liées au logiciel employé (cf. annexe A 2 2).

Étape 3 : il convient de s'interroger quant à la manière de modéliser les parois, c'est-à-dire définir si la prise en compte de leurs propriétés thermiques influe de manière pénalisante sur le désenfumage.

Recommandations

*Ce point doit faire l'objet d'une attention spécifique de l'organisme reconnu compétent, qui peut, le cas échéant, être amené à réaliser une **étude de sensibilité** G.*

2 2 2 Prise en compte de l'installation de désenfumage

La prise en compte de l'installation de désenfumage est évidement particulièrement importante. Cette modélisation passe par deux étapes, qui sont détaillées ci-après.

Étape 1 : il convient de tenir compte de l'installation de désenfumage elle-même. Pour cela, un certain nombre de paramètres doit être connu : le type de désenfumage (p. ex. : naturel, mécanique), la position, les dimensions, les débits des amenées d'air et des évacuations de fumées (le cas échéant), etc.

Recommandations

Concernant les conduits de désenfumage, ils ne sont pas représentés dans les études, sauf cas particulier. Il y a deux raisons principales à cela. La première est liée aux difficultés de modélisation proprement dites (cf. annexe A 2 2), la seconde au fait que les pertes de charges dans les conduits sont déjà pris en compte par l'instruction technique n°246. C'est l'objet des corrections (p. ex. : débit de fuite, coefficient d'efficacité, etc.) et des contraintes (p. ex. : longueur de traînasse, nombre de dévoiement, etc.) des § 3.4, 4.4, 4.7, 7.1.4-3 de ladite instruction technique.

*Concernant la reproduction numérique des **ouvrants** G, des **bouches** G et des **exutoires** G, les études de désenfumage reposent sur des représentations simplifiées. L'annexe A 2 2 4 apporte des précisions additionnelles sur ce sujet.*

Enfin, d'une manière générale, il est recommandé de mettre tout en œuvre pour que la modélisation corresponde le plus fidèlement possible à la réalité. Cela implique une bonne communication entre les différents acteurs du projet. De plus, si des travaux sont prévus, cela induit que le projet doit être suffisamment mûr pour qu'un minimum d'informations soit connu. De la même manière, si l'installation de désenfumage fait l'objet de modifications postérieures à l'étude de l'organisme reconnu compétent, il convient de le consulter pour savoir si son analyse est toujours valable.

Étape 2 : il est nécessaire de reproduire la mise en fonctionnement de l'installation de désenfumage. Pour cela, le mode de commande doit être connu. De plus, en cas de commande par la détection automatique d'incendie, il convient de s'intéresser au cahier des charges fonctionnel du système de sécurité incendie.

Recommandations

Un état initial (ouvert, fermé) des ouvrants (porte, fenêtres, amenées d'air…), s'ils servent au désenfumage ou s'ils peuvent influencer le comportement de la fumée, doit être défini.

Le délai de détection (humaine ou automatique) doit être considéré. Le temps de détection automatique d'incendie peut être soit estimé forfaitairement, soit modélisé.

Le délai d'activation de l'installation de désenfumage doit être défini. Ce délai nécessite de s'intéresser aux facteurs suivants :

- *en cas de commande par la détection automatique d'incendie, le délai entre la détection et le fonctionnement nominal du désenfumage ;*
- *en cas de commande manuelle de tout ou d'une partie de l'installation, le temps de réaction des personnes qui la mettent en œuvre, y compris pour ce qui concerne les amenées d'air, ainsi que le temps que met l'installation à atteindre son point de fonctionnement nominal.*

Par ailleurs, la description de l'installation de désenfumage, le mode de commande et tous les délais liés à la

mise en fonctionnement des équipements doivent être explicitement décrits dans le rapport d'étude. Ils doivent correspondre à l'établissement et à son exploitation.

En conclusion, la modélisation du désenfumage doit être la plus réaliste possible, tout en restant suffisamment pénalisante. Le côté pénalisant des hypothèses est particulièrement important pour ce qui concerne les délais liés aux actions humaines, car des délais trop contraints dans l'étude peuvent être traduits par des prescriptions de la part de la commission de sécurité. Par exemple, si une étude considère que le personnel de sécurité commande le désenfumage en 3 minutes, la commission de sécurité est en droit de demander à ce que l'établissement mette en place des mesures organisationnelles pour respecter ce délai.

2.2.3 Prise en compte d'autres mesures de sécurité

La sécurité incendie repose sur un ensemble de mesures de sécurité actives et passives qui agissent successivement ou concomitamment et, pour certaines d'entre elles, en interaction. Dans l'étude de désenfumage, certaines mesures sont directement prises en compte pour la modélisation (p. ex. : cloisonnement), tandis que d'autres sont simplifiées ou négligées (p. ex. : classement de réaction au feu). Le choix des mesures à négliger dépend de nombreux facteurs, comme les capacités actuelles de modélisation ou la manière dont sont modélisés les feux (sources prescrites). Le cas spécifique de l'extinction automatique est abordé au § 2.3.2.2.

2.3 FEUX DE DIMENSIONNEMENT

2.3.1 Définitions, phénomènes, ordres de grandeurs

Selon la norme NF EN ISO 13 943 de mars 2011 B.2, un *feu* G est un « processus de combustion caractérisé par l'émission de chaleur et d'effluents du feu et accompagné généralement par de la fumée, des flammes, une incandescence, ou par une combinaison de ces éléments ». Un *feu de dimensionnement* G est « la description quantitative des caractéristiques théoriques d'un incendie dans le cadre du scénario d'incendie de dimensionnement ». Pour parvenir à une description quantitative de ces caractéristiques théoriques, la connaissance d'un certain nombre de phénomènes physiques est nécessaire. Certains de ces phénomènes sont brièvement décrits ci-dessous. Dans les paragraphes suivants, les unités de mesures des grandeurs citées figurent entre parenthèses.

La combustion est une réaction exothermique. Elle a pour conséquence l'émission d'énergie sous forme de *chaleur* G (J). La quantité de chaleur émise par unité de temps est appelée *débit calorifique* G (W), ou *puissance de feu* G. Le débit calorifique n'est pas constant dans le temps (p. ex. : petites flammes, puis flammes vives, puis extinction progressive) et le terme *cinétique de combustion* G est utilisé pour désigner ses évolutions temporelles. Enfin, l'énergie émise sous forme de chaleur par la combustion d'une unité de masse de combustible [8)] est appelée soit *enthalpie de combustion* G (J/kg), soit *pouvoir calorifique* G, soit *chaleur de combustion* G. Il s'agit toujours de la même notion.

Afin de familiariser le lecteur avec ces notions, quelques ordres de grandeurs concernant le débit calorifique sont proposés ci-dessous B.6 B.7 :

- feu de corbeille à papier : de l'ordre de quelques kW à quelques dizaines de kW
- feu de friteuse : de l'ordre de quelques kW ;
- feu de chaise : en moyenne de 30 à 200 kW ;
- feu de fauteuil : en moyenne de 0,5 à 1 MW ;
- feu de literie ou de canapé rembourré : de l'ordre de quelques MW ;
- feu de chambre : en moyenne de 3 à 10 MW ;
- feu de véhicule léger : en moyenne de 3 et 7 MW ;
- feu industriel : de l'ordre de plusieurs centaines de MW.

8) Cette notion peut s'appliquer tant à la phase solide qu'à la phase gazeuse.

De même, quelques ordres de grandeurs typiques de situations rencontrées sont présentées ci-dessous, issus pour partie de la référence B6 :

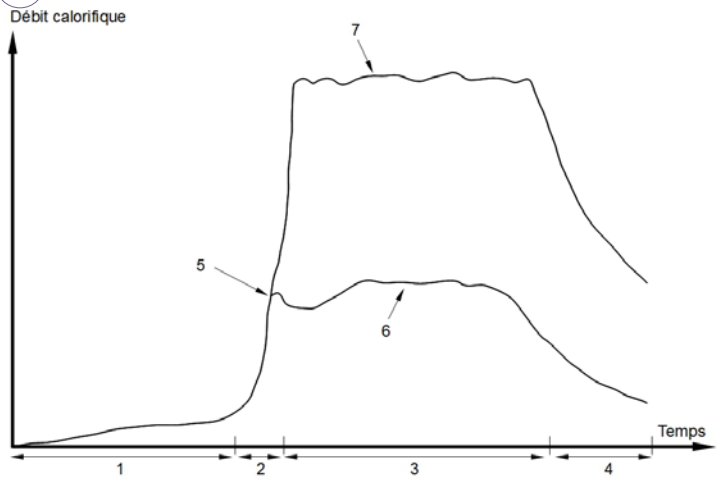
- la combustion d'un kg de combustible courant nécessite la consommation de l'oxygène contenu dans 5 à 20 kg d'air, et libère de 10 à 40 MJ selon la nature du combustible ;
- la quantité d'oxygène présente dans une pièce de 30 m^3 sans renouvellement d'air est de l'ordre de 8,5 kg. Cette quantité permet de brûler au plus de 2,5 à 8 kg de combustible solide (pour un polymère naturel ou de synthèse courant). Cependant, la quantité d'oxygène effectivement mobilisable pour une combustion, lorsque la pièce n'est pas en situation d'embrasement généralisé, n'est que de l'ordre de 3 kg. En effet, en dehors des situations d'embrasement généralisé, une concentration volumique d'oxygène faible (en deça de 15%) conduit à une suppression de la flamme ;
- la consommation de l'oxygène présent dans 1 kg d'air libère environ 3 MJ, pour les combustibles courants ;
- le flux massique d'air entraîné par une porte de taille usuelle permet un débit calorifique maximal théorique de 3 à 4 MW, si la pièce n'a pas d'autre ouverture ;
- un feu de fauteuil rembourré peut emplir une pièce[9] de 20 m^2 d'une couche de fumée de 1,5 m d'épaisseur en moins d'une minute, en l'absence de désenfumage ;
- les gaz chauds venant d'un feu puissant peuvent circuler dans un couloir à une vitesse de quelques dm/s. Ainsi, en l'absence de désenfumage, un couloir peut être fortement enfumé en une minute.

2 3 2 Élaboration des feux de dimensionnement

2 3 2 1 Paramètres d'entrée à définir *a priori* par l'organisme reconnu compétent

Tout d'abord, il est important de savoir que dans l'état actuel des modèles, l'allumage des objets combustibles ainsi que la manière dont ils brûlent (énergie et effluents produits) ne sont pas prédits par les logiciels mais par l'utilisateur. En d'autres termes, l'évolution temporelle du débit calorifique et les taux d'émission de produits de combustion sont définis comme des données d'entrée. On parle alors de *source prescrite* G, ou de *terme source* G. La figure 2, inspirée de la norme ISO 16 733-1 de 2015 B5, illustre certaines évolutions possibles du débit calorifique, ainsi que les principales phases de feu à quantifier par l'organisme reconnu compétent pour définir un feu de dimensionnement. Les feux couvants n'y figurent pas, car ce type de feu n'est généralement pas retenu comme étant dimensionnant en ingénierie du désenfumage.

Fig.2 EXEMPLES DE FEU DE DIMENSIONNEMENT



1 : phase de naissance (dans les études de désenfumage, cette phase est quasi-systématiquement négligée par l'ORC)

2 : phase de croissance

3 : phase de puissance maximale. Elle correspond soit à un plateau si le feu est contrôlé par la ventilation [10] ou par le système d'extinction, soit à un ou plusieurs pics si le feu est contrôlé par le combustible [11]

4 : phase de décroissance (dans les études de désenfumage, cette phase est parfois négligée)

5 : activation de l'extinction automatique

6 : feu développé mais contrôlé par l'extinction automatique

7 : feu développé en l'absence d'agent d'extinction

[9] *Avec une hauteur sous plafond d'environ 2,5 m.*
[10] *C'est-à-dire s'il y a déficit de comburant.*
[11] *C'est-à-dire s'il y a déficit de combustible.*

Outre la courbe de débit calorifique, de nombreux autres paramètres doivent être fixés *a priori* par l'organisme reconnu compétent pour décrire un feu. Les paramètres ayant le plus d'influence sont identifiés dans le tableau 1. Ils sont tous prescrits par le modélisateur, c'est-à-dire qu'il s'agit de données d'entrée du modèle numérique. Leur influence est décrite dans la dernière colonne du tableau 1.

Tab.1 **QUELQUES PARAMÈTRES À FIXER *A PRIORI* POUR REPRÉSENTER UN FEU**

PARAMÈTRE DÉCRIVANT LE FEU	COMMENTAIRE	INFLUENCE PRÉVISIBLE DE CE PARAMÈTRE SUR L'ENFUMAGE MODÉLISÉ
Débit calorifique maximal	En ingénierie du désenfumage, cela correspond souvent à un palier : le débit énergétique maximal est maintenu sur une période plus ou moins longue (cf. figure 2).	Un feu puissant génère beaucoup de chaleur et de fumée. Toutefois, des fumées chaudes seront plus facilement évacuées par du désenfumage (surtout naturel) que des fumées plus froides. Le scénario le plus puissant n'est donc pas forcément le plus pénalisant.
Cinétique de combustion (pendant les phases de croissance et de décroissance)	Il s'agit d'un paramètre clef, surtout dans les premiers instants du scénario, quand le désenfumage n'est pas encore activé ou pleinement établi.	Plus le feu croit (resp. décroit) rapidement, plus l'enfumage sera rapide (resp. ralenti). La cinétique pendant la phase de croissance est l'un des paramètres les plus influents.
Enthalpie de combustion	Ce paramètre a un impact direct sur la quantité de gaz combustibles produits, et donc aussi sur la production de suies (fumée), avec le logiciel FDS.	Plus l'enthalpie est grande, moins la quantité de fumée produite (par unité de temps) sera importante, pour un débit calorifique et un taux de production de suie donnés.
Taux de production de suies	Seul le transfert (et éventuellement le dépôt) des suies est prédit. Le calcul permet de prédire où et comment les fumées prescrites par l'utilisateur vont être transportées.	Plus le taux de production de suie est grand, plus la quantité de fumée produite et donc l'enfumage seront importants.
Taux de production de gaz toxiques (p. ex. : CO)	Seul le transport de ces gaz est prédit par le logiciel. Le calcul permet de prédire où et comment les gaz prescrits par l'utilisateur vont être transportés.	Aucun impact sur la quantité de fumée produite. En revanche, plus ce taux est important, plus la fumée produite sera toxique.
Durée du feu	Traditionnellement de l'ordre de 15 à 30 minutes dans la majeure partie des études.	À débit calorifique constant, plus la durée du feu est longue, plus la quantité de fumée dégagée dans le bâtiment est importante. S'il y a un équilibre entre le désenfumage et la quantité de fumée produite, l'enfumage atteint (théoriquement), un niveau stable.
Position de la source prescrite, de l'objet combustible	Le panache de fumée, soumis principalement à la flottabilité en champ libre (loin de tout obstacle), peut être fortement impacté par la géométrie des lieux (p. ex. : foyer proche des murs ou sous une mezzanine) et l'installation de désenfumage (p. ex. : foyer devant l'amenée d'air).	Si le feu est placé près d'obstacles ou d'amenées d'air, l'enfumage sera plus important (dilution et refroidissement des fumées avec de l'air frais, perte de stratification).
Dimension de la source prescrite (surface, volume)	La quantité d'air frais entraîné dans le panache flottant dépend directement du périmètre dudit panache (à une hauteur définie). Cet air frais entraîné va conduire à augmenter le volume des fumées.	Paramètre très influent. Plus la dimension de l'objet combustible est importante, plus l'enfumage sera important (fumée plus diluée). Les dimensions de l'objet combustible évoluent au cours du temps.

2.3.2.2 Recommandations concernant l'élaboration des feux de dimensionnement

Il existe deux familles de feux de dimensionnement. Chaque étude contient généralement au minimum un feu de chaque famille.

La première famille est celle des feux imposés par les pouvoirs publics. En France, un feu imposé est à considérer par espace étudié. Le but d'imposer un feu est d'une part d'assurer une certaine homogénéité dans les études, et d'autre part d'assurer un certain niveau de sécurité. Ces feux assurent également une certaine continuité avec les instructions techniques. Les règles pour identifier le feu imposé à retenir sont décrites en annexe A.2.1.

Recommandation

L'action de l'extinction automatique doit toujours être négligée dans le cas des feux imposés. Dans certaines circonstances, l'organisme reconnu compétent peut choisir de ne pas retenir le feu imposé. Dans ce cas, il doit en faire la demande argumentée auprès de la commission de sécurité dans le rapport préliminaire.

La seconde famille concerne les feux réalisés sur mesure par l'organisme reconnu compétent. Ces feux sont dits « feux libres ». Ils sont laissés à l'entière appréciation des organismes reconnus compétents, en accord avec la maîtrise d'ouvrage. Ils restent soumis à l'accord de la commission de sécurité compétente.

Recommandation

Concernant les feux libres, les recommandations suivantes sont toutefois apportées :

- *la durée et la puissance des feux ne doivent pas conduire à excéder la charge calorifique mobilisable ;*
- *la durée du feu ne devra jamais être inférieure à 15 minutes ;*
- *une attention particulière devra être portée à la ventilation du feu ;*
- *la position du feu devra être défavorable d'un point de vue de la géométrie des lieux ainsi qu'au regard de la position des amenées d'air et des évacuations de fumées ;*
- *l'extinction automatique [12] pourra éventuellement être prise en compte après accord de la commission de sécurité. La modélisation de l'extinction se fait par l'intermédiaire d'une limitation du débit calorifique lors du déclenchement de l'extinction [13] ;*
- *la production de suie devra être fonction de la nature du combustible retenu, de manière réaliste ;*
- *la géométrie du feu doit être reproduite de façon simplifiée mais réaliste, le « périmètre » du feu étant un paramètre très influent.*

2.4 ESTIMATION DE LA DURÉE D'ÉVACUATION DES PERSONNES

Dans le cadre d'une étude de désenfumage, s'intéresser à l'évacuation des personnes [14] revient à estimer sa durée. Il ne s'agit pas d'une tâche aisée, car la prédiction exacte du comportement humain est impossible. Pour cette raison, il faut impérativement garder à l'esprit que ce qui est estimé ne correspond pas à une réalité, mais à un calcul [15] plus ou moins précis, communément admis dans l'état des connaissances actuelles.

[12] *L'extinction peut être obtenue suite à une action humaine (p. ex. : RIA, extincteur) ou par une commande automatique (p. ex. : brouillard d'eau, sprinkler, extinction à gaz, etc.). Dans le cadre de ce guide, il n'est pas conseillé de tenir compte de l'extinction par action humaine.*

[13] *Cette démarche, même si elle ne décrit pas convenablement tous les phénomènes physiques impliqués réellement (destratification, propagation de vapeur chaude…), constitue un premier pas vers la modélisation de l'extinction.*

[14] *Rappelons que ce guide traite du désenfumage, et non du dimensionnement des issues.*

[15] *Déterministe ou probabiliste.*

2.4.1 Définitions et phénomènes

La norme NF EN ISO 13 943 de mars 2011 [B2] définit l'*évacuation* [G] comme l'« exécution d'une action efficace pour atteindre un refuge sûr ou une zone de sécurité ». Un *refuge sûr* [G] y est défini comme un « emplacement temporaire qui est à l'abri d'un danger immédiat dû aux effets de l'incendie » (p. ex. : un espace d'attente sécurisé tel que défini à l'article CO 34 § 6 du règlement de sécurité ; une zone de mise à l'abri au sens des articles U 10 et J 10 du même règlement), et une *zone de sécurité* [G][16] comme une « zone sans danger et depuis laquelle il est possible de se déplacer librement sans être exposé à un incendie » (p. ex. : un emplacement situé à l'extérieur ; une zone du bâtiment située suffisamment loin de l'incendie ; un dégagement protégé tel que défini à l'article CO 34 § 4 du règlement de sécurité). Dans le cadre d'une étude de désenfumage, l'analyse se limite à l'évacuation des personnes présentes dans la zone faisant l'objet de l'étude ou susceptibles de traverser cette zone.

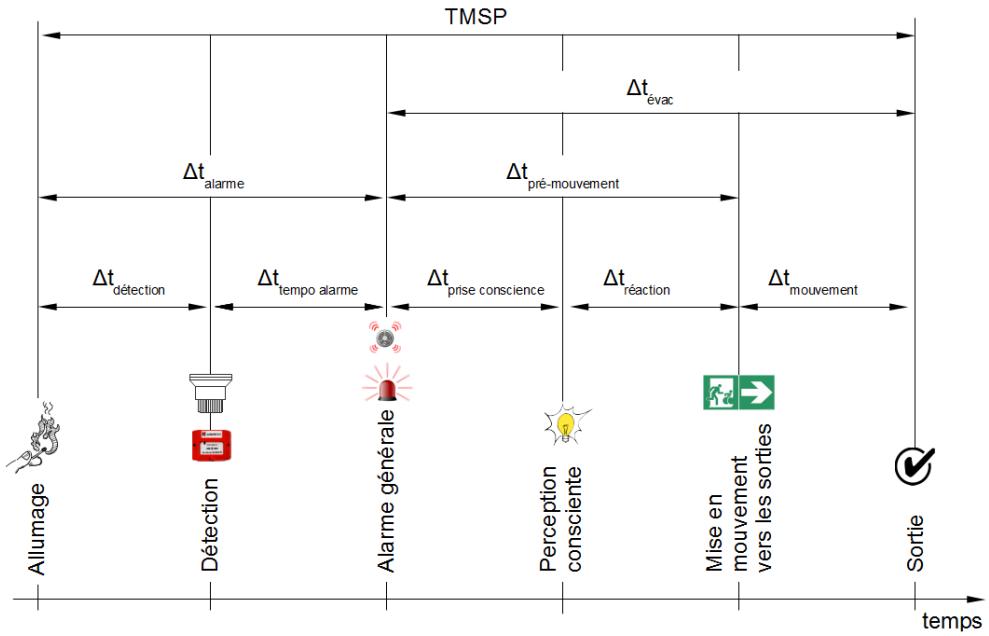
Le *temps nécessaire pour l'évacuation en sécurité (TNES)* [G][17] correspond, selon la même norme, à « la durée calculée nécessaire à un occupant pour passer de son emplacement au moment de l'allumage à un refuge sûr ou une zone de sécurité ». Le *temps d'évacuation* [G] correspond à l'« intervalle de temps qui s'écoule entre le déclenchement de l'alarme incendie (...) et l'instant où les occupants d'une partie spécifique d'un immeuble ou de tout l'immeuble sont capables de pénétrer dans une zone de sécurité » ou un refuge sûr. Le temps d'évacuation concerne donc un ensemble d'occupants alors que le TNES ne concerne qu'un seul occupant. Ce dernier temps peut donc varier d'un occupant à l'autre. Dans le cadre de ce guide, la durée calculée entre l'allumage du feu et l'évacuation du dernier occupant de la zone faisant l'objet de l'étude, ou amené à la traverser, est appelé *temps de mise en sécurité des personnes (TMSP)* [G]. Il est différent du temps d'évacuation, qui lui débute avec l'alarme générale et non avec l'allumage. Concrètement, il s'agit du TNES calculé le plus long.

