

INSTALLATIONS CLASSÉES ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

LIVRE I - INGÉNIERIE DE LA SÉCURITÉ INCENDIE

- > Guide de conception et de calcul des structures en béton en situation d'incendie
- > Exemple d'application

LIVRE II - EXPLOITATION DU LOGICIEL FLUMILOG

- > Analyse de la prise en compte des parois et de la structure
- > Études de cas pour les structures, les écrans thermiques et les implantations de bâtiments



SAFEGE
Ingénieurs Conseils

CERIB

CIM *Béton*
CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

CSTB
le futur en construction

LES
PRODUITS
EN
BETON

ACOB
Association Française des Fabricants
de Châssis en Béton

INSTALLATIONS CLASSÉES ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

LIVRE I - INGÉNIERIE DE LA SÉCURITÉ INCENDIE

- > Guide de conception et de calcul des structures en béton en situation d'incendie
- > Exemple d'application

LIVRE II - EXPLOITATION DU LOGICIEL FLUMILOG

- > Analyse de la prise en compte des parois et de la structure
- > Études de cas pour les structures, les écrans thermiques et les implantations de bâtiments

Contributions à l'ouvrage :

Éric BORDAIS-MASSNET	ACOB
Ménad CHENAF	CSTB
Philippe FROMY	CSTB
Serge HORVATH	CIMBÉTON
Thierry MURAT	SAFEGE
Fabienne ROBERT	CERIB
Nicolas TAILLEFER	CSTB

Avant-propos

Cet ouvrage de référence, composé de deux livres, propose aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre des méthodologies de conception et d'implantation pour les bâtiments soumis aux rubriques des installations classées. Dans le cadre de l'évolution de la réglementation relative aux entrepôts couverts, CIMBÉTON, l'ACOB et le CERIB mettent à votre disposition cet outil afin de faciliter la conception des documents techniques nécessaires aux dossiers réglementaires.

Le premier livre, réalisée par le CSTB et le CERIB, concerne l'aptitude des entrepôts en béton (structures, ossatures, murs séparatifs coupe-feu et façades en béton à fonction d'écran thermique) à satisfaire aux exigences de sécurité incendie. Il donne les méthodes à appliquer concernant les installations classées soumises au régime de l'autorisation en son article 6-§5 (Ingénierie de Sécurité Incendie – ISI) et à celui de l'enregistrement en son article 2-2-6, concernant les bâtiments ayant une structure en béton.

Le deuxième livre, établi par le bureau d'études Safège concerne l'utilisation commentée du logiciel FLUMILOG de l'INERIS. Il analyse les possibilités de structure, d'écran thermique et d'implantation données par ce logiciel (calcul des effets thermiques produits par un entrepôt), imposées en son article 2-1 pour les installations classées soumises au régime de l'enregistrement.

Sommaire

LIVRE I - INGÉNIERIE DE LA SÉCURITÉ INCENDIE **7**

- > Guide de conception et de calcul des structures en béton en situation d'incendie
 - > Exemple d'application
-

● I Conception et calcul des entrepôts	13
1. Objectifs de sécurité et comportement au feu (au sens de l'arrêté)	14
2. Définition de l'action thermique, choix des scénarios de feu	22
3. Analyse du bâtiment	35
4. Comportement au feu : calcul de l'échauffement et réponse de la structure	39
5. Annexes	45

● 2 Exemple d'application: entrepôt logistique de 29 000 m²	53
1. Objet	54
2. Documents et information de référence	54
3. Description sommaire de l'entrepôt	55
4. Rappel des objectifs de sécurité et critères associés	56
5. Scénarios d'incendie pris en compte	57
6. Analyse du bâtiment	69
7. Échauffement des éléments	76
8. Comportement mécanique à températures élevées	83
9. Synthèse de la vérification des principaux critères de sécurité	99

LIVRE II - EXPLOITATION DU LOGICIEL FLUMILOG **101**

- > Analyse de la prise en compte des parois et de la structure
 - > Études de cas pour les structures, les écrans thermiques et les implantations de bâtiments
-

● I Étude du logiciel Flumilog® 2.01 – Analyse de la prise en compte des parois et de la structure	107
1. Présentation du logiciel	108
2. Cahier des charges	119
3. Exploitation des résultats	121
4. Conclusion	136