Le temps de mise en sécurité est généralement découpé en plusieurs phases temporelles, chacune étant spécifique à des phénomènes donnés. Ces phases sont souvent représentées de manière séquentielle, et notamment dans la spécification technique ISO 16 738 de juillet 2009 [B8]. Dans la réalité, les phénomènes sont couplés et certains sont totalement ou partiellement concomitants. Ce découpage en phases indépendantes et cette représentation séquentielle ne sont que des artifices destinés à simplifier la description. La figure 3 est un exemple de représentation séquentielle, qui repose sur la spécification technique ISO 16 738 de 2009 [B8]. Par ailleurs, les différentes notions introduites dans cette figure sont définies selon la norme NF EN ISO 13 943 [B2] (entre guillemets dans la légende ci-dessous). De plus, par souci de cohérence avec le vocabulaire utilisé en prévention incendie, la terminologie est complétée par des références aux normes relatives aux systèmes de sécurité incendie (SSI) et notamment la norme NF S 61-931 de février 2014 [B3].

[16] *À ne pas confondre avec les « zones de mise en sécurité » introduites à l'article MS 54, qui se réfèrent au système de sécurité incendie.*

[17] *Également appelé RSET [G] pour required safe evacuation time.*

Fig.3 **REPRÉSENTATION SÉQUENTIELLE DE LA MISE EN SÉCURITÉ DES PERSONNES**



TMSP : ***acronyme de temps de mise en sécurité des personnes*** G, soit le temps qui s'écoule entre le départ de feu et l'évacuation du dernier occupant vers une zone de sécurité ou un refuge sûr. Concrètement, ce temps correspond à la somme du temps d'évacuation et du délai d'alarme.

$\Delta t_{évac}$: ***temps d'évacuation*** G, soit l'« intervalle de temps qui s'écoule entre le déclenchement de l'alarme incendie (...) et l'instant où les occupants d'une partie spécifique d'un immeuble ou de tout l'immeuble sont capables de pénétrer dans une zone de sécurité » ou un refuge sûr.

Δt_{alarme} : ***délai d'alarme*** G, soit l'« intervalle de temps compris entre l'allumage d'un incendie et le déclenchement de l'alarme ». Dans la pratique, ce délai s'achève lorsque l'alarme générale est émise par les diffuseurs d'évacuation (sonore ou lumineux). Il correspond à la somme des délais de détection et d'activation.

$\Delta t_{pré\text{-}mouvement}$: ***délai de pré-mouvement*** G, soit la « période de temps qui s'écoule après l'émission d'une alarme ou d'un signal d'avertissement d'incendie et avant que les occupants ne commencent à se déplacer (ou se diriger) vers une sortie ». Il s'agit de la somme des délais de prise de conscience et de réaction.

$\Delta t_{détection}$: ***délai de détection*** Ⓖ, soit l'« intervalle de temps qui s'écoule entre l'allumage de l'incendie et sa détection par un système automatique ou manuel ». Dans la pratique, il s'agit du temps qui s'écoule entre le départ de feu et l'apparition du signal sonore et visuel d'alarme restreinte sur le matériel central de l'équipement d'alarme. Ces signaux d'alarme restreinte surviennent suite à l'activation d'un détecteur automatique d'incendie ou à l'action sur un déclencheur manuel.

$\Delta t_{tempo\ alarme}$: ***délai d'activation*** Ⓖ, soit « l'intervalle de temps qui s'écoule entre le déclenchement de la réponse d'un capteur jusqu'à ce que (...) le système d'alarme ou un autre système de sécurité incendie soit totalement opérationnel ». Dans la pratique, ce délai correspond à la temporisation entre l'alarme restreinte et l'alarme générale.

$\Delta t_{prise\ conscience}$: ***délai de prise de conscience*** Ⓖ ou temps de reconnaissance [18], soit la « période suivant l'émission d'une alarme ou d'un signal d'avertissement d'incendie mais avant que les occupants ne commencent à réagir ». En d'autres termes, ce délai correspond au temps que met une personne pour avoir une perception consciente du message. Cependant, à ce stade, l'occupant peut encore ne pas avoir conscience du besoin effectif d'évacuer (cf. temps de réaction). Dans cette définition, le terme « signal d'avertissement d'incendie » n'est pas toujours équivalent au « signal d'alarme générale ». Il peut s'agir également d'un signal émis directement par l'incendie (p. ex. : lumière, chaleur, odeur, bruit...) ou d'un message lancé par un autre occupant (p. ex. : cri, comportement...). Cette précision implique que le processus d'évacuation peut, dans certains cas, commencer avant le déclenchement de l'alarme générale. Cette situation peut, par exemple, correspondre au démarrage rapide d'un feu situé à un endroit bien visible par les occupants dans un établissement dépourvu de détection automatique d'incendie.

$\Delta t_{réaction}$: ***délai de réaction*** Ⓖ ou temps de réponse [19], soit la durée du « comportement observé après que les occupants ont reconnu l'alarme ou le signal d'avertissement d'incendie, et ont commencé à réagir mais avant qu'ils n'aient commencé à évacuer ». Ce temps est généralement dédié à des actions telles que finir la tâche engagée avant le signal d'évacuation (p. ex. : lire un document ou faire des courses), rassembler des affaires, retrouver des proches, etc.

$\Delta t_{mouvement}$: ***temps de mouvement*** Ⓖ, soit le « temps nécessaire pour que tous les occupants d'une partie spécifiée d'un environnement construit se déplacent vers une sortie et la franchissent pour entrer dans une zone de sécurité » ou un refuge sûr. Ce temps est influencé par la vitesse de marche et le débit de passage aux issues. Ces deux facteurs dépendent notamment de la densité des occupants. Ils diminuent lorsque celle-ci dépasse un certain niveau (congestion, engorgement des issues).

[18] *Le terme de « Temps de reconnaissance » apparaît fréquemment dans la littérature francophone spécialisée. Il s'agit cependant d'une traduction inappropriée du terme anglais « Recognition time ».*

[19] *Le terme de « Temps de réponse » apparaît également fréquemment dans la littérature francophone spécialisée. Il s'agit d'une autre traduction possible du terme anglais « Response time ». Dans le cadre de ce guide, le terme délai (ou temps) de réaction est favorisé, puisque l'objet de l'étude est ici un être humain et non un système technique.*

2.4.2 Recommandations concernant l'estimation de la durée d'évacuation

L'estimation de la durée de l'évacuation n'est pas systématique.

Recommandations

Il faut s'intéresser à l'estimation de la durée de l'évacuation pour les études réunissant les deux conditions suivantes :

- *les locaux concernés reçoivent du public [20] ;*
- *les calculs démontrent que le désenfumage ne permet pas de maintenir les cheminements praticables pendant toute la durée du scénario [21].*

Le calcul du TMSP repose sur l'estimation des différents temps (phases) qui le composent et qui sont détaillés au paragraphe 2.4. Dans la pratique, certains de ces termes sont estimés *a priori* de manière forfaitaire (p. ex. : délai de pré-mouvement) tandis que d'autres peuvent être calculés (p. ex. : délai de mouvement, délai de détection). Les méthodes de calcul possibles sont très variées. Certaines sont brièvement décrites à l'annexe A.1.2. L'organisme reconnu compétent est libre de choisir la méthode qu'il estime la plus appropriée.

Recommandations

Tout d'abord, l'organisme reconnu compétent indique explicitement dans son rapport d'étude les différents temps et délais utilisés pour décomposer le TMSP et la manière dont ils ont été définis (estimation a priori ou calcul, méthodes de calcul, etc.). La commission de sécurité vérifiera que les hypothèses retenues sont en cohérence avec le fonctionnement de l'établissement, et notamment pour ce qui concerne la détection et l'alarme.

Ensuite, les formules et les modèles utilisés par l'organisme reconnu compétent doivent faire l'objet de validation et de vérification comme décrit dans l'annexe A.1.3. Par ailleurs, les règles de calcul proposées à l'article GA 23 de l'arrêté du 24 décembre 2007 ont été définies pour les gares, et l'extrapolation à d'autres types d'ERP n'est pas forcément judicieuse. Concernant les règles figurant à l'annexe 3 du guide des Études Spécifiques des Dangers du CETU, elles ne doivent pas être utilisées en l'état en ingénierie du désenfumage.

2.5 ENVIRONNEMENT ET CONDITIONS EXTÉRIEURES

Les conditions météorologiques extérieures peuvent avoir un impact sur le désenfumage, surtout sur le désenfumage naturel. Une attention particulière devra être portée à ces phénomènes.

Pour ce qui est de la température extérieure, son impact est, dans la majeure partie des cas, relativement limité.

Pour ce qui est du vent, son impact est nettement plus conséquent dans certaines zones du territoire (p. ex. : bord de mer). Cependant, la prise en compte du vent extérieur dans l'étude n'est pas systématique et dépend à la fois de l'installation de désenfumage et de l'environnement du volume à désenfumer.

Recommandations

La détermination de la température extérieure et de la pertinence de la prise en compte du vent est laissée à l'appréciation de l'organisme reconnu compétent. Ce dernier doit justifier son choix.

[20] *Bien entendu, le maître d'ouvrage reste libre de demander à l'organisme reconnu compétent de s'intéresser à l'évacuation du personnel*

[21] *Rappel : 15 minutes au minimum.*

Le présent paragraphe donne des indications pour évaluer si une installation de désenfumage est suffisamment performante. Ce paragraphe s'inscrit dans la continuité du règlement de sécurité, et notamment des paragraphes 1 et 8 de l'instruction technique 246.

3 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'INSTALLATION DE DÉSENFUMAGE

3.1 DÉFINITIONS

Selon la norme NF EN ISO 13 943 de mars 2011 [B2], une conception basée sur la performance est « mise au point pour atteindre des objectifs définis et des critères d'acceptabilité ». Les objectifs définis sont appelés, dans le cadre de ce guide et eu égard aux travaux menés dans le cadre du Projet National Ingénierie de la Sécurité, *objectifs de sécurité* [G]. La norme susmentionnée définit les *critères d'acceptabilité* [G] comme des « critères qui forment la base d'évaluation de l'acceptabilité de la sécurité de la conception d'un environnement construit ». Ces critères peuvent être qualitatifs, quantitatifs ou une combinaison des deux. Cependant, dans le cadre d'une étude de désenfumage, ces critères sont le plus souvent quantitatifs. Dans ce cas, ils reposent sur la comparaison de grandeurs physiques avec des valeurs seuils. Le dictionnaire Larousse définit, dans le domaine spécifique de la physique, une grandeur comme une « propriété physique à laquelle on peut faire correspondre une valeur numérique ».

La *température* [G] est un exemple de grandeur physique utilisée en ingénierie du désenfumage. Elle correspond, selon le même dictionnaire, à une « grandeur empirique caractéristique d'un système, qui permet une description quantitative des phénomènes liés à la sensation de chaud ou de froid ressentie à son contact et qui est d'autant plus élevée que le système est chaud ».

Le *coefficient d'extinction de la lumière* [G] est une autre grandeur utilisée en ingénierie du désenfumage. Ce coefficient correspond, selon la norme NF EN ISO 13 943 de mars 2011 [B2], au « logarithme népérien du rapport de l'intensité lumineuse incidente à l'intensité lumineuse émise, par unité de longueur de la trajectoire optique ». En d'autres termes, il traduit l'atténuation de la lumière, due notamment à la présence de suies. Ce coefficient est l'un des nombreux facteurs influençant la visibilité. La *visibilité* [G] est définie, dans la même norme, comme la « distance maximale à laquelle un objet de dimension, luminosité et contraste définis peut être vu et reconnu ». Les autres facteurs influençant cette visibilité qui peuvent être cités ici sont, entre autres, l'éclairage, le contraste ainsi que les caractéristiques physiologique et psychologique des individus. La *toxicité* [G] est définie, toujours dans la même norme, comme « la qualité de ce qui est toxique » c'est-à-dire « nocif ». La norme ISO 13 571 de septembre 2012 [B9] distingue les toxiques asphyxiants (p. ex. : monoxyde de carbone, dérivés du cyanure) des irritants (p. ex. : acide chlorhydrique, ammoniac).

Une autre grandeur citée dans l'instruction technique 246 est le *flux de chaleur* G. Ce flux est défini dans la norme B2 comme la « quantité d'énergie thermique émise, transmise ou reçue par unité de surface et de temps ». Ce flux se compose d'une partie radiative et d'une autre convective. Le *flux thermique radiatif incident* G correspond quant à lui à l'énergie arrivant sur une cible sous forme de rayonnement. Il est à distinguer du flux net reçu, qui lui traduit le bilan d'énergie radiative à la surface de la cible.

Le *temps disponible pour l'évacuation en sécurité (TDES)* G [22] est utilisé dans certaines études d'ingénierie, notamment anglo-saxonnes. La norme NF EN ISO 13 943 B2 le définit comme « pour un occupant individuel, l'intervalle de temps calculé entre le moment de l'allumage et le moment où les conditions sont telles que l'occupant se trouve dans l'incapacité d'exécuter une action efficace d'évacuation vers un refuge sûr ou une zone de sécurité ».

La norme ISO 13 571 B9 donne des lignes directrices pour estimer ce temps. Dans le cadre de ce guide, le concept de *Temps d'Atteinte du Critère (TAC)* G est préféré au TDES. Il s'agit du temps à partir duquel un critère d'acceptabilité est dépassé dans une zone préalablement définie par l'organisme reconnu compétent. Autrement dit, c'est l'instant à partir duquel cette zone est considérée comme trop dégradée, au regard d'un critère particulier. Ce concept permet de ne pas s'intéresser à chaque occupant de manière individuelle, comme l'induirait le TDES. De plus, ce concept permet à l'organisme reconnu compétent de définir librement la ou les zones dans lesquelles il procède à l'analyse, et ainsi de découper l'espace (cf. § 3 3 4 1). Par exemple, il peut analyser tout l'établissement d'un seul tenant, ou le découper par niveau ou par plus petites zones (cheminement, local, mezzanine, compartiment, portion de mail de centre commercial, etc.).

3 2 DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE

L'évaluation de la performance d'une installation de désenfumage s'apprécie en vérifiant si les objectifs de sécurité sont atteints. Ces objectifs sont définis au début de l'étude par l'organisme reconnu compétent, en concertation avec la MOA et en respectant les préconisations du présent guide. Pour chaque objectif retenu, l'évaluation est conduite soit avec la méthode absolue (cf. § 3 2 1), soit avec la méthode relative (cf. § 3 2 2), soit avec les deux méthodes. Le choix de la méthode à utiliser dépend notamment des objectifs sécurité retenus (cf. § 3 2 3). Dans tous les cas, les objectifs et la méthode d'évaluation doivent être expressément formulés dans le rapport préliminaire.

3 2 1 Méthode absolue

La méthode absolue consiste à vérifier que les objectifs de performance sont atteints en comparant des grandeurs physiques calculées avec des critères d'acceptabilité quantitatifs. Il y a donc derrière cette démarche, l'idée d'une garantie d'un niveau de sécurité minimal. Cette méthode s'inscrit totalement dans l'esprit du § 8 de l'IT 246, qui préconise de manière explicite les objectifs de sécurité, les grandeurs physiques et, de manière qualitative, les critères d'acceptabilité à utiliser dans une étude d'ingénierie. Ce guide vient en complément de ces prescriptions réglementaires.

3 2 2 Méthode relative

La méthode relative revient à comparer au moins deux configurations distinctes et à définir laquelle est la plus performante, au regard de certains objectifs prédéfinis. Cette comparaison est généralement réalisée quantitativement à l'aide de grandeurs physiques, bien qu'une analyse qualitative seule soit possible.

La solution réglementaire, lorsqu'elle existe, peut faire partie des configurations testées. Dans ce cas, la méthode relative est fondée sur le § 1 de l'IT 246. La solution réglementaire devient alors la référence, et la comparaison par rapport à cette référence permet d'évaluer si les objectifs de sécurité sont atteints.

De plus, cette méthode relative prend tout son sens dans le cadre de la rénovation de bâtiments construits antérieurement à la réglementation

[22] *Également appelé ASET * pour Available Safe Evacuation Time.*

actuelle. Dans ce cas, il est alors fréquent de comparer la configuration avant travaux avec la (les) configuration(s) projetée(s) après travaux afin de montrer dans quelle mesure les travaux constituent une amélioration du niveau de sécurité.

3.2.3 Lien entre objectif de sécurité et choix de méthode

En matière de sécurité du public, l'évacuation est primordiale. Par conséquent, l'objectif de sécurité « maintenir praticables les cheminements destinés à l'évacuation du public » doit être considéré. Pour cet objectif, la méthode absolue doit être utilisée au minimum. Les deux obligations formulées aux 1er et 2e tirets du § 8 de l'instruction technique doivent être respectées, en utilisant les grandeurs physiques indiquées au tableau 3. Autrement dit, l'étude doit permettre de savoir si l'évacuation du public est ou n'est pas assurée dans des conditions satisfaisantes. Dans le cas particulier où les locaux étudiés ne reçoivent pas de public, l'organisme reconnu compétent choisira un autre objectif de sécurité cohérent avec l'étude.

Pour tout autre objectif que « maintenir praticables les cheminements destinés à l'évacuation » (p. ex. : « limiter la propagation du feu », « limiter les dommages financiers », « protéger le personnel », etc.), le choix de la méthode est laissé à l'appréciation de l'organisme reconnu compétent.

À titre illustratif, le tableau 2 ci-dessous rappelle les objectifs de sécurité définis à l'article DF 1 du règlement de sécurité, ainsi que la méthode d'évaluation de la performance utilisable.

Tab.2 **MÉTHODE D'ÉVALUATION DE PERFORMANCE À UTILISER EN FONCTION DES OBJECTIFS DE SÉCURITÉ RÉGLEMENTAIRES**

OBJECTIFS DE SÉCURITÉ (ARTICLE DF 1)	MÉTHODE À UTILISER
Maintenir praticables les cheminements destinés à l'évacuation du public	Absolue, et éventuellement relative en complément
Limiter la propagation du feu	Relative ou absolue
Faciliter l'intervention des sapeurs-pompiers	Relative ou absolue

3.3 ÉLÉMENTS PERMETTANT D'APPRÉCIER LA PERFORMANCE D'UNE INSTALLATION DE DÉSENFUMAGE

3.3.1 Grandeurs physiques

Les grandeurs physiques sont les données de sortie calculées par le modèle utilisé (p. ex. : température, densité des fumées…). L'organisme reconnu compétent définit, au début de l'étude, les grandeurs physiques dont il estime avoir besoin pour son analyse. Les grandeurs recommandées sont synthétisées et commentées dans le tableau 3.

Ce guide ne recommande pas l'emploi direct des deux grandeurs physiques explicitement citées au paragraphe 8 de l'instruction technique 246, à savoir la hauteur libre de fumée et le flux thermique reçu par les personnes. D'autres grandeurs, plus simples à calculer ou plus en accord avec les logiciels de calcul actuels sont recommandées. Elles sont détaillées ci-dessous.

L'exposition des personnes aux fumées est évaluée non plus par la hauteur libre de fumée mais par le coefficient d'extinction de la lumière. En effet, la notion de hauteur libre de fumée sous-entend l'existence d'une stratification thermique, ce qui n'est pas toujours le cas. Ce type de grandeur, s'il est très pertinent avec les modèles simples dits de zone, ne l'est plus avec les outils plus évolués utilisés aujourd'hui dans les études de désenfumage.

L'exposition au rayonnement est évalué non pas par le flux de chaleur reçu par les personnes, mais par le flux thermique radiatif incident. Ce dernier est plus simple à calculer. En effet, le calcul du flux de chaleur reçu par les personnes nécessite la résolution de l'équation de transfert radiatif, laquelle dépend entre autres de la température des corps opaques et du champ de températures dans les corps semi-transparents. Par ailleurs, rappelons que la contribution convective du flux de chaleur est traitée par l'intermédiaire de la température.

Tab.3 **GRANDEURS PHYSIQUES USUELLES**

GRANDEURS PHYSIQUES RECOMMANDÉES	SIGNIFICATION
Coefficient d'extinction de la lumière, en m^2/m^3, soit m^{-1}	**Traduit la présence de fumées.** Cette grandeur sert à estimer, de manière indirecte, la « hauteur libre de fumée » évoquée au § 8 de l'instruction technique 246. Ce coefficient est directement lié à la densité de suie (kg/m^3) et à un coefficient massique [23] dépendant de la nature du combustible. Ce dernier coefficient traduit la capacité des combustibles à créer des suies plus ou moins opacifiantes (p. ex. : *via* la granulométrie des suies)
Température de l'air, en °C	**Traduit l'ambiance thermique dans laquelle évoluent les personnes [24] et les objets.** Cette grandeur est utilisée pour évaluer la fraction convective du « flux de chaleur reçu par les personnes » mentionné au § 8 de l'instruction technique 246. Il s'agit bien de la température de l'air telle qu'elle serait mesurée par un capteur protégé du rayonnement. L'influence du flux de chaleur rayonné à distance ne doit pas être pris en compte ici, car il l'est à travers le flux thermique radiatif (cf. ligne suivante).
Flux thermique radiatif incident, en kW/m^2	**Traduit l'agression thermique subie par les personnes et les objets, sous forme de rayonnement.** Cette grandeur est utilisée pour évaluer la fraction radiative du « flux de chaleur reçu par les personnes » mentionné au § 8 de l'instruction technique 246.

D'autres grandeurs que celles figurant dans ce tableau sont utilisables par l'organisme reconnu compétent. Toutefois, certaines doivent être utilisées avec précautions. Elles sont détaillées dans le paragraphe suivant.

Tout d'abord, les grandeurs fondées sur la toxicité (p. ex. : concentration de monoxyde de carbone) sont entachées d'imprécision au regard à la fois du manque de connaissance de la composition des foyers, du recours à un terme source pour les modéliser et des logiciels de calcul actuels utilisés dans les conditions d'une étude d'ingénierie. Elles doivent donc être utilisées avec beaucoup de prudence. Il en va de même pour la visibilité calculée par certains logiciels. En effet, cette distance calculée ne correspond pas aux conditions de visibilité réelles induites par l'enfumage et l'éclairage des locaux. De plus, elle ne tient pas compte des caractéristiques individuelles des occupants. En d'autres termes, l'usage du mot « visibilité » est abusif dans ce contexte, et peut clairement constituer une source de confusion pour les non-initiés. Enfin, les grandeurs physiques héritées des modèles numériques dits de zone (p. ex. : hauteur d'interface thermique, température de zone haute) ne devraient plus être utilisés

[23] *Selon la page 35 du « Dossier Pilote des tunnels, fascicules ventilation » édité par le CETU et daté de novembre 2003, la conversion d'un coefficient d'extinction en m^{-1} en masse de suies par m^3 se fait sur la base de l'équivalence suivante : 1 m^{-1} ↔ 0,1 à 0,2 g/m^3 pour des combustibles courants. Cela correspond à une valeur du coefficient massique d'extinction telle que $k_m \in [\![1\,250 ; 10\,000]\!]$ m^2/kg. Dans la pratique, la valeur de 8 700 m^2/kg est la plus fréquemment retenue dans les études de désenfumage.*

[24] *Public, personnel, service de secours…*

qu'exceptionnellement, pour dégrossir l'analyse. En cas de recours aux modèles avancés (cf. annexe A113), ces grandeurs ne sont plus pertinentes.

332 Critères d'acceptabilité, seuils d'acceptabilité

Un critère d'acceptabilité résulte de la comparaison de données quantitatives calculées (p. ex. : le champ de température à hauteur d'homme) à une valeur seuil, dite *seuil d'acceptabilité* G ou limite d'acceptabilité (p. ex. : 40 °C).

Trois critères sont imposés et ne doivent pas être omis si les locaux concernés reçoivent du public. Ils sont détaillés dans le tableau 4. Ils correspondent à l'objectif de sécurité fondé sur l'évacuation du public. Le cas échéant, les seuils d'acceptabilité peuvent être légèrement ajustés par l'organisme reconnu compétent si ce dernier en fait la demande argumentée dans son rapport préliminaire.

Tab.4 CRITÈRES D'ACCEPTABILITÉ IMPOSÉS POUR LA MÉTHODE ABSOLUE

OBJECTIF RÉGLEMENTAIRE DE SÉCURITÉ	CRITÈRES IMPOSÉS
Maintenir praticables les cheminements destinés à l'évacuation du public	À une hauteur de 2 m, température de l'air dans les cheminements < T_{seuil}, avec T_{seuil} = 40° C [25]
	À une hauteur de 2 m, coefficient d'extinction de la lumière dans les cheminements < K_{seuil}, avec K_{seuil} = 0,4 m^{-1} [26]
	À une hauteur de 2 m, flux thermique radiatif incident sur le public dans les cheminements < Φ_{seuil}, avec Φ_{seuil} = 2 kW/m^2 [27]

Ces trois critères sont pénalisants pour l'étude de désenfumage. En effet, les seuils d'acceptabilité sont inférieurs aux seuils de létalité et de blessures importantes B10, pour les durées d'exposition considérées. Ils doivent donc plutôt être considérés comme des seuils au-delà desquels il est estimé que l'évacuation dans de bonnes conditions n'est plus assurée. De plus, ces critères doivent être mis en perspective avec l'analyse quantitative telle que proposée au § 334.

En plus de ces trois critères imposés, l'organisme reconnu compétent reste libre d'en définir d'autre, s'il l'estime nécessaire. Dans le cas où l'étude intègre des critères relatifs à l'intervention des secours, les seuils fixés par l'organisme reconnu compétent ne devront pas excéder les valeurs suivantes, à une hauteur de 1 m : pour la température de l'air T_{seuil} = 100° C [28] ; pour le flux thermique radiatif incident Φ_{seuil} = 5 kW/m^2 [29].

[25] *Ce seuil est inférieur aux seuils d'hyperthermie et de brûlure, pour les durées d'exposition considérées (cf. page 2-140 de la référence B10). La raison de ce seuil de 40 °C est que le critère tient également compte des phénomènes suivants : l'air est pollué par les effluents de l'incendie ; l'air est également potentiellement humide, ce qui augmente le transfert thermique ; la convection est augmentée par l'incendie et par le système de désenfumage, ce qui augmente également le transfert thermique ; enfin, les conditions de stress générées par l'incendie peuvent affecter la résistance à la chaleur. Par ailleurs, si la température initiale ou extérieure considérée dans l'étude est significativement éloignée de 20 °C, un ajustement de ce seuil de 40 °C peut être envisagé par l'organisme reconnu compétent.*

[26] *Cela correspond à une « visibilité » de 7,5 m (resp. 20 m) pour les signaux réfléchissants (resp. lumineux), en considérant les hypothèses de calcul de la note n° [23] de la page précédente.*

[27] *Selon Simms et Hinkley (cf. page 2-142 de la référence B10), une exposition à une irradiance de 2,5 kW/m² conduit au seuil de douleur au bout d'un délai compris entre 30 et 60 secondes ; et une exposition à une irradiance de 1,26 kW/m² conduit à ce même seuil au bout de 5 minutes. Au regard de ces données, la valeur de 2 kW/m² paraît raisonnable.*

[28] *Cette valeur correspond aux pratiques actuelles des ORC. À titre de comparaison, les casques des services de secours sont testés pour résister 20 minutes dans un four à 90 °C (flux convectif), selon la norme ISO 17 493 de décembre 2000 B11 portant sur les vêtements et les équipements de protection contre la chaleur.*

[29] *Cette valeur correspond aux pratiques actuelles des ORC. Elle est sécuritaire au regard des équipements de protection individuel des services de secours, pendant une durée d'engagement de 20 minutes.*

3 3 3 Analyse qualitative des résultats

L'analyse qualitative des résultats est incontournable. Elle sert à ce que l'organisme reconnu compétent ait une interprétation physique et phénoménologique des résultats des *simulations numériques* G. En effet, le but de cette analyse est l'identification dans le temps et dans l'espace des phénomènes survenant lors de l'incendie. Peuvent être cités les exemples suivants : brassage de la fumée, écoulement de fumée ou d'air frais, stagnation ou recirculation de la fumée, fuites, écoulements au travers des ouvertures, jet de plafond, tourbillons, augmentation de la pression, etc.

Cette analyse repose à la fois sur les grandeurs physiques définies ci-dessus et sur d'autres grandeurs pouvant aider à l'identification des phénomènes (p. ex. : pression, champ de vitesses). De plus, certaines zones, telles que les cheminements, doivent faire l'objet d'une analyse minutieuse.

3 3 4 Analyse quantitative des résultats

La première étape de l'analyse quantitative est le traitement des résultats (cf. § 3 3 4 1). Les résultats traités sont ensuite utilisés pour estimer le temps d'atteinte des critères. Ces derniers, couplés à l'analyse qualitative (cf. § 3 3 3), permettent de définir si la solution de désenfumage est performante ou non (cf. § 3 3 4 2).

3 3 4 1 Traitement statistique quantitatif et estimation du temps d'atteinte des critères

Le présent guide recommande d'une part un traitement statistique des résultats afin de capter uniquement les phénomènes les plus représentatifs, et d'autre part l'ajout d'un coefficient de pondération. Ce coefficient sert à tolérer des dépassements localisés et transitoires des seuils d'acceptabilité, ce qui est acceptable puisque ces derniers, ainsi que les feux imposés, sont pénalisants. L'annexe A 3 détaille une manière de procéder au traitement statistique des résultats, et donne des clefs d'analyse des résultats traités ainsi obtenus. Le principe est toutefois brièvement détaillé ci-après.

Le paragraphe 3 3 1 indique qu'au début de l'analyse, l'organisme reconnu compétent retient les grandeurs physiques d'intérêt (p. ex. : température, coefficient d'extinction). Lors de la réalisation de l'étude, l'organisme reconnu compétent définit d'abord une zone dans laquelle il souhaite suivre ces grandeurs physiques. Cette zone, dite *zone d'intérêt* G, peut correspondre aussi bien à un volume qu'à une surface. Des exemples de zones d'intérêt usuelles sont un plan horizontal à hauteur d'homme, le volume d'une trémie d'escalier ou encore un cheminement. La zone du feu (flammes et panache) étant par nature incompatible avec la présence d'occupants, elle peut être exclue de la zone d'intérêt. Ensuite, chaque grandeur physique d'intérêt doit être calculée en plusieurs points dans chaque zone d'intérêt. Ce positionnement en plusieurs points est incontournable pour capter les phénomènes locaux. L'ensemble des valeurs obtenues en chaque point, et à chaque instant, est ensuite traité statistiquement par l'organisme reconnu compétent pour définir la sollicitation subie par les cibles. Dans le cadre de ce guide, cette sollicitation est définie comme la moyenne temporelle et spatiale pénalisée d'un coefficient de pondération fixé à 2 fois l'écart-type. En supposant une distribution gaussienne, cela revient à accepter des dépassements de seuils dans 5 % de la zone d'intérêt. Ce type d'approche, qui se prête bien à une automatisation, peut néanmoins dissimuler des phénomènes ponctuels ou locaux dangereux. C'est la raison pour laquelle il est incontournable que l'organisme reconnu compétent procède en parallèle à l'analyse phénoménologique évoquée au § 3 3 3.

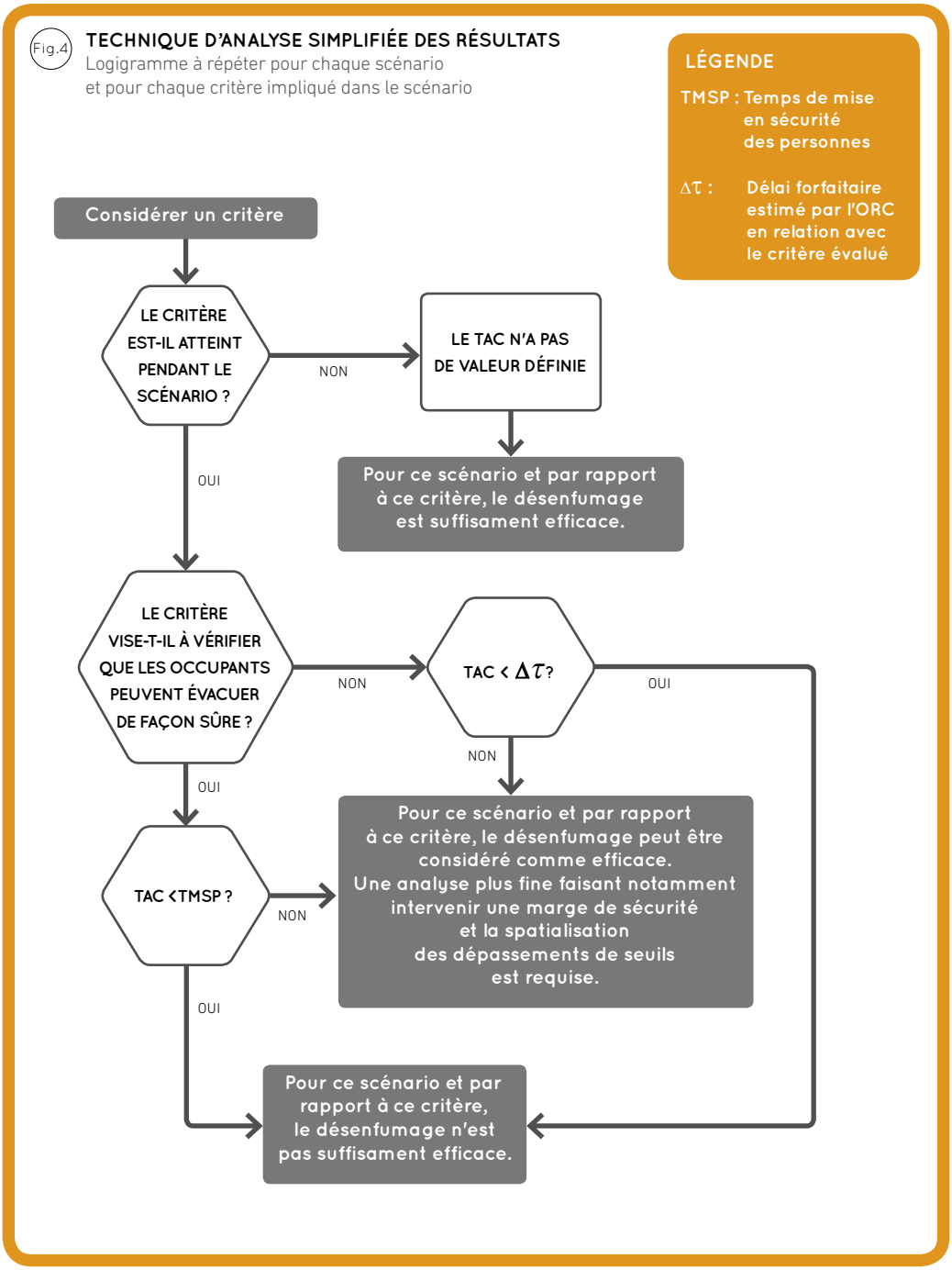
Le traitement statistique des résultats recommandé ci-dessus permet de définir plus facilement l'instant à partir duquel chaque critère d'acceptabilité est atteint dans la zone d'intérêt. L'annexe A 3 illustre la manière de procéder. Pour chaque critère, cet instant correspond au Temps d'Atteinte du Critère (TAC). Il y a donc autant de TAC que de critères.

3 3 4 2 Formalisation d'une technique d'analyse simplifiée

Les TAC peuvent être utilisés pour faciliter l'analyse en utilisant le logigramme de la figure 4. Ce logigramme

est conçu pour être appliqué successivement à tous les critères et pour chaque scénario d'incendie de dimensionnement. Cette technique d'analyse est très simplifiée. Il reste indispensable que l'organisme reconnu compétent procède en parallèle à une analyse approfondie, puis explique et commente ses résultats de manière explicite et pédagogique. Ce logigramme est commenté ci-après.

Fig.4 **TECHNIQUE D'ANALYSE SIMPLIFIÉE DES RÉSULTATS**
Logigramme à répéter pour chaque scénario
et pour chaque critère impliqué dans le scénario



Le logigramme indique que si le critère n'est pas atteint pendant le scénario analysé, alors il n'a pas de valeur chiffrée (TAC = +∞). Si pour ce même scénario, aucun des TAC n'a de valeur chiffrée, cela signifie qu'aucun critère n'est atteint et donc que l'installation de désenfumage peut être considérée comme suffisamment efficace.

D'un autre côté, si le critère est atteint pendant le scénario, il faut comparer la valeur du TAC à un délai de référence. Si le critère concerné vise à vérifier si le public peut évacuer de façon satisfaisante, alors le délai de référence est le TMSP. Pour tous les autres critères (p. ex. : liés à l'intervention des secours ou à la protection des biens), le délai de référence est estimé forfaitairement par l'organisme reconnu compétent et est spécifique pour chaque critère (p. ex. : durée d'intervention des secours). Ce second délai de référence est noté $\Delta\tau$ dans la figure 4.

Deux situations peuvent alors se présenter. Elles sont commentées et illustrées ci-dessous :

Situation 1 : Si, pour le scénario analysé, au moins l'un des TAC est significativement inférieur au temps de référence, cela signifie que le critère est dépassé trop tôt. Au moins un objectif n'est pas atteint. Par exemple, si le TAC est significativement inférieur au TMSP, cela indique que toutes les personnes présentes ne peuvent pas évacuer en sécurité, car les conditions deviennent intenables alors qu'il reste des occupants dans la zone. Cet exemple est illustré par la figure 5. Dans ce cas, la solution de désenfumage est alors considérée comme étant insuffisamment efficace. Une modification du désenfumage, ou à défaut des mesures compensatoires choisies au regard du ou des critères atteints trop précocement sont nécessaires.

Situation 2 : Dans le cas contraire, la solution de désenfumage peut être considérée comme efficace, en fonction d'une analyse plus fine des résultats réalisée par l'organisme reconnu compétent. Cette analyse doit notamment reposer sur une localisation des dépassements de seuils afin de s'assurer qu'ils ne surviennent pas à des endroits critiques (p. ex. : devant les issues). De plus, cette analyse peut, le cas échéant, faire intervenir la notion de *marge de sécurité* ⓔ, comme illustré par la figure 7. La valeur adéquate de la marge est laissée à l'appréciation de l'organisme reconnu compétent.

Fig.5 **ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE SIMPLIFIÉE DES RÉSULTATS**

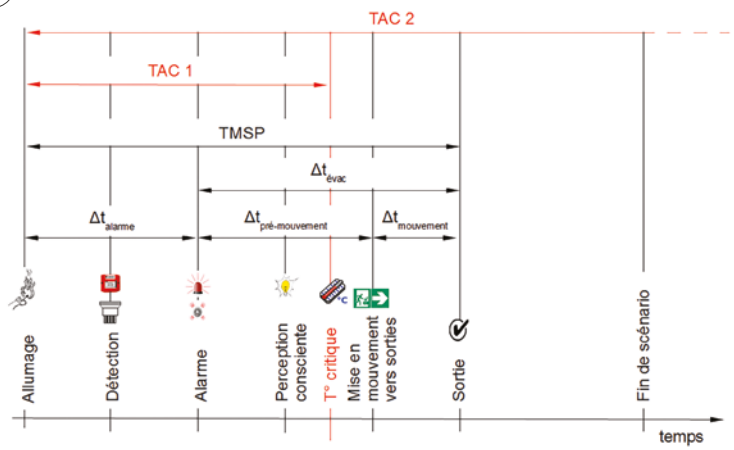


Fig.6 **ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE SIMPLIFIÉE DES RÉSULTATS**

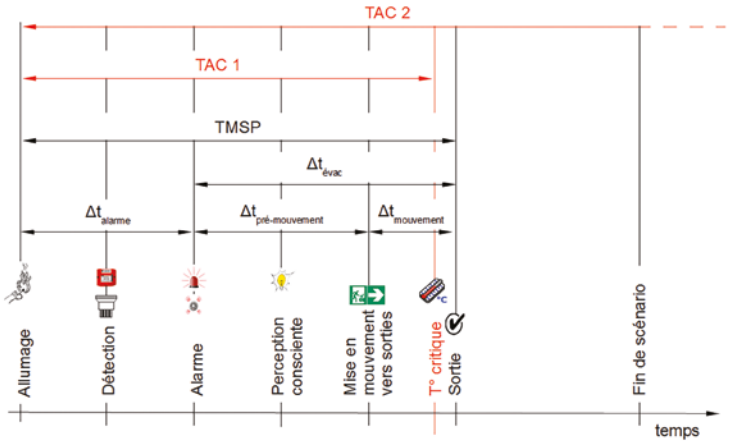
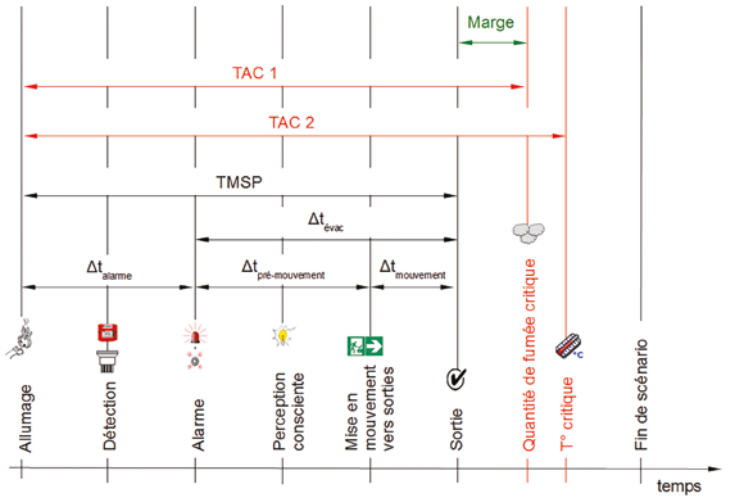


Fig.7 **ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE SIMPLIFIÉE DES RÉSULTATS**



Les figures 5, 6 et 7 illustrent quelques configurations possibles. Ces figures reprennent les temps et délais caractéristiques introduits au § 2.4.1. Sur la figure 5, le TAC 1 est significativement inférieur au TMSP. Dans cet exemple, la température dans les cheminements devient critique juste après que les occupants aient pris conscience de l'alarme, mais avant qu'ils n'aient commencé à se déplacer vers les sorties. Dans ce cas, même si le TAC 2 n'est jamais atteint pendant toute la durée du scénario, le désenfumage est jugé insuffisant. Sur la figure 6, le TAC 1 est très légèrement inférieur au TMSP (p. ex. : quelques secondes). Dans ce cas, il n'est pas possible de conclure directement. Une analyse plus approfondie est nécessaire. Sur la figure 7, les TAC 1 et 2 sont tous les deux atteints pendant le scénario après que les occupants aient évacué. Si la marge de sécurité (en vert sur la figure 7) est suffisamment importante, alors le désenfumage est considéré comme efficace. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si la marge est trop restreinte, il ne l'est pas. Dans les deux cas, une analyse approfondie est nécessaire

Ce chapitre, certes succinct, ne pouvait être omis. Il apporte des précisions sur les essais de désenfumage *in situ* pouvant être réalisés préalablement ou postérieurement à l'étude d'ingénierie du désenfumage.

4 ESSAIS DE DÉSENFUMAGE *IN SITU*

4 1 DÉFINITIONS

Les essais de désenfumage sur site consistent à enfumer les locaux, puis à mettre en fonctionnement le système de désenfumage afin de visualiser son effet sur les fumées. Ces essais sont parfois également appelés essais de désenfumage en conditions réelles.

Ces essais ne sont pas systématiques. Ils peuvent toutefois accompagner une étude d'ingénierie du désenfumage. En effet, la commission de sécurité peut demander leur réalisation, en application des dispositions prévues par le paragraphe 8 de l'IT 246. L'annexe A 4 de ce guide est plus spécifiquement dédiée aux essais en conditions réelles. Elle détaille les différents types d'essais de désenfumage possibles (p. ex. : essais aérauliques, essais de fumée froide, tiède ou chaude, etc.), et apporte des éléments permettant de choisir l'essai adapté au contexte.