● 2 - Étude du logiciel Flumilog® 2.01 – Rapports	137
Annexe 1 - scénarios de simulation	138
Annexe 2 - rapport Flumilog - essai 1	142
Annexe 3 - rapport Flumilog - essai 2	151
Annexe 4 - rapport Flumilog - essai 3	157
Annexe 5 - rapport Flumilog - essai 4	163
Annexe 6 - rapport Flumilog - essai 5	169
Annexe 7 - rapport Flumilog - essai 6	175
Annexe 8 - rapport Flumilog - essai 7	181
Annexe 9 - rapport Flumilog - essai 8	187
Annexe 10 - rapport Flumilog - essai 9	193
Annexe 11 - rapport Flumilog - essai 10	199
Annexe 12 - rapport Flumilog - essai 11	205
Annexe 13 - rapport Flumilog - essai 12	211
Annexe 14 - rapport Flumilog - essai 13	217
Annexe 15 - rapport Flumilog - essai 14	223
Annexe 16 - rapport Flumilog - essai 15	235



INSTALLATIONS CLASSÉES ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

LIVRE I - INGÉNIERIE DE LA SÉCURITÉ INCENDIE

- > Guide de conception et de calcul des structures en béton en situation d'incendie
- > Exemple d'application

Introduction

Les structures en béton armé et précontraint sont couramment employées pour la construction d'entrepôts. Ces structures largement préfabriquées permettent une construction rapide et économique qui fournit une réponse adaptée à la fois aux exigences des maîtres d'ouvrage et aux exigences de sécurité liées à l'exploitation de tels bâtiments.

L'arrêté du 5 août 2002 a introduit la possibilité de recourir aux méthodes de l'ingénierie de la sécurité incendie pour vérifier les critères de sécurité en cas d'incendie. Cette possibilité ouvre la perspective de déroger à certaines contraintes qui limitaient jusque-là l'optimisation des structures en béton armé et précontraint. Dans la mesure où il est aujourd'hui admis de prendre en compte des scénarios¹ de feu qui décrivent de manière réaliste le développement d'un incendie, la réponse de la structure doit également être étudiée au moyen de méthodes avancées qui répondent à des objectifs de comportement d'ensemble de la structure. La mise en œuvre de ces méthodes avancées tant pour la détermination de l'action thermique² que pour le calcul de la réponse de la structure nécessite une bonne compréhension des phénomènes physiques et une démarche d'analyse adaptée.

En octobre 2008, est paru le document intitulé *Ingénierie de la sécurité incendie - Entrepôts - Guide des modalités d'application de l'article 6 - 6^e alinéa de l'arrêté du 5 août 2002*, publié par l'AFNOR. Il rappelle les objectifs de sécurité et les critères associés dans le cas d'études d'ingénierie de la sécurité incendie appliquées aux entrepôts et décrit les méthodes de vérification permettant de satisfaire les objectifs de sécurité.

Le présent guide constitue un outil complémentaire de l'arrêté du 5 août 2002 et du guide d'octobre 2008 pour aider à la réalisation d'une étude d'ingénierie. Il vise trois objectifs :

- **comprendre** les phénomènes physiques associés aux actions thermiques ;
- **collecter** les données nécessaires à la réalisation de l'étude d'ingénierie ;
- **réaliser** l'étude spécifique d'ingénierie incendie proposée par l'arrêté.

Comme pour le guide 2008, ce présent document ne traite pas d'une démarche globale d'ingénierie de la sécurité incendie, telle qu'elle pourrait être effectuée dans le cadre des travaux en cours tant au niveau international, par l'ISO TC 92/SC 4 qu'au niveau français par le Projet National Ingénierie de la Sécurité Incendie (PN-ISI).

Le guide a pour but d'exposer une démarche applicable au calcul de la résistance au feu des structures d'entrepôt en béton, à partir de scénarios de feu caractérisés

1 Terme défini dans le glossaire.

2 Terme défini dans le glossaire.

par des actions thermiques différentes de celle correspondant au feu conventionnel³ ISO-R834. Il ne s'agit donc pas d'un recueil de solutions types. Les applications proposées sont valides seulement pour les cas étudiés et sont proposées à titre d'illustration.

Le guide est principalement destiné à l'ingénieur du bureau d'étude en charge du dimensionnement de la structure d'un entrepôt ou bien de la vérification de sa durée de stabilité. Les données nécessaires à l'étude sont présentées de manière à permettre l'estimation du temps nécessaire pour les récolter.

Dans la mesure où on s'intéresse à la stabilité des structures soumises aux effets d'un feu naturel⁴, seuls les objectifs de sécurité liés au comportement au feu de la structure du bâtiment sont concernés par le guide. Les autres objectifs, concernant l'évacuation des occupants et l'intervention des secours en particulier, sortent du périmètre du guide.

De plus, les moyens de protection active et les mesures de prévention des incendies sont exposés dans les arrêtés. Ils n'entrent pas dans le périmètre du guide.

3 Terme défini dans le glossaire.

4 Terme défini dans le glossaire.

● I Conception et calcul des entrepôts	13
1. Objectifs de sécurité et comportement au feu (au sens de l'arrêté)	14
1.1 Rappel du texte	14
1.2 Stabilité	16
1.3 Absence de ruine en chaîne	17
1.4 Non-effondrement vers l'extérieur	18
1.5 Compartimentage (murs coupe-feu)	19
2. Définition de l'action thermique, choix des scénarios de feu	22
2.1 L'action thermique sur les éléments de la structure	22
2.1.1 La cible est plongée dans la zone de flamme ou de panache	24
2.1.2 La cible est plongée dans les gaz chauds accumulés sous le plafond (couche chaude)	25
2.1.3 La cible est plongée dans l'air à température ambiante et reçoit une agression thermique radiative	26
2.2 Généralités sur l'élaboration des scénarios de feu	26
2.2.1 Activité des foyers et débit calorifique	26
2.2.2 Rôle des ouvertures et contrôle par la ventilation	27
2.2.3 Rayonnement thermique direct des flammes	28
2.3 Choix de scénarios	30
2.3.1 Phase de démarrage	30
2.3.2 Phase d'extension du feu	31
2.3.3 Phase de feu développé	31
2.3.4 Incendie d'un canton	31
2.3.5 Incendie d'une cellule	32
2.4 Le choix des outils de calculs	32
2.4.1 Rappel sur les outils de calculs disponibles	32
2.4.2 Choisir un modèle et utiliser un logiciel	33
3. Analyse du bâtiment	35
3.1 Analyse préliminaire	35
3.2 Condition d'exposition des cibles	36
3.3 Détails constructifs (liaisons, façades)	38

4. Comportement au feu : calcul de l'échauffement et réponse de la structure	39
4.1 Échauffement des éléments	39
4.2 Réponse de la structure soumise à une action thermique	41
4.2.1 Propriétés thermo-mécaniques des matériaux	41
4.2.2 Action thermique uniforme: vérification de la stabilité au feu des éléments	41
4.2.3 Action thermique uniforme: comportement d'ensemble (cinématique de ruine)	42
4.2.4 Action thermique non uniforme: comportement d'ensemble (plusieurs courbes température)	43
4.2.5 Compatibilité des déformations	43
4.3 Outils de calcul	43
5. Annexes	45
Annexe 1 - Données nécessaires pour réaliser une étude	45
Annexe 2 - Démarche d'une étude	46
Annexe 3 - Proposition du contenu minimal d'un rapport d'étude	47
Annexe 4 - Exemple de calcul	
Annexe 5 - Glossaire	50

● 2 - Exemple d'application: entrepôt logistique de 29000 m²	53
1. Objet	54
2. Documents et information de référence	54
3. Description sommaire de l'entrepôt	55
4. Rappel des objectifs de sécurité et critères associés	56
5. Scénarios d'incendie pris en compte	57
5.1 - Feu localisé: scénario 0	58
5.2 - Feu sévère: scénarios 1, 2, 3, 4 et 4-1	59
5.3 - Feu développé: scénarios 5, 6, 7 et 8	60
5.4 - Incendie d'un canton: scénarios 9, 10, 11 et 12	60
5.5 - Incendie d'une cellule: scénarios 13	61
5.6 - Résultats des simulations	64
5.7 - Actions thermiques sur les structures	67

6. Analyse du bâtiment	69
6.1 - Actions thermiques sur la structure	69
6.2 - Détails constructifs	74
6.3 - Modélisations des cibles	74
7. Échauffement des éléments	76
7.1 - Méthode de calcul	76
7.2 - Hypothèses	76
7.3 - Calcul de l'échauffement	77
7.4 - Résultats des calculs d'échauffement	78
8. Comportement mécanique à températures élevées	83
8.1 - Hypothèses mécaniques	83
8.2 - Matériaux	84
8.3 - Charges	84
8.4 - Résultats mécaniques	85
9. Synthèse de la vérification des principaux critères de sécurité	99
9.1 - Stabilité sous feu ISO	99
9.2 - Absence de ruine en chaîne et de ruine vers l'extérieur	99



Chapitre

1

Conception et calcul des entrepôts

1. Objectifs de sécurité et comportement au feu (au sens de l'arrêté)

1.1 - Rappel du texte

Les parties du texte de l'arrêté qui sont visées par le présent guide sont les suivantes. Il s'agit d'extraits du texte dans lesquels les passages relatifs au comportement au feu de la structure ont été sélectionnés.