4 2 OBJECTIFS DES ESSAIS DE DÉSENFUMAGE ACCOMPAGNANT UNE ÉTUDE D'INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE

Tout d'abord, il n'y a aucune obligation que l'organisme qui réalise l'étude d'ingénierie soit également celui qui réalise l'essai. Toutefois, la présence de l'organisme reconnu compétent pendant les essais de désenfumage peut être envisagée.

Ensuite, il existe deux types d'essais : avant l'étude ou après l'étude d'ingénierie de désenfumage.

Concernant les essais avant l'étude d'ingénierie (si les volumes existent déjà), ils ont pour but de procéder à un état des lieux de l'existant. Ces essais sont généralement intéressants, notamment pour l'organisme reconnu compétent, car ils peuvent permettre de :

- comprendre l'aéraulique dans les espaces concernés ;
- convaincre les acteurs du projet du besoin d'une étude ;
- caler le modèle numérique (il est possible de reproduire l'essai numériquement) ;
- éventuellement, obtenir des mesures de débits d'extraction et de soufflage.

Concernant les essais après l'étude d'ingénierie, ils permettent de s'assurer du fonctionnement correct du système technique (p. ex. : branchement des ventilateurs, sens des écoulements). Si le but recherché est de valider l'étude d'ingénierie, au sens du § 8 de l'instruction technique 246, des précautions supplémentaires spécifiques doivent être prises, puisque les feux de dimensionnement retenus dans l'étude sont généralement très différents de ceux mis en jeu lors de l'essai. En effet, les feux de dimensionnement conduisent à dégager beaucoup plus de chaleur et, le cas échéant, de fumées, que les

essais. Les reproduire dans la réalité aurait des conséquences clairement indésirables pour le bâtiment. Ainsi, si l'essai vise à valider l'étude d'ingénierie, il convient de s'assurer qu'un scénario d'essai a été pris en compte dans la modélisation. En d'autres termes, pour avoir un point de comparaison valable, il serait pertinent que l'organisme reconnu compétent ait simulé l'essai avec la maquette numérique utilisée pour l'étude.

4.3 DISPOSITIONS À METTRE EN ŒUVRE LORS DE LA RÉALISATION DES ESSAIS

Les essais doivent faire l'objet au préalable d'un protocole d'essais contenant au minimum les informations suivantes :

- le contexte des essais (par exemple complément à une étude d'ingénierie, constat lors de visite de problèmes liés au système de désenfumage…) ;
- la description des espaces dans lesquels les essais seront réalisés ;
- la description du désenfumage mis en œuvre dans ces espaces ;
- le type d'essais proposés et justification (fumées froides-tièdes-chaudes, contraintes de site, stratégie de désenfumage…) ;
- le déroulement proposé pour les essais (séquençage).

Les essais doivent être instrumentés afin de pouvoir faire une analyse. L'essai doit être filmé à l'aide de caméras vidéo, le rendu par clichés photographiques étant généralement insuffisant. De plus, lorsqu'elle est possible à mettre en place, une métrologie associée à l'essai permet une évaluation objective des performances. Elle aide en général lors de l'interprétation des observations. Peuvent notamment être citées les mesures de vitesses des gaz en certains endroits judicieusement choisis, les mesures de température pour renseigner sur l'état de stratification thermique ou encore les mesures de différences de pression.

Les essais doivent faire l'objet d'un compte-rendu reprenant les éléments suivants :

- le rappel du protocole d'essais avec, le cas échéant, les modifications apportées par rapport au protocole initial ;
- une interprétation et analyse des essais avec, si possible, un montage vidéo ;
- une conclusion concernant l'efficacité du système de désenfumage au regard des résultats des essais réalisés.

Dans tous les cas, il faut conserver à l'esprit que les essais, même avec des fumées chaudes, ne peuvent pas reproduire l'intensité des phénomènes d'un incendie puissant. Par conséquent, lorsque les essais sont réalisés postérieurement à l'étude d'ingénierie du désenfumage, il convient idéalement d'intégrer, dans le compte-rendu, une analyse permettant de faire le lien entre l'étude d'ingénierie et les essais.

NOTA FINAL

Ce guide est l'aboutissement de travaux de synthèse, de réflexion méthodologique, de recherche et de retours d'expériences menés depuis 2004. Il est le fruit d'un réflexion collective entre différents partenaires. Sa vocation est de servir de référence pour le recours à l'ingénierie du désenfumage en France, appliquée à un établissement recevant du public. Ce guide peut éventuellement être extrapolé pour partie dans d'autres contextes, à conditions de procéder avec précautions. Ce document s'adresse en premier lieu aux maîtres d'ouvrage, tant privés que publics. Il pourra également servir aux commissions de sécurité amenées à se prononcer sur les études d'ingénierie du désenfumage. Enfin, il intéressera également les organismes reconnus compétents par le ministère de l'Intérieur pour réaliser ces études.

Comme tout état de l'art à un instant donné, ce guide est fondé sur les connaissances, les outils et les bonnes pratiques en vigueur au moment de son élaboration. Par conséquent, il peut devenir obsolète, soit du fait de l'évolution des techniques ou des réglementations, soit par la mise au point de méthodes plus performantes.

A 1 MODÈLES IMPLIQUÉS DANS L'INGÉNIERIE DU DÉSENFUMAGE

Le choix du modèle à utiliser est de la responsabilité de l'organisme reconnu compétent. Les paragraphes suivants présentes quelques familles de modèles utilisables.

A 1 1 MODÈLES DE FEU ET DE FUMÉES

L'étape incontournable d'une étude d'ingénierie est celle de la modélisation du feu et de la fumée. Cette modélisation peut être plus ou moins fine, en fonction des objectifs recherchés. Dans tous les cas, une étude de désenfumage doit forcément passer par la modélisation des phénomènes locaux [31], en particulier ceux liés aux mouvements de la fumée et à ses caractéristiques (densité, opacité, température, composition, fraction rayonnée). Cela implique le recours aux *modèles* G les plus précis : les modèles *aérauliques* G de champ qui sont détaillés au § A 1 1 3. Toutefois, certains modèles moins raffinés peuvent être utilisés en pré-dimensionnement par l'ORC, c'est pourquoi ils sont brièvement évoqués ci-dessous. Tous les modèles présentés ci-dessous sont des modèles déterministes, car à ce jour, ils sont les seuls utilisés en ingénierie du désenfumage.

A 1 1 1 Modèles analytiques

Ce type de modèle peut être utilisé en première approche lors d'une étude d'ingénierie du désenfumage.

Les modèles analytiques sont les plus simples. Ils ne nécessitent pas de recourir à un solveur numérique et permettent donc de réaliser des calculs très rapidement. Ils peuvent être de deux natures : soit des modèles physiques ponctuels basés sur la résolution de lois de la physique simplifiées ; soit des modèles empiriques, obtenus par un traitement statistique (p. ex. : corrélation) de mesures effectuées en situation réelle. Dans les deux cas, les résultats sont approximatifs et leur utilisation est limitée à un domaine d'application plus ou moins strict. Il s'agit des conditions dans lesquelles ils sont pertinents. Pour les appliquer en dehors de ce champ d'application, certaines précautions doivent être respectées afin de s'assurer que les approximations supplémentaires engendrées sont acceptables (cf. § A 1 3). Par exemple, un modèle empirique ayant été élaboré sur la base de feux de nappe (combustible liquide) en milieu ouvert n'est pas dans son champ d'application s'il est utilisé pour un feu de mobilier en milieu confiné. Ainsi, l'utilisation de ces modèles requiert une connaissance et une compréhension des conditions dans lesquelles les formules ont été établies ainsi qu'une capacité à les extrapoler de manière acceptable. De telles formules se trouvent dans des ouvrages de références tels que le « SFPE Handbook » B 1 2, les normes ISO 16 734 à 16 737 B 1 3 B 1 4 B 1 5 B 1 6, la norme ISO 24 678-6 B 1 7 ou le tome 3 du Traité de Physique du Bâtiment B 7. Les Eurocodes contiennent aussi des modèles analytiques, ces derniers n'ont toutefois pas été établis pour les applications en désenfumage.

A 1 1 2 Modèles numériques de zone

Ce type de modèle peut être utilisé en première approche lors d'une étude d'ingénierie du désenfumage.

Il s'agit des premiers modèles numériques d'incendie, développés dans les années 70 pour simuler des feux de compartiments. Aujourd'hui, ils sont majoritairement multi-compartiments, c'est-à-dire que plusieurs locaux peuvent être représentés. Ces locaux peuvent être interconnectés et ouverts sur l'extérieur. Tous les modèles de zone reposent sur un découpage grossier de l'espace en zones dans lesquelles des équations différentielles couplées, résultant des *équations de conservation* G, sont résolues. Les zones peuvent

[31] *Avec une résolution inférieure au mètre cube.*

concerner des solides (p. ex. : parois) ou des fluides (p. ex. : panache, gaz contenu dans un local). Les grandeurs physiques obtenues sont *uniformes* G[32] et *instationnaires* G dans la zone. Sont adjointes au système d'équations différentielles plusieurs formules analytiques pour prédire certaines grandeurs ou paramètres d'intérêt (p. ex. : température de flamme, masse d'air entraîné dans le panache, débits entrants et sortants aux ouvertures, coefficient convectif, etc.)

Les modèles de zone utilisables en ingénierie du désenfumage sont ceux dits « à deux zones gazeuses ». L'hypothèse fondatrice est l'existence d'une stratification thermique dans chaque local. Elle permet d'y faire apparaître une zone haute, plus chaude et une zone basse, plus froide. La frontière entre ces deux zones est un plan horizontal appelé interface thermique. Dans la réalité, cette interface est plus diffuse et n'est pas strictement située dans le même plan à l'échelle du local. Une seconde hypothèse forte est que cette stratification thermique coïncide avec la répartition de la fumée dans le local : la zone haute est enfumée, la zone basse ne l'est pas (veine claire). La hauteur de l'interface thermique est alors assimilée à la hauteur libre de fumée définie dans l'instruction technique 246. Cette hypothèse correspond au cas où la diffusion des espèces coïncide avec la diffusion thermique. Cette hypothèse est donc une approximation par rapport aux cas réels.

Ces modèles à deux zones permettent une bonne approximation dans de nombreuses configurations. Ils ne sont toutefois pas toujours adaptés dans les cas où la stratification thermique n'est pas effective, et notamment dans les cas suivants : *(i)* dans les premiers instants de l'incendie ; *(ii)* lorsque le feu ne dispose pas d'une puissance suffisante pour maintenir une couche de fumée en partie haute, ce qui est fréquent dans les locaux de grande hauteur ou superficie ; *(iii)* lorsque la longueur de la pièce est très nettement supérieure à sa largeur (p. ex. : couloir) ; *(iv)* pour des ouvrages à géométrie complexe, non parallélépipédique. Par ailleurs, ces modèles ne permettent pas d'appréhender des phénomènes locaux tels que les écoulements de fumée le long des parois, l'apparition locale de nappes de fumées, etc.

Exemple : *CFAST, MAGIC, CDI, OZONE, BRANDZFIRE, CIFI et SYLVIA sont des modèles de zones, avec chacun leurs particularités. L'utilisateur reconnu compétent doit être capable de choisir le plus adapté à la problématique de l'étude. Par exemple, le guide d'utilisateur du logiciel CFAST* B18 *indique qu'il est applicable pour des locaux dont le volume maximal est de l'ordre de 1 000 m³. Ainsi, pour des applications à des locaux plus vastes que cette limite, l'organisme reconnu compétent doit réaliser une validation complémentaire, ou se référer à un cas de validation pour une volumétrie et un foyer analogues.*

A113 Modèles numériques de champ

Il s'agit du type de modèle à utiliser pour réaliser l'étude d'ingénierie du désenfumage.

Ces modèles sont des applications de la *mécanique des fluides numérique* G, *Computational Fluid Dynamics*, ou *CFD*, en anglais. C'est la raison pour laquelle ils sont parfois appelés « modèles CFD ». Le terme de « modèles de champ » est également couramment rencontré.

Le but premier de ces modèles est la prédiction des mouvements d'un fluide. Elle est obtenue par une résolution des équations de la mécanique des fluides sur une grille de calcul tridimensionnelle, appelée *maillage* G. La fermeture du système d'équations est réalisée à l'aide de modèles de turbulence (cf. paragraphe suivant). Pour des applications en situation d'incendie, des modèles de combustion, de rayonnement et de transferts thermiques dans les solides (p. ex.: les parois) sont couplés à ce modèle aéraulique principal. Les résultats sont obtenus dans chacune des *mailles* G constituant le maillage. Cela permet une représentation spatiale des phénomènes d'autant plus fine que le maillage est raffiné. Pour les applications en ingénierie du désenfumage, la dimension transversale des mailles va typiquement du décimètre au mètre, selon les zones étudiées et les applications. Pour limiter les effets de la diffusion numérique, les plus petites mailles sont dédiées aux zones à fort gradient (p. ex : proches du foyer) et les plus grandes aux zones à faible gradient (p. ex. : loin du foyer, avec peu de structures tourbillonnaires).

[32] *Sauf dans certains modèles particuliers, par exemple celui de Suzuki et al.* B19.

En ingénierie du désenfumage, les équations résolues résultent d'approximations, plus ou moins grossières, de celles de Navier-Stokes. Pour mémoire, ces équations traduisent les lois de conservation de masse, d'énergie et de quantité de mouvement pour les fluides Newtoniens, c'est-à-dire ceux pour lesquels la viscosité est indépendante des contraintes (p. ex. : de pression) qui leur sont appliquées. De plus, des approximations relatives à la modélisation de la *turbulence* G sont incontournables, car les maillages utilisés à l'échelle du bâtiment ou du local ne sont pas assez raffinés [33] pour permettre une simulation numérique directe des équations. Deux types de simplification sont couramment utilisés : soit les équations de Navier-Stokes sont moyennées (i), soit elles sont filtrées (ii).

(i) Les équations moyennées sont écrites avec des moyennes d'ensemble [34]. Cette formulation consiste à écrire les grandeurs physiques comme la somme d'une valeur moyenne et d'une valeur fluctuante. Les propriétés des moyennes d'ensemble font que la somme des fluctuations autour de la moyenne est nulle. Conceptuellement, cela revient à considérer la turbulence comme un phénomène aléatoire impliquant le recours à une approche statistique. Les modèles qui découlent de cette simplification sont appelés « modèles RANS » pour Reynolds Average Navier-Stokes. Dans la pratique, ils ne permettent de résoudre que les grandeurs moyennes d'un écoulement. Il s'agit des modèles les plus économes en temps de calcul. Ils sont généralement robustes et peu sensibles au régime de l'écoulement. De plus, les solveurs numériques proposés par les fabricants bénéficient d'une importante antériorité, les rendant éprouvés.

(ii) Lorsque les équations sont filtrées, les tourbillons plus grands que la maille sont résolus explicitement, et l'effet des plus petits est modélisé à l'aide d'un modèle dit « de sous-mailles ». Divers modèles de ce type existent et sont applicables en ingénierie du désenfumage. Ils ne sont pas détaillés ici. Les modèles fondés sur les équations filtrées sont appelés « modèles LES », pour Large Eddy Simulation (en français : Simulation des Grandes Échelles). Cela permet de représenter des écoulements instationnaires et tridimensionnels, et donc de modéliser l'évolution dynamique de l'écoulement. Ces modèles requièrent un temps de calcul important. De plus, les résultats sont plus sensibles au maillage que les modèles RANS, puisque la dimension de la maille est la longueur de coupure à partir de laquelle les tourbillons ne sont plus résolus. Le recours à un maillage trop grossier engendre des erreurs parfois importantes dans les résultats, auxquelles viennent s'ajouter les effets de la diffusion numérique.

D'autres méthodes appelées VLES [35], URANS [36] ou hybrides RANS/LES font l'objet d'intenses activités de recherche depuis une vingtaine d'années. Les méthodes hybrides permettent de tirer les avantages des deux approches. Par ailleurs, on peut noter que l'utilisation d'un modèle LES avec une loi logarithmique de paroi s'apparente, d'une certaine manière, à un modèle hybride du fait d'une part de la loi de paroi et d'autre part de la diffusion numérique.

***Exemple** : CFX, PHOENICS, FLUENT, FDS, OPENFOAM et STAR CCM+ sont des modèles de champ, avec chacun leurs particularités. Certains peuvent être utilisés en RANS ou en LES. L'utilisateur reconnu compétent doit être capable de choisir le plus adapté à la problématique de l'étude.*

[33] *La simulation numérique directe des équations de Navier-Stokes requiert un maillage de l'ordre des échelles dissipatives, et de même pour le pas de temps. Cela implique, en situation turbulente, un maillage très fin, inférieur au mm, incompatible avec des applications à l'échelle du bâtiment, ou même du local.*

[34] *La moyenne d'ensemble permet de définir les moyennes de Favre et de Reynolds.*

[35] *VLES : Very Large Eddy Simulation.*

[36] *URANS : Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes.*

L'efficacité d'un modèle numérique dépend non seulement de sa vérification (cf. § A13), mais aussi son efficacité numérique (vitesse de calcul) et encore de la facilité avec laquelle un tiers expert (notamment dans le cadre du système qualité de l'organisme reconnu compétent) peut contrôler les données d'entrée.

A12 MODÈLES D'ÉVACUATION DES PERSONNES EN SITUATION D'INCENDIE

Les modèles d'évacuation des personnes sont évoqués ici, car ils sont utiles pour calculer le temps de mise en sécurité des personnes (TMSP) dans le cadre d'une étude de désenfumage. Cette annexe n'a pas vocation à être extrapolée dans un autre contexte.

Les premiers modèles analytiques d'évacuation ont vu le jour à la fin des années 60, avec les travaux de Predtechenskii B20, Pauls B21 et Fruin B22. Aujourd'hui, la modélisation de l'évacuation fait encore l'objet d'actives recherches académiques. Il s'agit donc d'une discipline relativement récente.

Aujourd'hui, aucun des deux arrêtés introduisant le recours à l'ingénierie de sécurité incendie en France B23 B24 ne fait référence à la modélisation de l'évacuation des personnes. Dans la pratique, les premiers calculs basiques d'évacuation sont apparus dès 2004 dans le cadre d'études d'ingénierie de désenfumage. Toutefois, les pratiques sur ce sujet ne sont pas encore clairement établies et vont probablement évoluer dans les années à venir.

Une étude bibliographique sur les modèles d'évacuation existants B25 a permis d'identifier plus de 50 outils différents, fondés sur des modèles et approches très divers. La responsabilité du choix de l'outil, ainsi que son utilisation dans de bonnes conditions, incombent à l'organisme reconnu compétent.

Tous les outils peuvent être différentiés en utilisant des critères de classification. Il n'existe pas, à ce jour, de classification unanimement reconnue pour les modèles d'évacuation. Le tableau 5 liste les principaux critères de classification disponibles dans la littérature scientifique spécialisée B25 B26 B27. Chaque type de modèle est détaillé ci-après.

À noter qu'un même modèle peut être classé selon plusieurs critères. Par exemple, les règles édictées à l'article GA 23 forment un modèle de mouvement empirique, macroscopique, déterministe, analytique et indépendant de l'incendie.

Tab.5 PRINCIPAUX CLASSEMENTS DES MODÈLES D'ÉVACUATION DES PERSONNES

CRITÈRE DE CLASSIFICATION	TYPES DE MODÈLE
Comportement humain	Modèle de mouvement vs modèle de comportement
Échelle d'analyse	Modèle macroscopique vs modèle microscopique
Phénomènes aléatoires, chaotiques	Modèle déterministe vs modèle stochastique
Nature de résolution	Modèle analytique vs modèle numérique
Effets du feu	Modèle indépendant vs modèle couplé

Les « modèles de mouvement » sont ceux qui reproduisent uniquement le mouvement des personnes ou de la foule dans le processus d'évacuation. Il s'agit d'une vision très simplifiée de l'évacuation. Ces modèles peuvent découler des lois de l'hydraulique appliquée à un fluide incompressible (la foule, plus ou moins dense) ou être le fruit de corrélations sur des essais (modèles empiriques). Dans ces modèles, les personnes se déplacent généralement de façon optimisée : par le chemin le plus court ou le plus rapide. Ces modèles sont utiles pour identifier les points de congestion, les formations de files d'attentes, les goulots d'étranglement. Leur utilisation permet également d'identifier le temps minimal en dessous duquel il est physiquement impossible d'évacuer une zone définie au regard des dégagements disponibles. À ce jour, ce type de modèle est le plus souvent utilisé dans les études de désenfumage.

Les « modèles de comportement » sont ceux dans lesquels certains aspects de la complexité humaine sont pris en compte. D'autres actions que le mouvement des personnes sont ajoutées, pouvant traduire des phénomènes tels que l'affiliation (chercher ses proches), le panurgisme (suivre quelqu'un), le choix des issues en fonction de paramètres plus ou moins compliqués (sortie préalablement connue, visible, enfumée, longueur de file d'attente, etc.)... Ces modèles permettent une prise en compte plus réaliste de l'évacuation que les modèles de mouvement. S'ils sont utilisés de manière déterministe, ils n'offrent toutefois que l'illusion de la réalité, le comportement humain ne pouvant être modélisé dans toute sa complexité.

Dans un « modèle microscopique », chaque personne est représentée individuellement, avec ses propres caractéristiques. Si les individus sont autonomes et interagissent les uns avec les autres, ces modèles sont alors appelés « multi-agents ». L'ensemble des comportements individuels forme le comportement de la foule. Ces modèles sont assez populaires, d'une part, car ils sont conceptuellement faciles à appréhender puisque dans la réalité, chaque individu a son individualité propre ; d'autre part car ils sont souvent couplés avec les logiciels de traitement d'image offrant un rendu visuel d'apparence réaliste. Cependant, les temps de calcul sont importants, car il est nécessaire de résoudre des équations pour chaque individu et, le cas échéant, de considérer leurs interactions.

Dans un « modèle macroscopique », c'est la foule dans son ensemble qui est représentée, et non pas l'individu. La foule est alors caractérisée par des propriétés globales, en particulier une densité d'autant plus grande que les personnes sont serrées les unes aux autres. Cette densité admet un seuil au-delà duquel il n'est plus possible de comprimer la foule, ainsi qu'un autre au-delà duquel les personnes sont ralenties dans leur mouvement. La valeur de ces seuils varie selon les modèles, les utilisateurs et les applications (p. ex : type de foule). Le temps de calcul avec ces modèles est généralement court.

Un « modèle probabiliste » est fondé sur une ou plusieurs variables aléatoires, continues ou discrètes. En d'autres termes, il intègre la notion de hasard. L'introduction de variables aléatoires est courante lorsque les phénomènes à modéliser sont mal connus ou régis par des équations difficiles ou impossibles à résoudre. Cette stratégie de modélisation est très adaptée pour l'évacuation des personnes. Ce type de modèle permet d'explorer de nombreux scénarios d'évacuation possibles.

Un « modèle déterministe » ne fait pas intervenir de variables aléatoires. Les résultats ne permettent que d'étudier un nombre restreint de scénarios d'évacuation préalablement identifiés, appelés « scénarios comportementaux de dimensionnement » B8.

Les modèles de mouvement peuvent être déterministes ou probabilistes. Les modèles de comportement sont majoritairement probabilistes.

Lorsque les équations mises en jeu sont simples (p. ex. : les premiers modèles de mouvement), les équations sont résolues analytiquement. De nombreux modèles utilisés aujourd'hui font appel à la résolution numérique.

Enfin, les interactions entre l'incendie et l'évacuation peuvent être négligées si les modèles aéraulique et d'évacuation sont indépendants,

ou considérées s'ils sont couplés. Le couplage entre les modèles peut être plus ou moins compliqué. Par exemple, les personnes peuvent être ralenties, voire stoppées par l'incendie, changer de parcours s'il y a trop de fumée ou de chaleur, etc. De plus, le couplage peut être unilatéral ou bilatéral. Dans le premier cas, le feu et la fumée influent sur les personnes, mais non l'inverse. La plupart des modèles couplés utilisés actuellement sont de ce type-là. Ils offrent l'avantage de pouvoir réaliser la simulation de l'incendie dans un premier temps, puis celle de l'évacuation ensuite. Dans le second cas, les personnes peuvent également influencer le déroulement de l'incendie (p. ex. : en ouvrant des portes, en utilisant un extincteur, etc.). Ces modèles nécessitent de résoudre simultanément ou quasi-simultanément les équations relatives à l'incendie et aux personnes, et d'assurer le lien entre elles.

A 1 3 VÉRIFICATION ET VALIDATION DES MODÈLES, DES OUTILS DE CALCUL

En matière de modélisation, la *validation* G revient à quantifier si un modèle ou un outil de calcul numérique est une représentation fidèle de la réalité. Elle implique de comparer les résultats de calcul, soit avec des données expérimentales ou issues de sinistres réels, soit avec les résultats d'autres modèles préalablement validés. La *vérification* G revient à déterminer si le modèle ou l'outil de calcul est conforme à ce qui est prévu au cahier des charges de son développement. En d'autres termes, cela revient à vérifier qu'il n'y ait pas eu d'erreur d'écriture, de formulation ou d'implémentation du modèle au sein d'un système informatique.

Tous les modèles et les outils de calcul utilisés dans le cadre des études de désenfumage doivent avoir fait l'objet de vérification et de validation par leur(s) développeur(s). De plus, l'organisme reconnu compétent doit procéder lui-même à une validation des modèles pour les applications en ingénierie du désenfumage. Cette seconde validation vise à s'assurer que les modèles et les outils sont utilisés dans des conditions adéquates, et sur des configurations dans lesquelles la pertinence des résultats est assurée. Il doit également vérifier que les données d'entrée ont été correctement définies et intégrées à l'outil de calcul.

La norme ISO 16 730 d'août 2015 B 2 8 traite des procédures et des exigences pour la vérification et la validation des méthodes de calcul. Elle est composée de plusieurs parties : la première est générale et les 5 autres sont des exemples d'application. Les exemples portant sur les modèles de zone (partie 2), de champ (partie 3) et d'évacuation (partie 5) peuvent servir de base pour la vérification et la validation des modèles dans le cadre de l'ingénierie de désenfumage.

A 2 DONNÉES POUR LES SCÉNARIOS D'INCENDIE DE DIMENSIONNEMENT

A 2 1 FEUX IMPOSÉS

Les feux imposés ci-dessous ont vocation à remplacer ceux qui étaient en vigueur avant la parution de ce guide, c'est-à-dire ceux émanant d'un courrier adressé par la DGSCGC à chaque ORC. Ces feux reposaient sur les 3 surfaces de feu associées aux classes d'établissements définies dans l'instruction technique 246 (9, 18 et 36 m^2), avec une valeur de référence de puissance surfacique imposée comprise entre 300 et 500 kW/m^2.

Les nouveaux feux imposés s'appliquent aussi bien pour les locaux, que les halls, les atriums, les compartiments [37] ou les gares [38]. En revanche, les circulations, les escaliers ou d'autres espaces plus spécifiques tels que les refuges, sont volontairement restés exclus, car ils ne sont pas des lieux de départ de feu à considérer de manière systématique dans une étude d'ingénierie. Ainsi, ils sont traités uniquement par une approche de feux définis librement par l'ORC, si ce dernier estime qu'un départ de feu à cet endroit est pertinent (p. ex. : dans le cas d'un palier d'escalier aménagé).

Par ailleurs, les nouveaux feux imposés reposent sur les principes suivants :

- la puissance maximale de feu, la cinétique de croissance, le taux de production de suies et l'enthalpie de combustion sont des données imposées ;
- la géométrie de l'objet combustible est laissée à l'appréciation de l'ORC. Ainsi, les surfaces de feux de 9, 18 et 36 m^2 n'ont plus de raison spécifique d'être retenues. Toutefois, même si l'ORC est libre de définir la géométrie du combustible, il doit veiller à ce que le débit calorifique surfacique ait une valeur réaliste à tout instant, y compris pendant les phases de croissance et de décroissance de la puissance de feu ;
- la puissance maximale de feu peut être diminuée par l'ORC, si la géométrie et la ventilation de l'espace désenfumé ne permettent pas une bonne oxygénation du foyer [39] ;
- la durée de feu est fixée par l'ORC dans l'intervalle [15 – 30] minutes ;
- les actions d'extinction, qu'elles nécessitent l'intervention d'une personne ou d'un système automatique, ne sont pas prises en compte pour ces feux imposés ;
- la décroissance du feu par épuisement du combustible n'est pas prise en compte pour ces feux imposés ;
- les classes d'activités définies dans l'instruction technique 246 sont reprises en quasi-totalité, et un feu atténué est ajouté pour les configurations à faible potentiel calorifique.

A 2 1 1 Détail des feux imposés possibles

Quatre feux différents ont été définis, les données figurent dans le tableau 6.

La figure 8 illustre ces 4 feux imposés, sur une durée de 20 minutes, avec une cinétique de croissance de forme parabolique

[37] *Lorsque le compartiment est traité en plateau paysager, ou avec des cloisons partielles, par analogie avec les dispositions de l'article DF 8.*

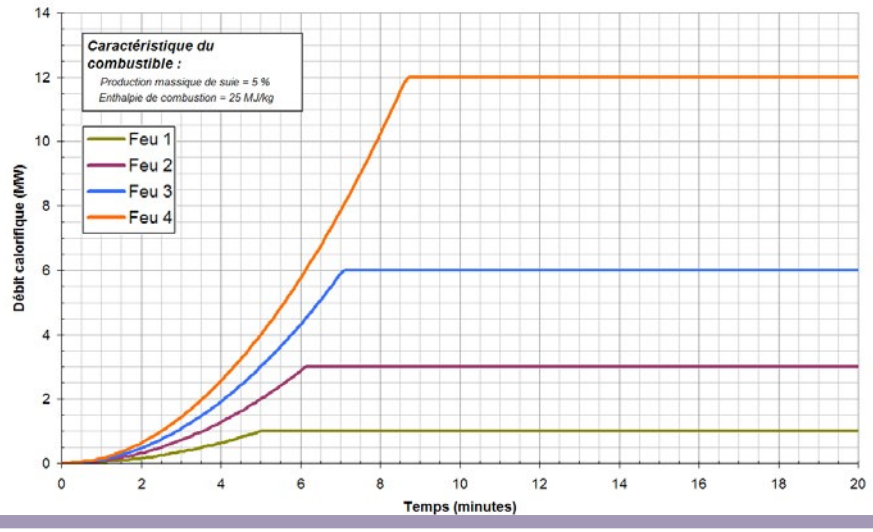
[38] *À l'exception des quais, qui sont à traiter par des feux libres uniquement (cf. § A 2 1 2 1).*

[39] *Il est rappelé que pour des combustibles courants, il n'est pas possible d'obtenir plus de 13,1 kJ par kg d'oxygène consommé B 2 9.*

Tab.6 **CARACTÉRISTIQUES DES 4 FEUX IMPOSÉS POSSIBLES**

	PUISSANCE DE FEU OBTENUE APRÈS LA PHASE DE CROISSANCE	INSTANT D'ATTEINTE DE LA PUISSANCE MAXIMALE, À +/- 15 SECONDES	TYPE DE MONTÉE EN PUISSANCE	TAUX MASSIQUE DE PRODUCTION DE SUIE	ENTHALPIE DE COMBUSTION
Feu 1	1 MW	5 minutes	Parabolique[40] ou linéaire[41]	5 %	25 MJ/kg
Feu 2	3 MW	6 minutes			
Feu 3	6 MW	7 minutes			
Feu 4	12 MW	8,5 minutes			

Fig.8 **ÉVOLUTION TEMPORELLE DES DÉBITS CALORIFIQUES POUR LES 4 FEUX IMPOSÉS POSSIBLES, AVEC UN EXEMPLE DE CINÉTIQUE DE CROISSANCE DE FORME PARABOLIQUE**



A 2 1 2 Feu à sélectionner parmi les feux possibles

Les paragraphes ci-dessous indiquent quel feu retenir en fonction des situations.

Si une configuration ne correspond à aucune des situations prévues par les paragraphes ci-après, l'ORC doit néanmoins retenir l'un des feux imposés. Il retient celui correspondant à la configuration s'approchant le plus de celle étudiée.

A 2 1 2 1 Pour les gares

Les feux à retenir figurent dans le tableau 7. La gare y est traitée comme un établissement recevant du public particulier, tout en conservant des feux imposés équivalents avec les autres types d'établissements.

Le point notable pour les gares est que les feux de matériel(s) roulant(s) ont été exclus, car ils font l'objet d'une réflexion parallèle à ce guide. La zone des quais est donc à traiter par l'ORC par le biais d'un feu libre.

[40] *Dans ce cas, l'équation de débit calorifique pendant la phase de croissance est* $\dot{Q} = \alpha.t^2$, *avec :* $\alpha_{feu1} = 0{,}011$ kW/s², $\alpha_{feu2} = 0{,}023$ kW/s², $\alpha_{feu3} = 0{,}034$ kW/s², $\alpha_{feu4} = 0{,}046$ kW/s².

[41] *Dans ce cas, l'équation de débit calorifique pendant la phase de croissance est* $\dot{Q} = a.t$, *avec les coefficients directeurs suivants :* $a_{feu1} = 3{,}33$ W/s, $a_{feu2} = 8{,}33$ W/s, $a_{feu3} = 14{,}29$ W/s, $a_{feu4} = 23{,}53$ W/s.

Tab.7 **TABLEAU DE CORRESPONDANCE ENTRE L'ACTIVITÉ OU LE CARACTÈRE D'EXPLOITATION DE L'ESPACE ÉTUDIÉ ET LE FEU À CONSIDÉRER : CAS DES GARES**

TYPE D'ESPACE DÉSENFUMÉ	ACTIVITÉ OU CARACTÈRE D'EXPLOITATION	NUMÉRO DU FEU
Espace à faible potentiel calorifique	Emplacement à caractère ferroviaire où le public transite, au sens de l'article GA 5.1 (p. ex. : couloir, escaliers mécaniques, passages souterrains)	Feu 1
Espace à potentiel calorifique courant	- Emplacement de gare à caractère d'exploitation ferroviaire où le public stationne, ou stationne et transite, au sens de l'article GA 5.1 et à l'exception des quais et des consignes à bagages, (p. ex. : locaux de vente, de renseignements, de réservation ou d'information, salles de correspondances, halls avec des guichets de vente de billets, etc.) - Emplacement de gare à caractère d'exploitation non ferroviaire, à l'exception des magasins de ventes, au sens de l'article GA 5.2 (p. ex. : restaurants, cafés, débits de boissons, etc.)	Feu 2
	- Consignes à bagages de gare - Magasins de vente	Feu 4

A 2 1 2 2 Pour tous les autres établissements recevant du public

Le feu à retenir est indiqué dans le tableau 8, construit par analogie avec l'annexe de l'instruction technique 246. Ce qui dirige le choix du feu imposé à retenir n'est pas la disposition architecturale des lieux (superficie, hauteur, mise en communication de plusieurs niveaux, hall, compartiment, ouvertures, etc.), mais l'activité ou le caractère d'exploitation de l'espace. Dans la réalité, l'importance prévisible des feux dépend de la ventilation des lieux (p. ex. : portes, fenêtres, etc.) et des aménagements présents. Ces derniers dépendent eux-mêmes à la fois de l'exploitation des lieux et des dimensions de l'espace. En effet, pour une exploitation donnée, les aménagements sont généralement plus restreints dans les espaces plus petits. Cependant, l'influence des dimensions de l'espace est indirectement prise en compte par la possibilité offerte à l'ORC de réduire la puissance maximale de feu en cas de déficit de comburant (cf. § A 2 1). Il en va de même pour l'impact de la ventilation. Il ne reste donc plus à ce stade que l'exploitation des lieux à considérer. Sur ce point, lorsque les lieux peuvent être exploités de plusieurs manières, il convient de retenir la plus pénalisante, même s'il s'agit d'une manifestation temporaire.

Exemple : *Un établissement scolaire dispose d'un vaste hall d'entrée dans lequel sont situés des distributeurs de boissons et collations, des tables, des chaises, des canapés, etc. Il s'agit là de la seule occupation possible du hall. Le feu à retenir est le n°2. En revanche, si le chef d'établissement envisage d'utiliser ce hall pour réaliser une fois par an des spectacles de fin d'année et donc d'installer un espace scénique, le feu à considérer est alors soit le n° 3, soit le n°4, en fonction du classement de réaction au feu des décors.*

Par ailleurs, le tableau 8 offre la possibilité d'utiliser un feu réduit pour les espaces à faible potentiel calorifique. La définition de ce qu'est un espace à faible potentiel calorifique est laissée à l'appréciation de l'ORC, qui doit argumenter sa décision dans son rapport préliminaire. Il peut, par exemple, s'appuyer sur une limitation du potentiel calorifique, sur le classement de réaction au feu, etc. Toutefois, des contraintes d'exploitation peuvent découler de l'utilisation de ce feu réduit. Il est de la responsabilité de l'ORC, d'une part de les définir de manière explicite et de les indiquer dans ses rapports (préliminaire, d'étude et, le cas échéant, de synthèse) ; d'autre part d'en avertir le maître d'ouvrage. Ainsi, en raison des contraintes d'exploitation engendrées, il est recommandé de ne recourir à ce feu réduit qu'à titre exceptionnel. De plus, l'accord explicite de la commission de sécurité doit être obtenu pour retenir ce feu réduit.

Tab.8 **TABLEAU DE CORRESPONDANCE ENTRE L'ACTIVITÉ OU LE CARACTÈRE D'EXPLOITATION DE L'ESPACE ÉTUDIÉ ET LE FEU À CONSIDÉRER**

TYPE D'ESPACE DÉSENFUMÉ	ACTIVITÉ OU CARACTÈRE D'EXPLOITATION	NUMÉRO DU FEU
Espace à faible potentiel calorifique	Quelle que soit l'activité ou le caractère d'exploitation, si l'ORC estime que le potentiel calorifique est, et restera, suffisamment faible.	Feu 1
Espace à potentiel calorifique courant	- Structures d'accueil pour personnes âgées et personnes handicapées (type J). - Salles d'audition, salles de conférences, salles de réunion, salles réservées aux associations, salles de quartier, salles de projection, salles de spectacles avec espace scénique isolable (type $L_{\S a \text{ de l'art. L30}}$) - Restaurants, cafés, bars, brasseries et débits de boissons (type N) - Hôtels à voyageurs, hôtels meublés et pensions de famille (type O) - Locaux collectifs des logements foyers - Salles de jeux (type P_{jeux}) - Établissements d'enseignement (type R) - Établissements sanitaires (type U) - Établissements de culte (type V) - Administrations, banques, bureaux (type W) - Établissements sportifs couverts (type X) - Musées (type Y)	Feu 2
	- Cabarets, salles polyvalentes, salles de spectacles avec espace scénique intégré comportant des décors de catégorie M0 ou M1 ($L_{\S b \text{ de l'art. L30}}$) - Bals ou dancings (type P_{danse})	Feu 3
	- Salles de spectacles avec espace scénique intégré comportant des décors de catégorie M2 ou en bois classé M3 (type $L_{\S c \text{ de l'art. L30}}$) - Magasins de vente, centres commerciaux et leurs mails (type M) - Bibliothèques, centres de documentation et de consultation d'archives (type S) - Salles d'exposition (type T)	Feu 4
Espace à exploitation particulière	Quai de livraison	Feu 4

A22 BÂTIMENT, INSTALLATION DE DÉSENFUMAGE

La modélisation de la géométrie du bâtiment et de l'installation de désenfumage est fortement impactée par les logiciels retenus et, le cas échéant, par les caractéristiques du ou des maillages. Les paragraphes suivants ne sont applicables que pour un logiciel ayant recours à la simulation des grandes échelles.

A221 Extension du maillage autour du bâtiment

Lorsque l'espace concerné par l'étude présente des ouvertures sur l'extérieur, ces dernières ont un impact sur le désenfumage (p. ex. : exutoire, porte, fenêtre, ouvrant...). Il est alors nécessaire d'étendre localement le domaine maillé autour du

bâtiment afin de reproduire correctement les écoulements au travers de ces ouvertures. L'ampleur de l'extension du domaine de calcul adéquate peut aller jusqu'à plusieurs fois le diamètre hydraulique de l'ouverture, dans la dimension normale à cette dernière. Cette ampleur de l'extension du domaine de calcul dépend à la fois de la configuration étudiée et des conditions météorologiques retenues, notamment le vent. Il appartient à chaque organisme reconnu compétent de procéder à des études de sensibilité sur ce point.

A 2 2 2 Écoulement dans un conduit, à travers une section

Un maillage trop grossier ne permet pas de reproduire correctement les écoulements. La plupart des modèles ont des difficultés à prédire correctement les pertes de charge à travers un rétrécissement de section. Néanmoins, le profil de vitesse est forcément altéré par le faible nombre de mailles. Il peut donc être nécessaire, en fonction des configurations et des applications, d'augmenter considérablement le nombre de mailles. Il est de la compétence de l'ORC de connaître le nombre de mailles nécessaire pour le logiciel qu'il utilise. Ce point peut faire partie du dossier de validation du logiciel réalisé par l'ORC.

A 2 2 3 Reproduction des obstacles

Avec certains logiciels, le maillage peut induire également des contraintes dans la reproduction géométrique des obstacles constitués par les murs, les escaliers, les écrans de cantonnement, etc. Dans ce cas, les obstacles ne peuvent être reproduits exactement que si leurs dimensions sont compatibles avec celles des mailles. Par exemple, avec le logiciel FDS, un écran de cantonnement de 1,25 m de hauteur peut être exactement reproduit avec un maillage de 25 cm dans la dimension z. Si le maillage dans la dimension z est de 50 cm, l'écran numériquement reproduit mesurera alors soit 1 m, soit 1,5 m. Il y a donc un compromis à trouver entre le besoin de finesse et le temps de calcul. Sur ce point, lorsque des obstacles sont plus petits que les mailles ou sont répétitifs, un pré-calcul de pertes de charges peut être efficace pour reproduire les perturbations au passage des fumées (p. ex. : caillebotis).

A 2 2 4 Considérations spécifiques au désenfumage naturel

Concernant la modélisation des ouvrants, des exutoires et des bouches, les études de désenfumage reposent sur des représentations simplifiées. Dans ce contexte, c'est généralement la surface utile qui est retenue pour construire le modèle. La surface libre ou libre calculée peut éventuellement être utilisée dans le cadre de calculs aérauliques plus raffinés ou d'études spécifiques liées aux ouvrants, aux exutoires ou aux bouches. En revanche, la surface géométrique ne doit en aucun cas être utilisée comme une donnée d'entrée du modèle de calcul. En effet, l'évaluation des pertes de charges engendrées par les obstacles à l'écoulement (p. ex. : volets, commandes, ailettes) et par un vent latéral [42], est réalisée en appliquant l'une des deux méthodes (forfaitaire ou expérimentale) de l'annexe B de la norme NF EN 12101-2 B 3 0.

Le § 2 de l'instruction technique 246 rappelle les différences entre les surfaces utile, libre et géométrique.

A 2 2 5 Considérations spécifiques au désenfumage mécanique

Les débits d'extraction ou de soufflage retenus comme hypothèse dans l'étude d'ingénierie du désenfumage correspondent à ceux mesurés ou estimés au niveau de chaque bouche de désenfumage. En effet, les conduits de désenfumage n'étant généralement pas modélisés, les débits au niveau des ventilateurs n'interviennent pas dans l'étude d'ingénierie du désenfumage. Ces derniers sont soit mesurés, soit estimés forfaitairement en tenant compte des débits de fuite et des pertes de charges en application du § 4.4 de l'instruction technique 246.

[42] *Uniquement pour les exutoires, car le protocole d'essai concernant les ouvrants ne tient lui pas compte des effets du vent.*

A3 CALCUL DE LA SOLLICITATION POUR L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU DÉSENFUMAGE

La sollicitation est calculée à l'aide de grandeurs physiques prédéfinies, notées $G_i(t, x, y, z)$ où i désigne la $i^{ème}$ grandeur prédéfinie (p. ex. : la température). Les i grandeurs physiques sont calculées en différents points (x, y, z) répartis sur une zone surfacique ou volumique d'intérêt prédéfinie (p. ex. : un plan horizontal situé à hauteur d'homme, le volume d'une trémie d'escalier…). Dans le cadre de ce guide, la sollicitation, notée $S_i(t)$, désigne la valeur de la $i^{ème}$ grandeur atteinte statistiquement [43] par au moins 95 % des points de la zone d'intérêt à l'instant t. La présente annexe technique détaille et illustre à l'aide d'un exemple, le calcul de cette sollicitation. Cette méthode de calcul est fournie ici à titre d'exemple, et peut être adaptée par les organismes reconnus compétent.