DISPOSITIONS RELATIVES AU COMPORTEMENT AU FEU DES ENTREPÔTS

Article 6: dispositions constructives

De façon générale, les dispositions constructives visent à ce que la ruine d'un élément (murs, toiture, poteaux, poutres par exemple) suite à un sinistre n'entraîne pas la ruine en chaîne de la structure du bâtiment, notamment les cellules de stockage avoisinantes, ni de leurs dispositifs de recouvrement, et ne favorise pas l'effondrement de la structure vers l'extérieur de la première cellule en feu.

En vue de prévenir la propagation d'un incendie à l'entrepôt ou entre parties de l'entrepôt, celui-ci vérifie les conditions constructives minimales suivantes (extraits):

– pour les entrepôts de deux niveaux ou plus, les planchers sont coupe-feu de degré 2 heures et la stabilité au feu de la structure d'une heure pour ceux dont le plancher du dernier niveau est situé à plus de 8 mètres du sol intérieur. Pour les entrepôts à simple rez-de-chaussée de plus de 12,50 m de hauteur, la stabilité au feu de la structure est d'une heure, sauf si le bâtiment est doté d'un dispositif d'extinction automatique d'incendie et qu'une étude spécifique d'ingénierie incendie conclut à une cinématique de ruine démontrant

le non-effondrement de la structure vers l'extérieur de la première cellule en feu et l'absence de ruine en chaîne, et une cinétique d'incendie compatible avec l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours;

– les escaliers intérieurs reliant des niveaux séparés, dans le cas de planchers situés à plus de 8 mètres du sol intérieur et considérés comme issues de secours, sont encloisonnés par des parois coupe-feu de degré 1 heure et construits en matériaux M0. Ils doivent déboucher directement à l'air libre, sinon sur des circulations encloisonnées de même degré coupe-feu y conduisant. Les blocs-portes intérieurs donnant sur ces escaliers sont pare-flamme de degré 1 heure;

– les ateliers d'entretien du matériel sont isolés par une paroi et un plafond coupe-feu de degré 2 heures ou situés dans un local distant d'au moins 10 mètres des cellules de stockage. Les portes d'intercommunication sont coupe-feu de degré 2 heures et sont munies d'un ferme-porte;

– les bureaux et les locaux sociaux, à l'exception des bureaux dits de « quais » destinés à accueillir le personnel travaillant directement sur les stockages et les quais, sont situés dans un local clos distant d'au moins 10 mètres des cellules de stockage, ou isolés par une paroi, un plafond et des portes d'intercommunication munies d'un ferme-porte, qui sont tous coupe-feu de degré 2 heures, sans être contigus avec les cellules où sont présentes des matières dangereuses.

COMPARTIMENTAGE ET AMÉNAGEMENT DU STOCKAGE

Article 8: compartimentage

L'entrepôt est compartimenté en cellules de stockage afin de limiter la quantité de matières combustibles en feu lors d'un incendie. Ce compartimentage doit permettre de prévenir la propagation d'un incendie d'une cellule de stockage à l'autre. Pour atteindre cet objectif, les cellules doivent respecter les dispositions suivantes:

– les parois qui séparent les cellules de stockage doivent être des murs coupe-feu de degré minimum 2 heures;

– les percements effectués dans les murs ou parois séparatifs, par exemple pour le passage de gaines, sont rebouchés afin d'assurer un degré coupe-feu équivalent à celui exigé pour ces murs ou parois séparatifs;

– les ouvertures effectuées dans les murs ou parois séparatifs, par exemple pour le passage de galeries techniques, sont munies de dispositifs assurant un degré coupe-feu équivalent à celui exigé pour ces murs ou parois séparatifs;

– les portes communicantes entre les cellules doivent être coupe-feu de degré 2 heures et munies d'un dispositif de fermeture automatique qui doit pouvoir être commandé de part et d'autre du mur de séparation des cellules. La fermeture automatique des portes coupe-feu ne doit pas être gênée par des obstacles;

- les parois séparatives doivent dépasser d'au moins 1 mètre la couverture au droit du franchissement. La toiture doit être recouverte d'une bande de protection sur une largeur minimale de 5 mètres de part et d'autre des parois séparatives. Alternativement aux bandes de protection, une colonne sèche placée le long des parois séparatives peut assurer cette protection sous réserve de justification;
- si les murs extérieurs n'ont pas un degré coupe-feu 1 heure, les parois séparatives de ces cellules sont prolongées latéralement aux murs extérieurs sur une largeur de 1 mètre ou de 0,50 mètre en saillie de la façade dans la continuité de la paroi.

1.2 - Stabilité au feu

La stabilité au feu implique de vérifier que pour une durée spécifiée et une action thermique donnée (par exemple 1 h sous action thermique conventionnelle), la structure porteuse est capable de reprendre les charges auxquelles elle est soumise. La combinaison des charges (charges gravitaires, climatiques et exploitation) est spécifique à l'état limite ultime accidentel de type incendie. On s'intéresse :

- soit à chaque élément séparément (poutre, poteau, mur) ;
- soit à une structure partielle ou complète (portique).

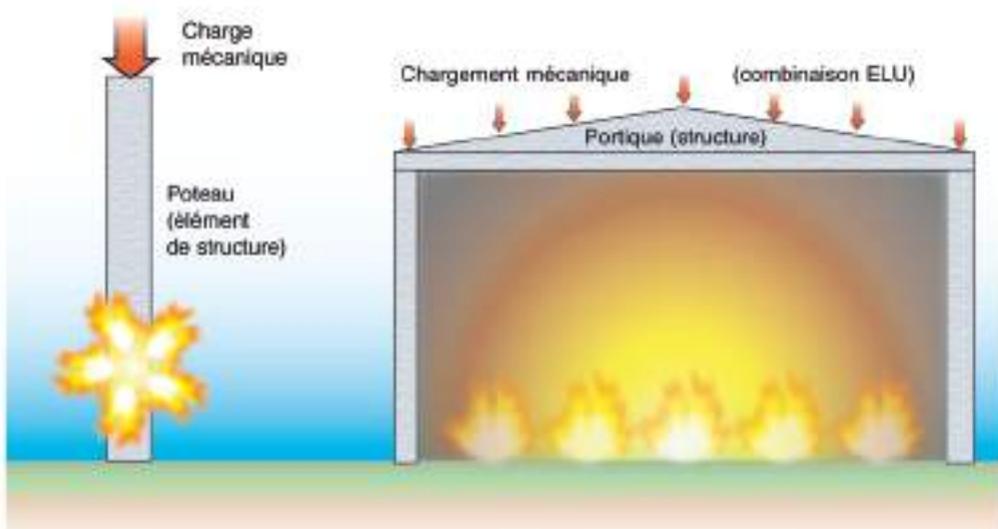


Figure 1 : stabilité au feu d'un élément isolé et d'une structure

Généralement, les panneaux de couverture reposent directement sur les pannes. Les pannes sont posées de façon isostatique sur les poutres principales. Les pannes qui ne participent pas directement à la stabilité de la structure ne sont pas concernées par les vérifications de stabilité au feu. En effet, il est admis que lorsqu'elles sont exposées à des températures très élevées, les zones situées en dessous présentent des conditions de tenabilité (fumée, températures) excluant la présence des occupants. En revanche, les pannes qui appartiennent au système de contreventement font partie des éléments de structure. Dans ce cas, leur stabilité est indispensable à la stabilité au feu de l'ensemble de l'ouvrage, elle doit donc être vérifiée.

Dans le cas de la sollicitation conventionnelle, la durée de stabilité au feu est fixée réglementairement. Tous les éléments de la structure sont exposés à la même action thermique. Elle représente une enveloppe des actions pouvant solliciter la structure. Elle est généralement appliquée de façon uniforme à l'ensemble des éléments de la structure situés à l'intérieur d'un compartiment fermé par des parois coupe-feu. En particulier, les entrepôts sont généralement constitués de cellules séparées par des murs coupe-feu. On applique alors l'action thermique conventionnelle à tous les éléments de la cellule. Les éléments mitoyens (mur coupe-feu) sont sollicités d'un seul côté.

Dans le cas d'une sollicitation de type feu naturel, la sollicitation peut ne pas être uniforme (feu localisé par exemple).

La durée de stabilité au feu de la structure doit être compatible avec d'autres objectifs de sécurité, c'est-à-dire :

- être supérieure à la durée d'évacuation des occupants ;
- être supérieure au délai d'intervention des secours ;
- être compatible avec les critères liés au compartimentage (stabilité des murs coupe-feu ou des planchers, enclouement des escaliers).