Ce calcul n'est valable que pour les logiciels utilisant la simulation aux grandes échelles. En effet, pour les logiciels utilisant les moyennes de Reynolds, les étapes détaillées ci-après sont directement réalisées par le logiciel.

A3.1 DÉTAIL PAS À PAS DU CALCUL DE LA SOLLICITATION, POUR UN LOGICIEL AYANT RECOURS À LA SIMULATION DES GRANDES ÉCHELLES

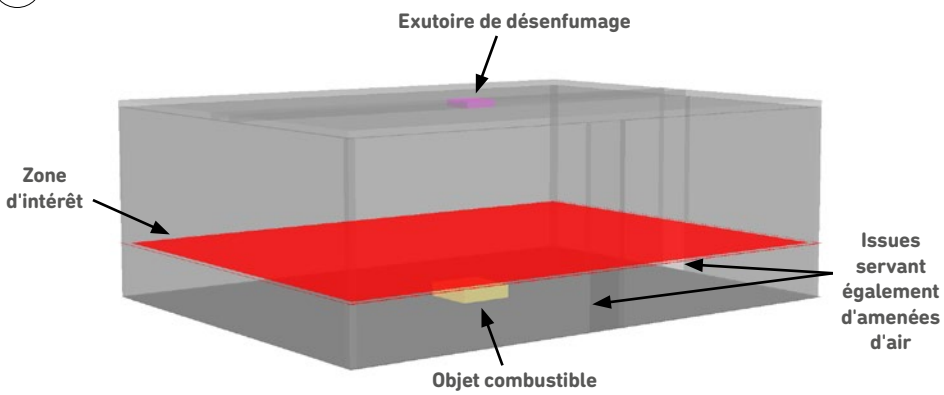
La méthode de calcul est détaillée ci-dessous et illustrée sur un exemple, repris de paragraphe en paragraphe.

A3.1.1 Étape 1 : identification de la zone d'intérêt

La première étape consiste à identifier la zone d'intérêt.

Exemple : *Dans cet exemple, l'étude porte sur une salle polyvalente de 300 m^2 et de 7 m de hauteur sous plafond. La salle est désenfumée naturellement par un exutoire en toiture de 1,5 m^2 de surface utile et par les portes d'issues de secours servant d'amenées d'air. Aucun cheminement spécifique n'apparaît par la présence d'aménagement. Dans ces conditions, la zone d'intérêt retenue est un plan horizontal situé à une hauteur de 2 m au-dessus du sol. Dans cet exemple, cette hauteur est assimilée à la hauteur d'homme. La grandeur retenue dans cet exemple est la température. Elle est notée $G_1(t,x,y,z)$. La figure 9 illustre l'exemple retenu et la zone d'intérêt (en rouge). Sur cet exemple, les dimensions des mailles sont de 25 × 25 × 25 cm, soit un total de 275 400 mailles dans les trois dimensions x, y et z.*

Fig.9 **GÉOMÉTRIE ET ZONE D'INTÉRÊT DE L'EXEMPLE**



[43] *Au sens de la loi normale.*

A 3 1 2 Étape 2 : échantillonnage de la zone

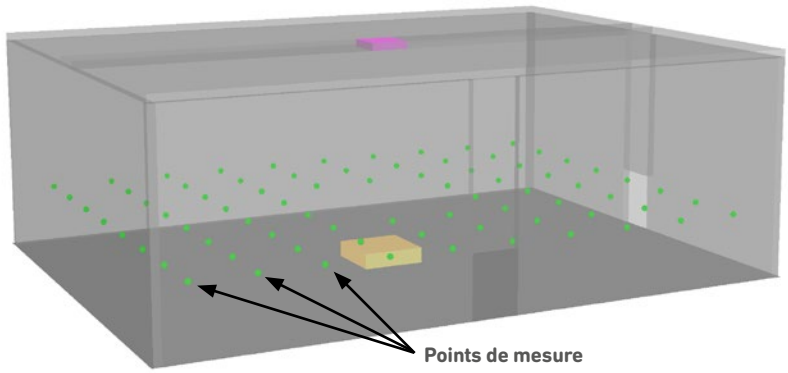
La seconde étape consiste à répartir des points dans la zone. Pour cela, il existe deux possibilités : soit de définir un point par maille, soit d'échantillonner par des points plus espacés (p. ex. : tous les 50 cm ou tous les 1 m). Si le maillage n'est pas régulier, alors l'écart-type final calculé au § A 3 1 6 devra être pondéré en fonction de la surface de chaque maille.

L'attention du lecteur est attirée sur le fait que positionner des points dans la zone proche du feu (incluant flammes et panache) est très pénalisant.

Pour chaque point, plusieurs grandeurs de natures différentes (p. ex. : température, concentration de suie…) peuvent être estimées.

Exemple : *Dans cet exemple, un point est positionné tous les 2 mètres, à l'exception de la zone du feu et de celle à proximité immédiate (< 2 m) de celui-ci. Dans cet exemple, la zone du foyer mesure 4 m². La figure 10 illustre ces points (en vert). Au total, 78 points sont positionnés à intervalle régulier. La grandeur physique calculée à chaque point est la température locale, notée* $G_1(t, x, y, z)$.

Fig.10 **POSITIONNEMENT DES POINTS DE MESURE DANS L'EXEMPLE**

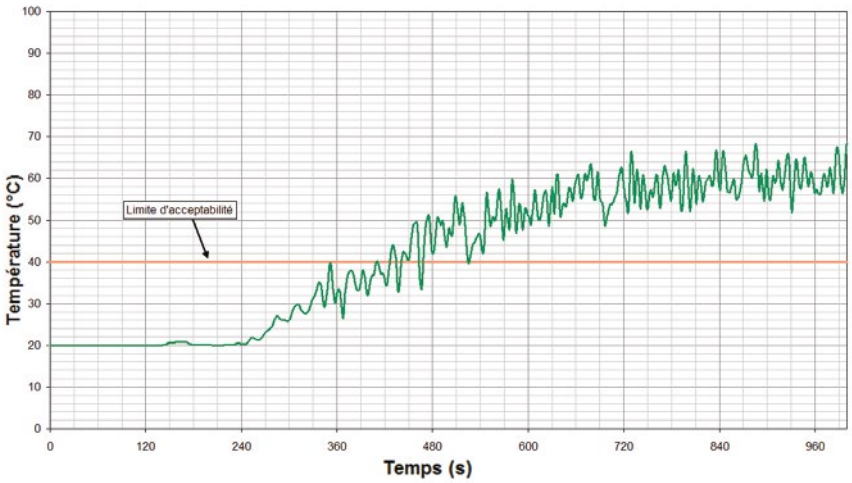


A 3 1 3 Étape 3 : collecte des données brutes

Les données brutes sont extraites directement du logiciel de calcul, sous la forme de données de sortie. Elles doivent être collectées et organisées de manière à pouvoir permettre leur traitement. Selon le logiciel utilisé et l'outil de traitement des données retenu, cette étape peut être faite manuellement ou automatiquement.

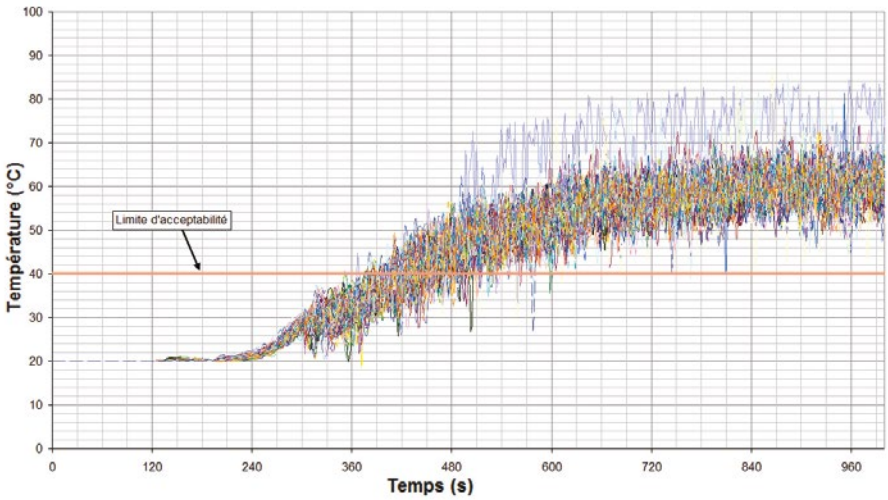
Exemple : *Dans l'exemple, la zone d'intérêt a été échantillonnée avec 78 points. Par conséquent, l'évolution temporelle de la température a été collectée pour chacun de ces 78 points. La figure 11 illustre cette évolution pour l'un des points. On constate que la température locale présente des variations erratiques. Ces phénomènes dépendent du type d'outil utilisé. Une partie de ces oscillations représente la dynamique des tourbillons en simulation des grandes échelles, elles sont beaucoup moins marquées en moyennes de Reynolds. Ces phénomènes peuvent rendre l'analyse délicate. En effet, si les oscillations se produisent autour du seuil d'acceptabilité, il n'est pas possible de définir correctement à quel moment le critère est atteint.*

Fig.11 **ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE EN UN POINT QUELCONQUE**



Par ailleurs, l'inconvénient de ne tracer la température qu'en un point est qu'il n'est pas possible, sur la base de ce seul graphe, de savoir quelles sont les températures atteintes dans les autres points de l'espace x, y, z. Il est toutefois possible de regrouper toutes les données sur un seul graphe. Le type de graphe obtenu ressemble alors à la figure 12, sur laquelle la température locale de chaque point $G_i(t,x,y,z)$ est tracée en fonction du temps.

Fig.12 **ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE POUR TOUS LES POINTS**



Les étapes suivantes ont pour but d'une part, de réduire les phénomènes erratiques (étape 4), et d'autre part, de fournir les résultats de tous les points de mesure sur un seul graphe (étapes 5, 6 et 7).

A 3 1 4 Étape 4 : calcul d'une moyenne temporelle à fenêtre gaussienne glissante centrée pour la grandeur obtenue en chaque point

Cette étape a pour but de diminuer les variations erratiques des résultats, représentant entre autre la dynamique des tourbillons. Pour cela, une fonction est utilisée. Cette fonction est définie comme suit. Pour chaque grandeur obtenue en chaque point $G_i(t,x,y,z)$, une moyenne temporelle à fenêtre gaussienne[44] glissante centrée sur une durée de 31 secondes est effectuée, en appliquant l'équation suivante.

$$\overline{G_i}(t,x,y,z) = \sum_{j=-15}^{j+15} a_j . G_i(t+j,x,y,z)$$

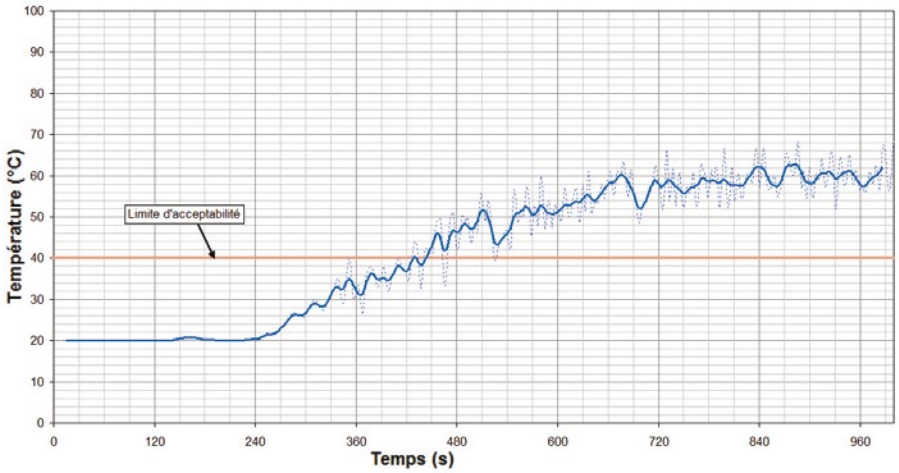
$$avec \forall\, j \epsilon \,[\![-15,15]\!]\,,\; a_j = \frac{1}{\sqrt{20}.\sqrt{2\pi}} . e^{-\frac{1}{2}.(\frac{j}{\sqrt{20}})^2}$$

Dans cette équation, t et j sont des temps exprimés en secondes. S'agissant d'une moyenne centrée, une attention particulière doit être portée sur le début et la fin des séries de données. En effet, la moyenne glissante centrée sur une période temporelle de 31 secondes doit être adaptée pour les 15 premières et les 15 dernières secondes. Des solutions d'adaptation sont proposées à titre illustratif dans l'exemple ci-dessous. L'organisme reconnu compétent retient la technique qui lui paraît la plus adaptée au cas étudié.

Les a_j tels qu'ils sont définis ci-avant correspondent à une loi normale centrée d'écart-type égal à $\sqrt{20}$. Cette valeur de l'écart-type a été choisie de manière à ce que plus de 99 % du poids de la gaussienne soit inclus dans l'intervalle $[\![-15,15]\!]$.

Exemple : *La figure 13 représente l'évolution temporelle de la température au niveau d'un seul capteur, avant (en pointillés) et après (en trait plein) le traitement des données de l'étape 4. Il est possible de visualiser sur ce graphique, d'une part que les pics sont lissés, et d'autre part que les 15 premières et dernières secondes ne sont pas définies. Afin d'adapter les résultats sur ces premières et dernières secondes, plusieurs solutions sont envisageables. La plus simple est de commencer et de terminer le calcul 15 secondes avant et après. Une autre solution consiste à utiliser une stratégie de fenêtre adaptative.*

Fig.13 **ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE AVANT (POINTILLÉS) ET APRÈS (TRAIT PLEIN) LE TRAITEMENT DES RÉSULTATS PAR LA MOYENNE GLISSANTE CENTRÉE, POUR UN POINT QUELCONQUE**



A 3 1 5 Étape 5 : calcul de la moyenne spatiale des grandeurs obtenues à l'étape 4 pour tous les points de mesure

Les étapes 5, 6 et 7 ont pour but de diminuer le nombre de résultats à présenter, tout en conservant un maximum d'information. En effet, au début de l'étape 5, il y a, pour une grandeur physique i donnée, autant de résultats que de points de mesure.

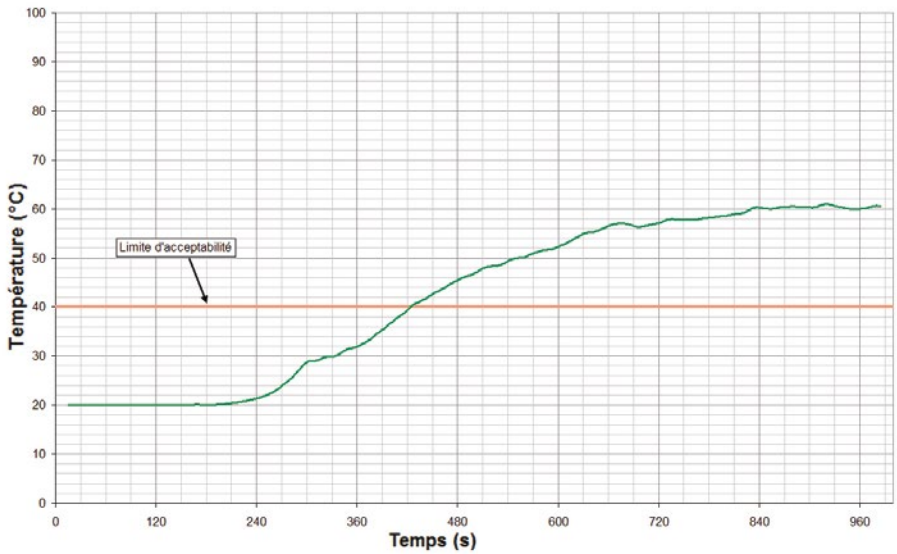
L'étape 5 revient à réaliser, pour chaque grandeur i et à chaque instant t, la moyenne des $\overline{G_i}(t,x,y,z)$ pour tous les N points de mesure. On obtient donc, pour chaque grandeur i et à chaque instant t, une seule valeur pour tous les points de mesure : la valeur moyenne spatiale $\langle G_i \rangle (t)$.

En notant,

$$\langle G_i \rangle (t) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N} \overline{G_{i,k}}(t,x,y,z)$$

Exemple : *La figure 14 représente l'évolution temporelle de la température pour tous les 78 points. Comparé à la figure 12 ce type de graphique est beaucoup plus lisible. Toutefois, il y manque encore des informations, et notamment une idée de la variabilité spatiale de la température. Autrement dit, la valeur moyenne atteinte dans la zone d'intérêt est connue, mais il est impossible de savoir si les résultats sont très dispersés autour de cette moyenne. Dans cet exemple, cela revient à identifier à quel point les températures locales sont plus faibles ou plus élevées que la valeur moyenne. Cette information est apportée par le calcul de l'écart-type. C'est l'objet du paragraphe suivant.*

Fig.14 **ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE, POUR TOUS LES POINTS DE MESURE**



[44] *L'utilisation d'un filtre gaussien améliore la régularité du résultat.*

A 3 1 6 Étape 6 : calcul de l'écart-type des grandeurs obtenues à l'étape 4 pour tous les points de mesure

Le but de cette étape est d'apporter des informations relatives à la dispersion de la grandeur $\overline{G_i}(t,x,y,z)$ autour de la moyenne $\langle G_i \rangle (t)$. Pour cela, il convient de calculer, à chaque instant t et pour chaque grandeur, l'écart-type des $\overline{G_i(t,x,y,z)}$ pour tous les N points de mesure autour de la moyenne $\langle G_i \rangle (t)$. Plus l'écart-type est faible, plus les valeurs sont regroupées autour de la moyenne. La formule à utiliser est la suivante :

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^{N} [\overline{G_{i,k}}(t) - \langle G_i \rangle (t)]^2}$$

Exemple : *Le tableau 9 présente un extrait des températures moyennées temporellement pour 5 points de mesure quelconques pendant 20 secondes consécutives. Les colonnes grises contiennent les températures moyennées temporellement (obtenues à l'étape 4), la colonne verte contient les températures moyennées spatialement sur les 5 points (obtenues à l'étape 5) et la colonne orange contient les écarts-types de la température (obtenue à l'étape 6). On obtient bien un écart-type par pas de temps (ici par seconde). Dans cet exemple, les écarts-types atteints sont faibles, signe que les températures diffèrent peu d'un point à un autre.*

Tab.9 **ILLUSTRATION DU CALCUL DES MOYENNES TEMPORELLES, SPATIALE ET DE L'ÉCART-TYPE, POUR 5 POINTS QUELCONQUES**

Tps (s)	T (°C)	Tbar (°C)	T (°C)	Tbar (°C)	T (°C)	Tbar (°C)	T (°C)	Tbar (°C)	T (°C)	Tbar (°C)	<T> (°C)	σ (°C)
965	61	59	60	60	56	57	60	59	60	59	59	0
966	60	59	62	60	56	58	60	59	59	58	59	0
967	58	59	62	60	56	58	60	59	59	58	59	1
968	57	58	61	59	57	58	59	59	58	57	59	1
969	57	58	60	59	58	58	59	60	56	57	59	1
970	56	58	60	59	60	59	60	60	56	57	59	1
971	57	58	59	59	61	59	62	60	53	56	59	1
972	58	57	57	59	61	59	60	60	53	56	59	1
973	58	57	56	58	60	59	59	60	54	56	59	1
974	57	57	55	58	59	59	59	60	57	56	58	1
975	56	57	57	58	58	60	62	60	58	56	58	1
976	55	57	59	58	58	60	62	60	56	56	58	1
977	56	57	60	58	60	60	58	60	55	56	59	1
978	57	57	60	58	62	60	60	59	55	56	59	1
979	59	57	57	58	63	60	61	59	55	57	59	1
980	59	57	56	59	62	60	61	59	56	57	58	1
981	59	57	58	59	60	60	59	59	56	57	58	1
982	58	57	60	59	57	61	57	59	62	57	58	2
983	56	57	62	58	56	61	56	59	64	57	59	2
984	55	58	62	58	58	61	57	59	60	57	59	2

La moyenne spatiale et l'écart-type sont les deux données nécessaires au calcul de la sollicitation. À l'aide de ces deux données, il est possible de visualiser sur un seul graphique les résultats d'une zone d'intérêt, tout en conservant la majeure partie des informations utiles à l'analyse.

A 3 1 7 Étape 7 : calcul de la sollicitation

Cette étape revient à tracer les trois courbes suivantes sur un même graphique pour chacune des i grandeurs :

- la moyenne spatiale $\langle G_i \rangle (t)$ en fonction du temps (courbe a) ;
- $\langle G_i \rangle (t) + 2.\sigma$ en fonction du temps (courbe b) ;
- $\langle G_i \rangle (t) - 2.\sigma$ en fonction du temps (courbe c).

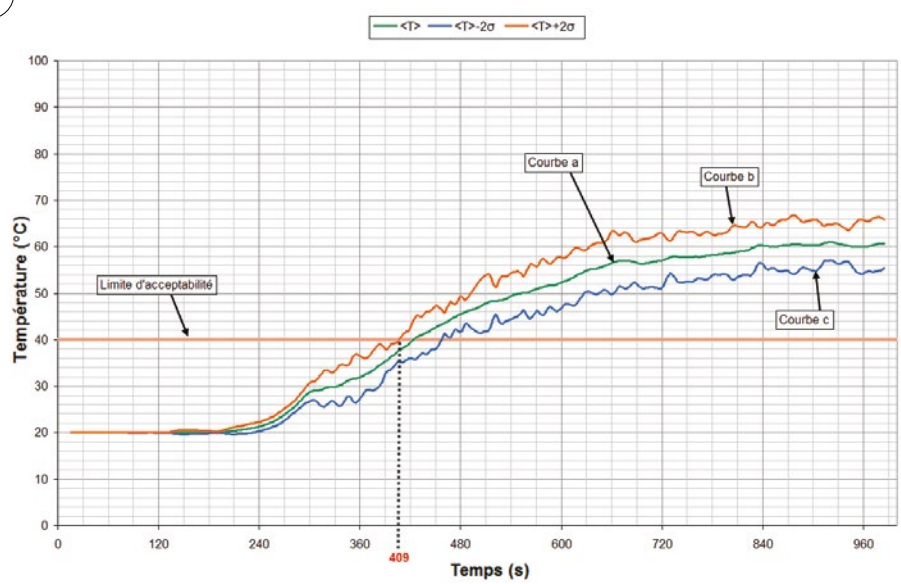
In fine, on obtient donc autant de graphiques que de grandeurs, soit i graphiques. L'intervalle compris entre la courbe b et la courbe c contient statistiquement 95 % des valeurs atteintes par la grandeur $\overline{G_i}(t, x, y, z)$. Selon le critère d'acceptabilité retenu (cf. § 3 3 2), la sollicitation à prendre en compte peut être soit la courbe b, soit la courbe c.