1.3 - Absence de ruine en chaîne

Dans le cas de l'action thermique conventionnelle, la durée de stabilité de la structure est imposée. L'ensemble de la structure devant être stable au feu, le critère d'absence de ruine en chaîne n'est pas considéré. Lorsqu'on considère des actions thermiques de type feu naturel, le critère d'absence de ruine en chaîne doit être vérifié.

Un incendie se déclarant à l'intérieur d'une cellule ne doit pas provoquer la ruine de la structure porteuse dans un autre endroit de l'entrepôt. Cet objectif vise à préserver la sécurité des équipes d'interventions qui pourraient entrer dans l'entrepôt et des occupants n'ayant pas pu évacuer rapidement dans les zones éloignées du foyer. Ainsi une ruine locale éventuelle de la structure au droit de l'incendie ne doit

pas conduire à mettre en danger les autres parties de l'entrepôt, non soumises à l'incendie. Les critères associés à l'absence de ruine en chaîne se vérifient pour chaque cellule pour toute la durée de l'incendie et impliquent le non-effondrement des murs séparatifs. Pour simplifier, on peut dire que la ruine de la structure d'une cellule ne doit pas entraîner la ruine des cellules adjacentes.

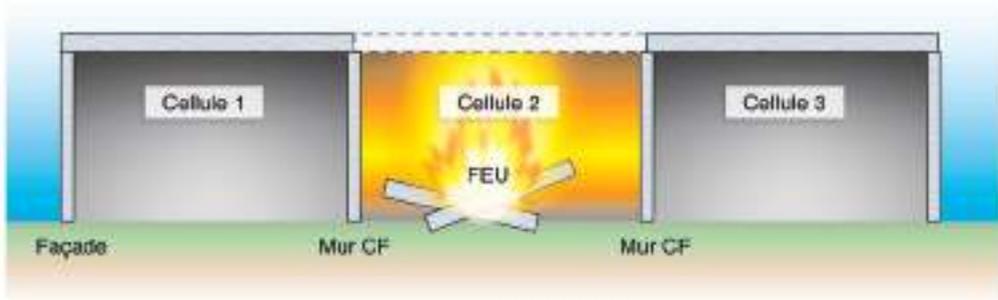


Figure 2 : schéma de principe illustrant l'absence de ruine en chaîne d'une structure portique comprenant trois cellules

1.4 - Non-effondrement vers l'extérieur

Dans le cas de l'action thermique conventionnelle et d'une durée de stabilité imposée, l'ensemble de la structure doit être stable au feu, le critère de ruine vers l'extérieur des éléments de structure pendant cette durée n'est donc pas considéré. Lorsqu'on prend en compte des actions thermiques de type feu naturel, le critère de non-effondrement vers l'extérieur doit être vérifié.

Un incendie se déclarant à l'intérieur d'une cellule ne doit pas provoquer l'effondrement des façades vers l'extérieur de l'entrepôt. Cet objectif vise à préserver la sécurité des équipes de secours situées à l'extérieur du bâtiment. Une ruine locale d'éléments de structure, par exemple la structure de la façade au droit de l'incendie, ne doit pas conduire à mettre en danger les personnes éventuellement présentes à l'extérieur de l'entrepôt (service de secours par exemple). Il est alors nécessaire d'évaluer la cinématique de ruine, c'est-à-dire la direction vers laquelle l'élément de structure vertical va s'effondrer. Les critères associés au non-effondrement vers l'extérieur se vérifient pour chaque façade et pour toute la durée de l'incendie.

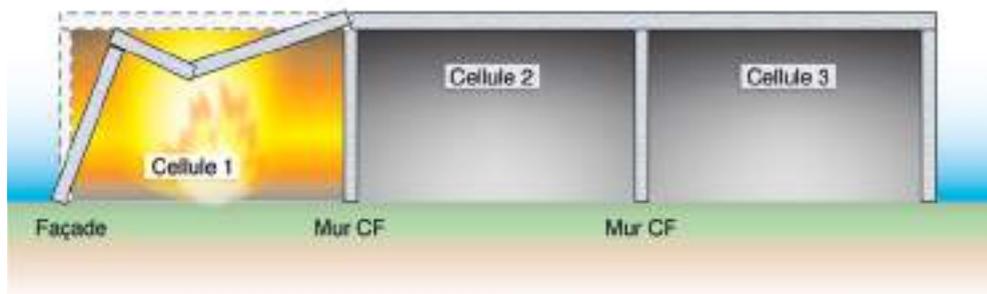


Figure 3 : schéma de principe illustrant le non-effondrement vers l'extérieur de la façade

Parmi les facteurs intervenant dans la satisfaction de ce critère, on compte les charges appliquées à la structure, en particulier les charges qui provoquent des moments de flexion dans les poteaux (poids des auvents, charges excentrées), l'effet des gradients thermiques (exposition au feu non uniforme de la section), les déplacements du reste de la structure ainsi que l'efficacité des liaisons entre éléments. En particulier dans le cas courant des poteaux, on étudiera avec attention la liaison en tête entre le poteau et le reste de la structure. En effet, le comportement de cette liaison dans le temps influence beaucoup le sens de ruine de la façade. Par exemple, si les poutres s'effondrent avant les poteaux et si la liaison poteau poutre reste maintenue durant l'incendie, il est possible de démontrer que la poutre va entraîner le poteau dans son effondrement vers l'intérieur du bâtiment. En l'absence de liaison (poteau libre en tête), l'effet du gradient thermique dans la section du poteau est à étudier en détail car il peut entraîner la déformation du poteau vers l'extérieur (côté opposé au feu) et provoquer sa ruine par perte de stabilité (effet de l'excentricité des charges).

1.5 - Compartimentage (murs coupe-feu)

Le compartimentage a pour but de limiter la propagation de l'incendie à travers l'entrepôt. Il concerne des éléments verticaux (murs séparatifs des cellules) ou horizontaux (planchers entre niveau ou couverture).

Dans les entrepôts en béton, il est courant que les murs coupe-feu soient solidaires de la structure porteuse. Par exemple, ces murs sont fréquemment réalisés avec des panneaux en béton maintenus par des poteaux présentant des feuillures. En conséquence, l'efficacité du compartimentage dépend :

- de l'isolation thermique des panneaux ;
- de l'étanchéité aux gaz des parois ;
- de la stabilité au feu des parois (panneaux et poteaux).

Le critère d'étanchéité au gaz implique que la déformation relative entre les poteaux et les panneaux reste limitée. La stabilité au feu des poteaux doit être au moins celle requise par le degré coupe-feu du mur, même si le degré de stabilité au feu requis pour la structure est plus faible. Par exemple, le degré de stabilité au feu exigé pour la structure porteuse peut être de 1 h 30 (feu ISO) et le degré coupe-feu du mur de 2 h. En conséquence les poteaux participant directement à la stabilité du mur coupe-feu doivent avoir une stabilité au feu (feu ISO) de 2 h au minimum. Il faut tenir compte du fait que le reste de la structure peut s'effondrer avant, ce qui peut en particulier modifier les conditions d'appuis des poteaux.

La figure 4 illustre deux dispositions courantes pour les murs coupe-feu.

Selon l'article 8, le degré coupe feu des parois servant au compartimentage de l'entrepôt doit être d'au moins 2 h, c'est-à-dire qu'elles sont stables au feu 2 h sous action thermique conventionnelle, qu'elles sont également étanches aux gaz chauds et présentent une isolation thermique suffisante pour que la température de la face non exposée ne dépasse pas 140 °C en moyenne et 180 °C localement.

L'article 8 contient également des prescriptions concernant la forme de ces parois qui doivent dépasser de 1 m en toiture et être prolongées en façade de 1 m latéralement ou de 0,5 m en saillie dans le prolongement du mur.

Bien entendu, les ouvertures dans ces murs (portes, fourreaux, gaines) doivent présenter le même degré coupe-feu que les parois dans lesquelles elles sont implantées.