En effet, deux cas sont à distinguer :

- soit le critère retenu prend la forme d'une valeur maximale à ne pas atteindre (ou dépasser), la sollicitation est alors la courbe b. C'est l'exemple de la température ne devant pas excéder 40 °C ;
- soit le critère retenu prend la forme d'une valeur minimale à ne pas atteindre (ou dépasser), la sollicitation est alors la courbe c. Bien que ce guide ne recommande pas l'emploi de cette grandeur, la visibilité peut être citée comme exemple ici, car il s'agit d'une valeur minimale à ne pas atteindre (p. ex. : > 10 m).

Exemple : *La figure 15 présente les trois courbes en question pour notre exemple de température : la courbe a :* $\langle G_1 \rangle (t)$ *est en vert, la courbe b :* $\langle G_1 \rangle (t) + 2.\sigma$ *est en orange et la courbe c :* $\langle G_1 \rangle (t) - 2.\sigma$ *est en bleu. La limite rouge indique ici le seuil à ne pas dépasser, à savoir la valeur limite de 40 °C. La sollicitation est ici représentée par le courbe b (en orange). Sur cet exemple, le temps d'atteinte du critère de température est de 409 secondes, soit environ 7 minutes. Cette valeur est repérée sur l'axe des abscisses de la figure ci-dessous par un chiffre rouge.*

Fig.15 **ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA SOLLICITATION (ICI COURBE B) LIÉE À LA TEMPÉRATURE**



A 3 2 CONSIDÉRATIONS ADDITIONNELLES QUANT À CETTE MÉTHODE DE CALCUL

A 3 2 1 Clefs de lecture

Le tableau ci-dessous illustre quelques configurations possibles et leur signification.

Tab.10 **CLEFS DE LECTURE DE LA MÉTHODE PROPOSÉE**

PARTICULARITÉ	SIGNIFICATION	ILLUSTRATION
Les courbes b et c sont très proches l'une de l'autre	L'écoulement est laminaire ou les résultats sont quasiment uniformes sur toute la zone d'intérêt	cf. figure 16
Les courbes b et c sont très éloignées l'une de l'autre	Les résultats sont très dispersés ou l'écoulement est fortement turbulent dans la zone d'intérêt. L'écoulement est potentiellement destratifié. Ces cas nécessitent une attention particulière de l'ORC, pour localiser d'éventuelles zones à risque	cf. figure 17
Les intersections entre la limite d'acceptabilité et les courbes b et c sont proches	La zone d'intérêt est rapidement impactée	cf. figure 18
Les intersections entre la limite d'acceptabilité et les courbes b et c sont éloignées	La zone d'intérêt est lentement impactée	cf. figure 19

Fig.16 **EXEMPLE D'UNE ZONE D'INTÉRÊT PRÉSENTANT DES TEMPÉRATURES RELATIVEMENT UNIFORMES**

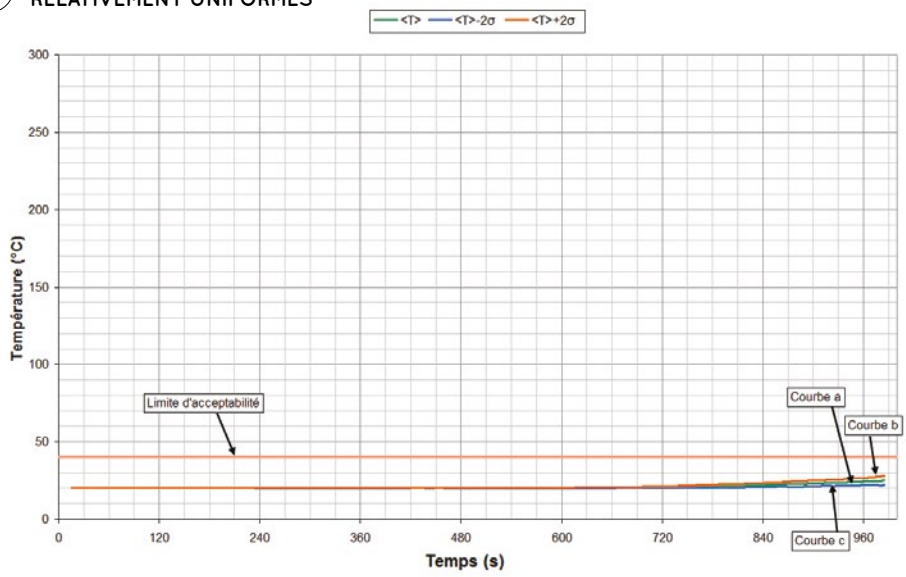


Fig.17 **EXEMPLE D'UNE ZONE D'INTÉRÊT PRÉSENTANT DE FORTS GRADIENTS DE TEMPÉRATURE (SUR CE CAS L'ÉCOULEMENT EST DESTRATIFIÉ)**

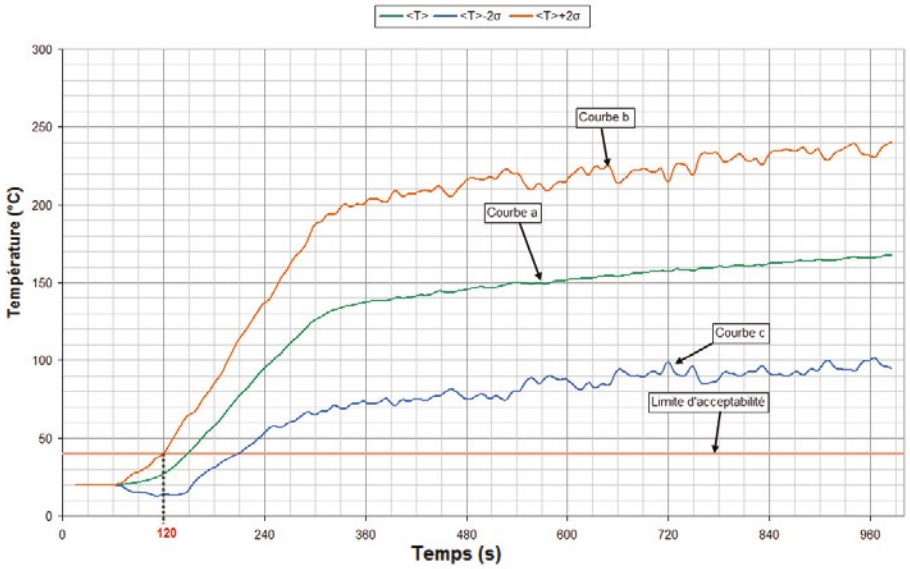
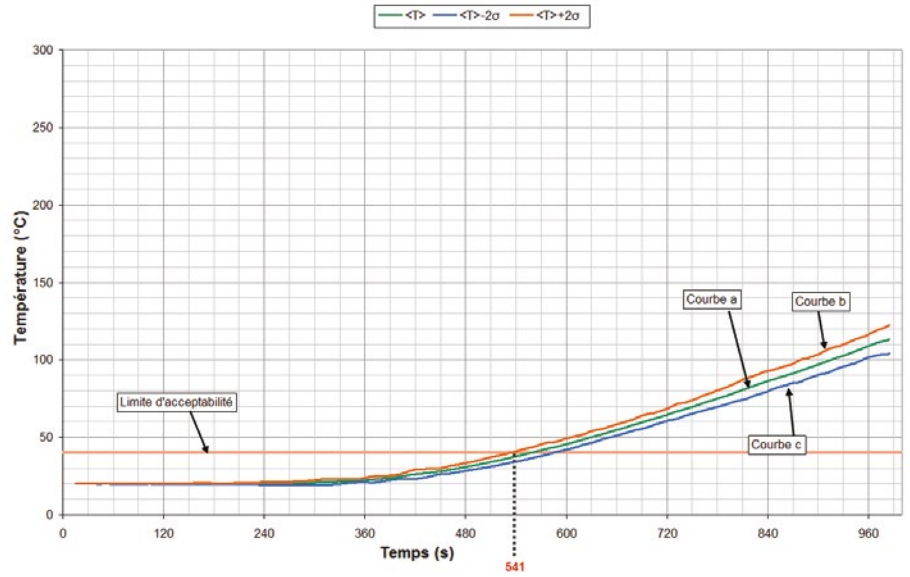
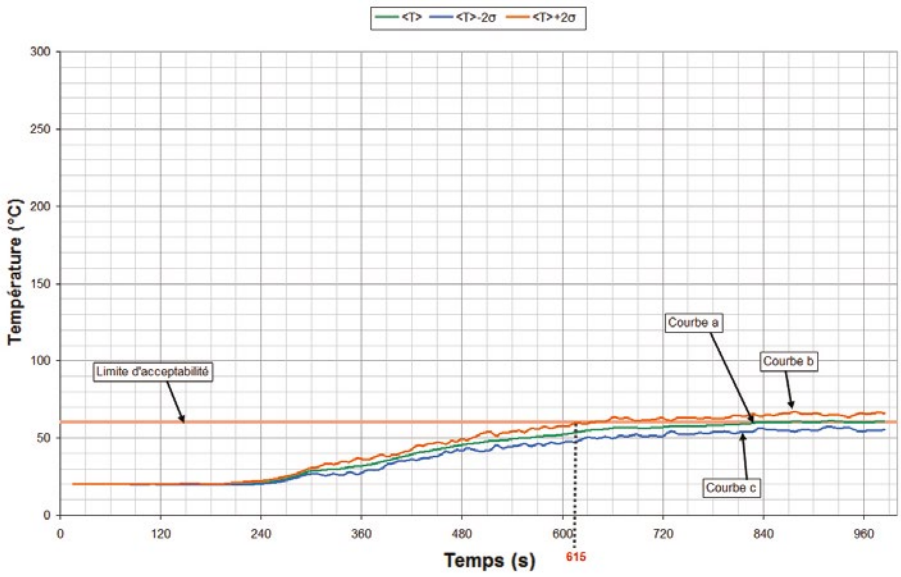


Fig.18 **EXEMPLE D'UNE ZONE D'INTÉRÊT IMPACTÉE RAPIDEMENT (ICI MOINS DE 1 MINUTE) ENVIRON 9 MINUTES (541 SEC) APRÈS LE DÉPART DE FEU**



Sur la figure suivante, la limite d'acceptabilité a été fixée à 60 °C, à titre d'illustration.

Fig.19 **EXEMPLE D'UNE ZONE D'INTÉRÊT IMPACTÉE TRÈS PROGRESSIVEMENT (PLUS DE 6 MINUTES) ENVIRON 10 MINUTES (615 SEC) APRÈS LE DÉPART DE FEU**



A 3 2 2 Pourquoi cette méthode de calcul ?

Cette méthode de calcul de la sollicitation présente de nombreux avantages, dont les principaux sont détaillés ci-après.

Premièrement, elle permet la visualisation, de manière lisible, de la majeure partie des résultats sur un nombre limité de graphiques. En effet, un graphique par grandeur et par zone d'intérêt suffit.

Deuxièmement, elle permet une analyse quantitative des résultats, ce qui n'est pas toujours possible, par exemple, par la visualisation des taux de dépassements de valeurs seuil. En effet, avec cette méthode, il est possible non seulement de définir l'instant auquel la valeur seuil est dépassée, mais également l'ampleur de ce dépassement. Cette analyse quantitative est particulièrement importante pour procéder à une évaluation globale du niveau de sécurité. Elle revêt d'ailleurs un caractère incontournable dans le cadre d'une démarche relative pour laquelle la comparaison des instants de dépassement de seuils est insuffisante.

Troisièmement, elle permet de s'affranchir des phénomènes très localisés et très transitoires, tout en évaluant correctement les caractéristiques essentielles de la zone d'intérêt. Une analyse phénoménologique doit toutefois être menée en parallèle par l'organisme reconnu compétent pour s'assurer que des phénomènes dangereux non négligeables n'apparaissent pas à des endroits stratégiques.

Quatrièmement, la dispersion des résultats est mise en lumière par l'utilisation des écarts-types. Cette information permet d'identifier la présence de zones dangereuses. Ces zones doivent alors faire l'objet d'une attention particulière par l'organisme reconnu compétent (p. ex. : à l'aide de coupes). Le cas échéant, des solutions pour sécuriser ces zones peuvent être utiles.

A4 TYPES D'ESSAIS DE DÉSENFUMAGE *IN SITU* ET ÉLÉMENTS PERMETTANT DE CHOISIR L'ESSAI APPROPRIÉ

Dans le cadre de l'application de l'ingénierie de désenfumage, il est mentionné au § 8 de l'instruction technique 246 que « Les autorités compétentes peuvent éventuellement exiger la réalisation d'essais *in situ* pour valider les caractéristiques des systèmes de désenfumage retenus ». Il n'existe pas aujourd'hui de protocole défini pour ces essais. Dans les faits, il est possible d'être confronté à des situations où la réalisation d'essais mal définis conduit à la validation d'un système de désenfumage non performant, ou invalide un système de désenfumage efficient. De plus, la définition d'un essai doit prendre en compte toutes les contraintes inhérentes à l'établissement.

A41 INTÉRÊT DES MESURES ET ESSAIS *IN SITU*

Les mesures aérauliques et essais d'incendie *in situ* ont pour but d'évaluer expérimentalement en conditions réelles l'effet des systèmes de désenfumage sur la propagation de la fumée dans les ouvrages. Lorsqu'ils viennent en complément d'une étude d'ingénierie du désenfumage, les essais et mesures *in situ* permettent de conforter les conclusions de l'étude en reproduisant certaines des tendances suggérées par le calcul. Les essais viennent alors compléter la démonstration du niveau de sécurité auprès des non-experts des outils de l'ingénierie incendie.

L'expérimentation *in situ* permet également de vérifier sur le terrain les hypothèses et la mise en œuvre des préconisations issues de l'étude d'ingénierie. Pour cette raison, la présence de l'organisme reconnu compétent qui a réalisé les études d'ingénierie de désenfumage est recommandée lors de la réalisation des essais, compte tenu de sa connaissance du dossier.

A42 TYPES D'ESSAIS DE DÉSENFUMAGE

Les essais de désenfumage sont divisés en essais aérauliques (cf. § A421) et essais de fumées avec les trois qualificatifs suivants : froides (cf. § A4221), tièdes (cf. § A4222), chaudes (cf. § A4223). La qualification de l'essai de fumées est faite au regard de la température atteinte loin de la source d'émission de fumée. Cette dernière dépend de la nature de source de fumée elle-même, de la source thermique éventuellement associée ainsi que de la volumétrie des espaces dans laquelle les essais sont réalisés.

Notons que plusieurs types d'essais peuvent être réalisés pour un même système de désenfumage afin d'en éprouver l'efficacité.

A421 Essais aérauliques

Les mesures aérauliques réalisées « à froid » en l'absence de production de chaleur ou de fumée, visent à s'assurer sur le terrain du bon fonctionnement des installations de désenfumage mécanique, en évaluant les débits effectivement obtenus et en vérifiant globalement le « schéma aéraulique » retenu pour la gestion de l'enfumage dans l'ouvrage. Ceci représente souvent une évaluation préliminaire moins onéreuse que la réalisation d'essais d'enfumage.

La maîtrise des débits de soufflage et d'extraction est un élément fondamental pour l'efficacité de toute solution de désenfumage. Les mesures *in situ* visent à s'assurer que les exigences réglementaires sont effectivement respectées (valeurs obtenues, équilibrage des bouches, maîtrise des fuites, etc.).

A 4 2 2 Essais de fumées

Quel que soit le type d'essais envisagé, la quantité de fumées doit être adaptée à la volumétrie des lieux mais aussi au système de désenfumage en place (naturel, mécanique) et à son principe de fonctionnement (balayage, maintien de la stratification, hiérarchie des pressions, etc.).

A 4 2 2 1 Fumées froides

Sont qualifiées de « fumées froides » des fumées qui, dès qu'elles s'éloignent de la source les générant, ont une température faible, c'est-à-dire une élévation de l'ordre du degré Celsius maximum à quelques mètres dans le panache. Des exemples de générateurs de fumées froides sont cités ci-dessous :

- stylos fumigènes ;
- pots fumigènes ;
- certains foyers de référence de la règle APSAD R7 [45] concernant la détection automatique d'incendie (p. ex. : hêtre, carton) ;
- générateurs de fumées par dégagement d'un aérosol d'huile ou de paraffine ;
- fumigènes pyrotechniques ;
- mélange Chardot en très petite quantité. Ce mélange est composé de nitrate de potassium, de fécule de pomme de terre et de lactose.

A 4 2 2 2 Fumées tièdes

On qualifie de « fumées tièdes » des fumées générées qui, même si elles sont chaudes à la source, ne conduisent pas à une élévation significative sous plafond, c'est-à-dire une élévation de l'ordre de quelques degrés. Elle est inférieure à 10 degrés.

Quelques générateurs de fumées tièdes sont cités ci-dessous à titre d'exemple :

- mélange Chardot en petite quantité (à définir selon le volume de la zone à enfumer) ;
- fumigènes couplés à une source thermique modérée.

A 4 2 2 3 Fumées chaudes

Sont qualifiées de fumées chaudes, des fumées générées qui sont chaudes à la source et qui conduisent à une élévation significative sous plafond, c'est-à-dire une élévation d'une dizaine de degrés Celsius.

Peuvent notamment être cités les générateurs de fumées chaudes suivants :

- mélange Chardot en grande quantité (à définir selon le volume de la zone) ;
- fumigènes couplés à une source thermique importante (fonction du volume de la zone).

A 4 2 3 Source thermique

Pour les essais de fumées tièdes ou chaudes, la génération de la source thermique peut se faire par différents biais. Peuvent notamment être citées les solutions suivantes :

- bacs d'hydrocarbure ;
- brûleurs à gaz (pré-mélangés ou non) ;
- bûchers de bois.

La quantité de produits mise en jeu devra être définie en fonction de la volumétrie des lieux et du système de désenfumage.

A 4 3 CHOIX DU TYPE D'ESSAI À RÉALISER

Le choix du type d'essai à réaliser repose sur un consensus entre deux facteurs : d'une part l'approche de gestion de la fumée dans le bâtiment (cf. ci-après) ; d'autre part les contraintes liées au site.

[45] *Les foyers servent à tester la détection automatique d'incendie. Tous ne sont pas adaptés pour visualiser l'effet du désenfumage, surtout lorsque la quantité de fumée visible produite est faible (p. ex. : alcool éthylique).*

A.4.3.1 Lien entre l'approche de la gestion de fumée et les essais

Le premier facteur à considérer est le besoin fondamental d'adapter l'essai au système de désenfumage en place et à son principe de fonctionnement. Ce facteur est appelé « approche de gestion de la fumée » dans la suite du document. Les stratégies suivantes peuvent notamment être citées :

- la stratification des fumées, où les écoulements sont peu perturbés, la hauteur de couche de fumée maîtrisée, etc. ;
- le confinement, où l'objectif recherché est le maintien de la fumée dans une partie du volume ;
- le balayage, où l'on souhaite évaluer la capacité à déplacer préférentiellement les fumées dans certaines zones de l'espace à désenfumer ;
- la hiérarchie de pression, où l'on souhaite évaluer la capacité à préserver des espaces vis-à-vis d'espaces adjacents enfumés ;
- l'extraction ou l'évacuation, où l'on souhaite évaluer la capacité à évacuer ou extraire la fumée et les gaz chauds du volume sinistré en appréciant la vitesse d'enfumage des espaces.

Le lien entre l'approche de la gestion de fumée et les essais de fumées est détaillé dans le tableau 11.

A.4.3.2 Lien entre les contraintes liées au site et les essais de fumées

Le second facteur pouvant orienter le choix de l'essai est bien entendu l'ensemble des contraintes liées à l'établissement. Par exemple, si le bâtiment ne doit subir que peu de salissures, le type d'essai proposé devra être choisi en conséquence. Autre exemple, si l'établissement est en exploitation, des essais rapides à mettre en œuvre peuvent être préférés. De même, la toxicité des fumées produites doit être prise en compte. Dans tous les cas, la question de la responsabilité des différents acteurs en cas de dégradations du bâtiment ou de son contenu doit être abordée avant la réalisation des essais. Par défaut, c'est l'organisme qui réalise l'essai qui est responsable des dégâts qu'il peut occasionner.

Les paragraphes suivants contiennent quelques informations pouvant aider au choix de l'essai à réaliser.

A.4.3.2.1 Fumées froides

Les essais de fumées froides peuvent être mis en place rapidement, sont peu salissants et, à l'exception du mélange Chardot, peu toxiques. Ils s'apparentent à des essais aérauliques, avec en sus la présence de traceurs visuels. Ainsi, les phénomènes qu'ils peuvent permettre de visualiser sont les mêmes que ceux mis en évidence par un anémomètre ou un capteur de pression différentielle (balayage, hiérarchie des pressions). Pour tous les autres phénomènes, ils ne sont pas adaptés et peuvent conduire à des conclusions erronées. Pour cette raison, ils ne sont que peu recommandés pour l'évaluation d'une installation de désenfumage.

A.4.3.2.1 Fumées chauffées par une source thermique

Les essais de fumées tièdes ou chaudes alliant une source thermique propre et une production de fumées froides propre permettent de limiter les salissures et la toxicité. En revanche, en fonction du protocole proposé, la mise en place et le repli peuvent être plus ou moins longs.

A.4.3.2.2 Cas particulier du mélange Chardot

Les particularités du mélange Chardot sont les suivantes :

- l'essai est rapide à mettre en place et à ranger ;
- le mélange est connu et utilisé depuis de nombreuses années ;
- le mélange est apprécié des autorités ;
- le mélange est salissant dès que les quantités mises en œuvre sont notables (fumées tièdes ou chaudes) ;
- la réaction n'est pas maîtrisée et est difficile à arrêter lorsqu'elle a été initiée ;
- la reproductibilité de l'essai n'est pas évidente ;
- son utilisation génère des risques, notamment en termes d'hygiène et de sécurité pour les travailleurs. Il convient de s'assurer que celui qui réalise les essais maîtrise ces risques.

Tab.11

LIEN ENTRE L'APPROCHE DE LA GESTION DE FUMÉE ET LES ESSAIS

APPROCHE DE GESTION DE LA FUMÉE	OBJECTIFS DE PERFORMANCE DU SYSTÈME DE DÉSENFUMAGE	TYPE D'ESSAI DE FUMÉES			MÉTROLOGIE PRINCIPALE ASSOCIÉE AUX ESSAIS
		FUMÉE FROIDE	FUMÉE TIÈDE	FUMÉE CHAUDE	
Stratification	Maintien d'une veine claire au niveau du sol (hauteur libre de fumée) Écoulements peu perturbés	Inadapté, car tirage thermique inexistant	Moyennement adapté	Adapté Température nécessaire d'autant plus élevée que la distance entre la source de fumée et l'extraction est importante (p. ex. : hauteurs sous plafond importantes, grands cantons, etc.)	Vidéo Mesures de profils verticaux de température Mesures de vitesses aux amenées d'air
Confinement	Maintien de la fumée dans une partie du volume, *via* des écrans ou de la ventilation	Inadapté sauf pour étudier les passages de fumée (fuites)	Adapté Nécessaire pour tester le cantonnement en plafond	Adapté Nécessaire pour tester le cantonnement en plafond	Vidéo Mesures locales de la vitesse
Balayage	Déplacement référentiel des fumées dans certaines zones de l'espace à désenfumer	Adapté pour étudier l'effet du balayage général (hors stratification).	Adapté Nécessaire pour étudier l'effet du balayage sur la stratification de la fumée (p. ex.: circulations)	Adapté Nécessaire pour étudier l'effet du balayage sur la stratification de la fumée (p. ex.: circulations)	Vidéo Mesures de vitesses de passage aux portes Mesures de pression différentielle
Hiérarchie de pression	Capacité à repousser la fumée ou empêcher l'envahissement d'une zone par la fumée	Adapté Utilisation possible pour visualiser les écoulements à l'interface entre la zone à protéger et la zone sinistrée	Moyennement adapté	Peu adapté compte tenu des espaces mis en jeu (escaliers, sas, circulations…)	Vidéo Mesures de vitesses de passage aux portes Mesure de différences de pression
Évacuation naturelle	Capacité à évacuer la fumée et les gaz chauds du volume sinistré	Inadapté, car tirage thermique inexistant	Moyennement adapté Production en grande quantité souvent requise Température élevée nécessaire en désenfumage naturel (tirage thermique)	Adapté Production en grande quantité souvent requise Température élevée nécessaire en désenfumage naturel (tirage thermique)	Vidéo Mesures des débits entrants et sortants des volumes étudiés
Extraction mécanique	Capacité à extraire la fumée et les gaz chauds du volume sinistré	Peu adapté, sauf dans les locaux de très faible hauteur (< 2 à 3 m)	Adapté Production en grande quantité souvent requise	Adapté Production en grande quantité souvent requise	Vidéo Mesures des débits entrants et sortants des volumes étudiés

Fig. 1	La vie administrative d'un dossier d'ingénierie	16
Fig. 2	Exemples de feu de dimensionnement	24
Fig. 3	Représentation séquentielle de la mise en sécurité des personnes	28
Fig. 4	Technique d'analyse simplifiée des résultats	37
Fig. 5	Illustration de la méthode d'analyse simplifiée des résultats	38
Fig. 6	Illustration de la méthode d'analyse simplifiée des résultats	39
Fig. 7	Illustration de la méthode d'analyse simplifiée des résultats	39
Fig. 8	Évolution temporelle des débits calorifiques pour les 4 feux imposés possibles, avec un exemple de cinétique de croissance de forme parabolique	50
Fig. 9	Géométrie et zone d'intérêt de l'exemple	54
Fig. 10	Positionnement des points de mesure dans l'exemple	55
Fig. 11	Évolution temporelle de la température en un point quelconque	56
Fig. 12	Évolution temporelle de la température pour tous les points	56
Fig. 13	Évolution temporelle de la température avant (pointillés) et après (trait plein) le traitement des résultats par la moyenne glissante centrée, pour un point quelconque	57
Fig. 14	Évolution temporelle de la température moyenne, pour tous les points de mesure	58
Fig. 15	Évolution temporelle de la sollicitation (ici courbe b) liée à la température	60
Fig. 16	Exemple d'une zone d'intérêt présentant des températures relativement uniformes	61
Fig. 17	Exemple d'une zone d'intérêt présentant de forts gradients de température (sur ce cas l'écoulement est destratifié)	62
Fig. 18	Exemple d'une zone d'intérêt impactée rapidement (ici moins de 1 minute) environ 9 minutes (541 sec) après le départ de feu	62
Fig. 19	Exemple d'une zone d'intérêt impactée très progressivement (plus de 6 minutes) environ 10 minutes (615 sec) après le départ de feu	63

Tab. 1	Quelques paramètres à fixer *a priori* pour représenter un feu	25
Tab. 2	Méthode d'évaluation de performance à utiliser en fonction des objectifs de sécurité réglementaires	33
Tab. 3	Grandeurs physiques usuelles	34
Tab. 4	Critères d'acceptabilité imposés pour la méthode absolue	35
Tab. 5	Principaux classements des modèles d'évacuation des personnes	46
Tab. 6	Caractéristiques des 4 feux imposés possibles	50
Tab. 7	Tableau de correspondance entre l'activité ou le caractère d'exploitation de l'espace étudié et le feu à considérer : cas des gares	51
Tab. 8	Tableau de correspondance entre l'activité ou le caractère d'exploitation de l'espace étudié et le feu à considérer	52
Tab. 9	Illustration du calcul des moyennes temporelles, spatiale et de l'écart-type, pour 5 points quelconques	59
Tab. 10	Clefs de lecture de la méthode proposée	61
Tab. 11	Lien entre l'approche de la gestion de fumée et les essais	67

aéraulique
Science qui étudie l'écoulement des gaz dans les conduits.

ASET
Acronyme de « available safe evacuation time ». Voir temps disponible pour l'évacuation en sécurité (TDES).

bouche (de désenfumage)
Orifice d'un conduit d'amenée d'air ou d'évacuation des fumées normalement obturé par un volet. B1

chaleur
Mode de transfert de l'énergie d'un corps à un autre, qui ne correspond pas à un travail. L'énergie ainsi transférée correspond à une énergie microscopique désordonnée, due au mouvement brownien.

chaleur de combustion
Voir enthalpie de combustion.

cinétique de combustion
Étude de la (les) vitesse(s) de(s) la réaction(s) chimique(s) de combustion. Désigne, par extension, la variation temporelle du débit calorifique.

coefficient d'extinction de la lumière
« Logarithme népérien du rapport de l'intensité lumineuse incidente à l'intensité lumineuse émise, par unité de longueur de la trajectoire optique. » B2 traduit l'atténuation de la lumière, due notamment à la présence de suies.

critère d'acceptabilité
« Critère qui forme la base d'évaluation de l'acceptabilité de la sécurité de la conception d'un environnement construit. » B2

définition alternative
Condition imposée à une ou à plusieurs grandeurs physiques données, en vue de définir l'acceptabilité de mesure(s) de sécurité, au regard d'un ou de plusieurs objectifs de sécurité prédéfinis.

débit calorifique
Quantité de chaleur dégagée par unité de temps. S'exprime en Watts (W).

délai d'activation
« L'intervalle de temps qui s'écoule entre le déclenchement de la réponse d'un capteur jusqu'à ce que (...) le système d'alarme ou un autre système de sécurité incendie soit totalement opérationnel » B2

délai d'alarme
« Intervalle de temps compris entre l'allumage d'un incendie et le déclenchement de l'alarme » B2

délai de détection
« Intervalle de temps qui s'écoule entre l'allumage de l'incendie et sa détection par un système automatique ou manuel » B2

délai de pré-mouvement
« Période de temps qui s'écoule après l'émission d'une alarme ou d'un signal d'avertissement d'incendie et avant que les occupants ne commencent à se déplacer (ou se diriger) vers une sortie. » B2

délai de prise de conscience
« Période suivant l'émission d'une alarme ou d'un signal d'avertissement d'incendie mais avant que les occupants ne commencent à réagir. » B2

délai de réaction
Durée du « comportement observé après que les occupants ont reconnu l'alarme ou le signal d'avertissement d'incendie, et ont commencé à réagir, mais avant qu'ils n'aient commencé à évacuer » B2

déterministe
Qui obéit aux lois du déterminisme, c'est-à-dire qui considère que le (ou les) phénomène(s) étudié(s) est (sont) régi(s) par une (ou plusieurs) loi(s) telle(s) que les mêmes causes entraînent, dans les mêmes conditions ou circonstances, les mêmes effets.

enthalpie de combustion
Énergie dégagée sous forme de chaleur par la réaction de combustion d'une unité de masse de combustible dans les conditions normales de température et de pression. S'exprime en joule par kilogramme (J/kg). Lorsque le combustible est solide, cette enthalpie est influencée, le cas échéant, par des paramètres extérieurs (humidité, ventilation, etc.).

environnement bâti ou construit
« Immeuble ou autre structure » B2

équations de conservation
Équations de la physique traduisant la conservation de quantités telles que la masse, l'énergie ou la quantité de mouvement.

étude de sensibilité
Étude visant à identifier l'impact relatif de la variation de certains paramètres sur le résultat. Elle sert d'une part à identifier les paramètres influents, et d'autre part à définir la valeur la plus adéquate des paramètres étudiés.

évacuation
« Exécution d'une action efficace pour atteindre un refuge sûr ou une zone de sécurité. » B2

exutoire (de désenfumage)
« Dispositif d'évacuation de fumée et de chaleur intégré dans un élément de construction séparant l'intérieur du bâtiment de l'extérieur. Cet élément de construction présente un angle supérieur ou égal à 30° par rapport à la verticale. » B1

feu
« Processus de combustion caractérisé par l'émission de chaleur et d'effluents du feu et accompagné généralement par de la fumée, des flammes, une incandescence, ou par une combinaison de ces éléments. » B2

feu de dimensionnement
« Description quantitative des caractéristiques théoriques d'un feu dans le cadre du scénario d'incendie de dimensionnement. » B2

flux de chaleur
« Quantité d'énergie thermique émise, transmise ou reçue par unité de surface et de temps. » B2

flux thermique radiatif incident
Énergie arrivant sur une cible sous forme de rayonnement.

ingénierie de la sécurité incendie
« Application des méthodes d'ingénierie fondées sur des principes scientifiques au développement ou à l'évaluation de conceptions dans un environnement bâti au moyen de l'analyse de scénarios d'incendie spécifiques (...). » B2. Le recours à l'ingénierie de la sécurité incendie revient à prouver, généralement par le calcul, que les objectifs de sécurité sont atteints, au moyen de mesure(s) de sécurité définie(s) et évaluée(s).

ingénierie du désenfumage
Application de l'ingénierie de la sécurité incendie dans le but d'évaluer l'acceptabilité d'une installation de désenfumage dans un ou plusieurs espaces prédéfinis (p. ex. : une circulation, un local, un atrium...).

instationnaire
Qui varie dans le temps, par opposition à stationnaire.

maillage
Découpage de l'espace en cellules, dans lesquelles les équations de conservation sont résolues. L'ensemble des cellules forme le maillage.

maille
Portion unitaire de maillage, appelée également cellule ou volume de contrôle, dans laquelle les équations de conservation sont résolues.

marge de sécurité
« Quantité ou facteur de temps supplémentaire appliqué(e) à (...) une exigence de performance pour tenir compte des incertitudes ou des distributions statistiques des paramètres pertinents (...). » B3 Dans le cadre de ce guide, il s'agit de l'intervalle de temps entre le TDES et le TNES.

mécanique des fluides numérique
Discipline consistant à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par résolution numérique.

modèle
Une représentation plus ou moins abstraite de la réalité, construite dans un but défini (p. ex : un plan, un organigramme, un système d'équations). Dans le contexte de ce guide, les modèles sont principalement numériques, c'est-à-dire des programmes informatiques capables de réaliser des simulations numériques.

objectif de sécurité
Résultat attendu d'une ou de plusieurs mesures de mise en sécurité.

ouvrant (de désenfumage)
« Dispositif d'évacuation de fumée et de chaleur ou d'amenée d'air intégré dans un élément de construction séparant l'intérieur du bâtiment de l'extérieur. Cet élément de construction présente un angle inférieur à 30° par rapport à la verticale. » B1

pouvoir calorifique
Voir enthalpie de combustion

puissance de feu
Voir débit calorifique

refuge sûr
« Emplacement temporaire qui est à l'abri d'un danger immédiat dû aux effets de l'incendie. » B2

RSET
Acronyme de « required safe evacuation time ». Voir temps nécessaire pour l'évacuation en sécurité (TNES).

scénario d'incendie
« Description qualitative du déroulement d'un incendie dans le temps, identifiant les événements clés qui caractérisent l'incendie et le différencient des autres incendies potentiels. » B2

scénario d'incendie de dimensionnement
« Un scénario d'incendie spécifique sur lequel sera réalisée une analyse déterministe d'ingénierie de la sécurité incendie » B2

seuil d'acceptabilité
Valeur seuil utilisée pour construire un critère d'acceptabilité.

simulation numérique
Reproduction artificielle du fonctionnement d'un appareil, d'une machine, d'un système, d'un phénomène, à l'aide d'une maquette ou d'un programme informatique, à des fins d'étude, de démonstration ou d'explication. Dans le contexte de ce guide, il s'agit de reproduire le(s) scénario(s) d'incendie de dimensionnement avec un modèle numérique.

source prescrite
Évolution temporelle du débit calorifique, estimée a priori par l'organisme reconnu compétent et utilisée comme donnée d'entrée des modèles.

température
Grandeur empirique caractéristique d'un système, qui permet une description quantitative des phénomènes liés à la sensation de chaud ou de froid ressentie à son contact et qui est d'autant plus élevée que le système est chaud

temps d'atteinte du critère (TAC)
Temps à partir duquel un critère d'acceptabilité est dépassé dans une zone spatiale préalablement définie par l'organisme reconnu compétent.

temps d'évacuation
« Intervalle de temps qui s'écoule entre le déclenchement de l'alarme incendie (...) et l'instant où les occupants d'une partie spécifique d'un immeuble ou de tout l'immeuble sont capables de pénétrer dans une zone de sécurité » ou un refuge sûr. B2

temps de mise en sécurité des personnes (TMSP)
« Intervalle de temps qui s'écoule entre l'allumage du feu et l'instant où les occupants d'une partie spécifique d'un immeuble ou de tout l'immeuble sont capables de pénétrer dans une zone de sécurité » ou un refuge sûr. B2

temps de mouvement
« Temps nécessaire pour que tous les occupants d'une partie spécifiée d'un environnement construit se déplacent vers une sortie et la franchissent pour entrer dans une zone de sécurité » ou un refuge sûr. B2

temps de reconnaissance
Voir délai de prise de conscience

temps de réponse
Voir délai de réaction

temps disponible pour l'évacuation en sécurité (TDES)
Pour un occupant individuel, l'intervalle de temps calculé entre le moment de l'allumage et le moment où les conditions sont telles que l'occupant se trouve dans l'incapacité d'exécuter une action efficace d'évacuation vers un refuge sûr ou une zone de sécurité.

temps nécessaire pour l'évacuation en sécurité (TNES)
« La durée calculée nécessaire à un occupant pour passer de son emplacement au moment de l'allumage à un refuge sûr ou une zone de sécurité » B2

terme source
Voir source prescrite

toxicité
« La qualité de ce qui est toxique » c'est-à-dire « nocif » B2

turbulence
État d'un fluide qui est le siège de tourbillons dont la taille, la localisation et la dimension varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles.

uniforme
Qui ne varie pas dans l'espace.

validation
Processus consistant à s'assurer qu'un modèle ou un outil de calcul représente suffisamment fidèlement la réalité.

vérification
Processus consistant à déterminer si un modèle ou un outil de calcul correspond au cahier des charges de son développement.

visibilité
« Distance maximale à laquelle un objet de dimension, luminosité et contraste définis peut être vu et reconnu » B2

zone d'intérêt
Un volume ou une surface dans lequel l'organisme reconnu compétent évalue le temps disponible pour l'évacuation en sécurité.

zone de désenfumage
« Zone géographique dans laquelle la fonction de désenfumage est assurée » B3

zone de sécurité
« Zone sans danger et depuis laquelle il est possible de se déplacer librement sans être exposé à un incendie » B2 À ne pas confondre avec les zones de mise en sécurité définies à l'article MS 54 du règlement de sécurité.

B1
Règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP) approuvé par arrêté du 25/06/1980, publié au JORF[30] du 14/08/1980, page 7363
Ministère de l'Intérieur, 2012

B2
NF EN ISO 13943 : Sécurité au feu - Vocabulaire
Association Française de Normalisation, 2011

B3
NF S 61-931 : Systèmes de sécurité incendie (SSI) - Dispositions générales
Association Française de Normalisation, 2014

B4
Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée, dite loi « MOP », publiée au JORF [30] du 13 /07/1985, p. 7914

B5
ISO 16733-1: Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires - Part 1: Selection of design fire scenarios.
Association Française de Normalisation, 2015

B6
CURTAT M.
Traité de physique du bâtiment - Tome 3: Physique du feu pour l'ingénieur.
CSTB, 2001

B7
BABRAUSKAS V.
in the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Chapter 3-1: Heat Release Rate
National Fire Protection Association, 2008

B8
ISO/TR 16738 : Ingénierie de la sécurité incendie - Informations techniques sur les méthodes d'évaluation du comportement et du mouvement des personnes
Association Française de Normalisation, 2009

B9
Norme NF ISO 13571 : Composants dangereux du feu - Lignes directrices pour l'estimation du temps disponible avant que les conditions de tenabilité ne soient compromises
Association Française de Normalisation, 2012

B10
PURSER D.A.
in the SFPE Handbook of fire protection engineering, Fourth Edition. Chapter 2-6: Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat
National Fire Protection Association, 2008

B11
ISO 17493 : Vêtements et équipement de protection contre la chaleur – Méthode d'essai de la résistance à la chaleur de convection au moyen d'un four à circulation d'air chaud
Association Française de Normalisation, 2000

B12
The SFPE Handbook of fire protection engineering, Fifth Edition
National Fire Protection Association, 2016

B13
ISO 16734 : Ingénierie de la sécurité incendie - Exigences régissant les équations algébriques - Panaches de feu
Association Française de Normalisation, 2006

B14
ISO 16735 : Ingénierie de la sécurité incendie - Exigences régissant les équations algébriques - Couches de fumée
Association Française de Normalisation, 2015

B15
ISO 16736 : Ingénierie de la sécurité incendie - Exigences régissant les équations algébriques - Écoulements en jet sous plafond
Association Française de Normalisation, 2006

[30] *Journal Officiel de la République Française.*

B16
ISO 16736 : Ingénierie de la sécurité incendie - Exigences régissant les équations algébriques - Écoulements au travers d'une ouverture
Association Française de Normalisation, 2012

B17
ISO 24678-6 : Ingénierie de la sécurité incendie - Exigences régissant les formules algébriques - Partie 6 : Phénomènes liés à l'embrasement généralisé
Association Française de Normalisation, 2016

B18
JONES W., PEACOCK R., FORNEY G. & RENEKE P.
CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport
US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2009

B19
SUZUKI K., HARADA K. & TANAKA T.
A Multi-layer Zone Model For Predicting Fire Behavior In A Single Room
Fire Safety Science, 2003, Vol. 7

B20
PREDTECHENSKII V. & MILINSKII A.
Planning for Foot Traffic in Buildings (translated from the Russian)
Stroizdat Publishers, Moscow, 1969

B21
PAULS J.
in the SFPE Handbook of fire protection engineering, Second Edition - Chapter 3.13 : Movement of people
National Fire Protection Association, 1995

B22
FRUIN J.J.
Pedestrian planning and design
Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc., 1971

B23
Arrêté du 22 mars 2004 portant approbation de dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (dispositions relatives au désenfumage)
Ministère de l'intérieur de la sécurité intérieure et des libertés locales, 2004

B24
Arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages. Publié au JORF n°78 du 1 avril 2004, page 6328
Ministère de l'intérieur de la sécurité intérieure et des libertés locales, 2004

B25
GUILLAUME E.
Modélisation de l'évacuation en cas d'incendie
Technique de l'Ingénieur, 2013, Vol. SE 2068

B26
GWYNNE S., GALEA E., OWEN M., LAWRENCE P.J. & FILIPPIDIS L.
A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment
Building and environment, Elsevier, 1999, Vol. 34, pp. 741-749

B27
KULIGOWSKI E.D., PEACOCK R.D. & HOSKINS B.L.
A review of building evacuation models
US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2005

B28
ISO 16730 : Ingénierie de la sécurité incendie – Procédures et exigences pour la vérification et la validation des méthodes de calcul
Association Française de Normalisation, 2015

B29
THORNTON W.M.
The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds
Philosophical Magazine, 1917, Vol. 33, pp. 196-203

B30
NF EN 12101 : Systèmes pour le contrôle des fumées et de la chaleur – Partie 2 : spécifications relatives aux dispositifs d'évacuation naturelle de fumées et de chaleur
Association Française de Normalisation, 2003

LABORATOIRE CENTRAL
DE LA PRÉFECTURE DE POLICE

39 bis rue de Dantzig
75015 Paris

Std. 33(0)1 55 76 24 15
Fax 33(0)1 55 76 23 94

www.lcpp.fr
pp-labcent@interieur.gouv.fr

N°ISBN : 978-2-11-151968-8

ÉDITION JUILLET 2017

OUVRAGE COLLECTIF

CONCEPTION GRAPHIQUE
SERVICE DE LA COMMUNICATION

IMPRESSION
IMPRIMERIE DOSTL