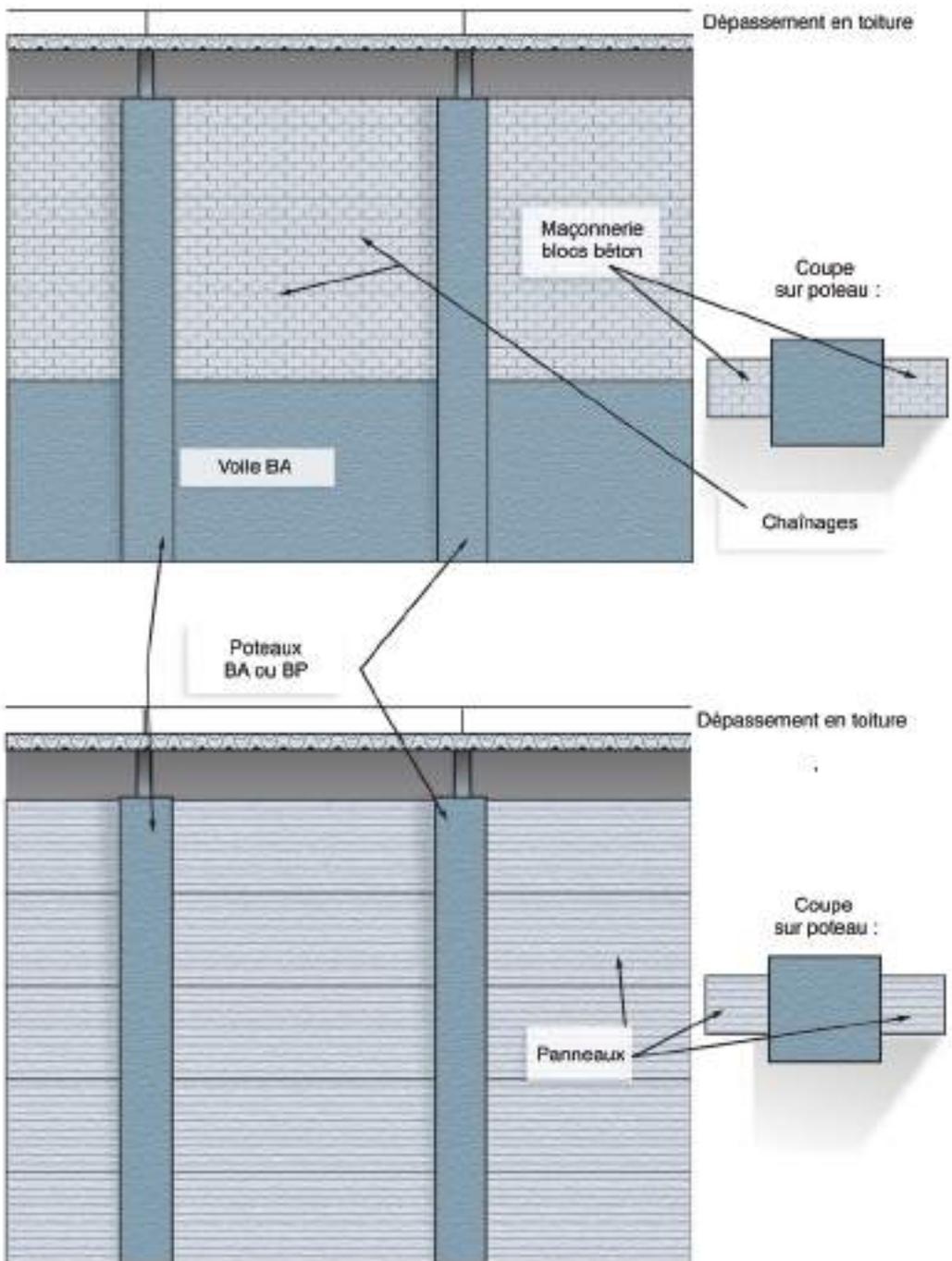


Figure 4 : dispositions constructives courantes pour les murs coupe-feu

2. Définition de l'action thermique, choix des scénarios de feu

L'objectif de ce chapitre est d'aider le bureau d'étude à définir la ou les actions thermiques (évolution temporelle et spatiale de la température au voisinage des éléments de structure) utiles au dimensionnement de la structure de l'entrepôt.

2.1 L'action thermique sur les éléments de la structure

La cible est ici un élément de structure dont on cherche à évaluer les conditions de stabilité. L'action thermique est définie par le flux net absorbé par la cible. Ce flux est la différence entre le flux absorbé et le flux émis par la cible.

Selon la configuration du scénario de feu considéré, une ou plusieurs sources d'agression thermique peuvent être prises en compte :

- 1 - la cible est placée dans un gaz chaud (flamme ou panache) ou
- 2 - la cible, placée dans l'air à température normale, se trouve exposée à un rayonnement thermique (venant de la flamme, de la couche chaude) ou
- 3 - la cible, placée dans la zone chaude haute, se trouve exposée au rayonnement thermique de cette zone et à celui de la flamme.

Les deux figures suivantes illustrent quelques configurations d'actions thermiques sur des cibles. Depuis l'allumage du premier foyer et pendant la phase d'extension et de développement du feu, selon le foyer la cible en partie haute peut être chauffée par la flamme (figure 5a) ou par les gaz chauds du panache thermique (figure 5b). Plus loin du foyer, une cible ne « voit » pas le foyer et est chauffée par les gaz chauds accumulés sous le plafond (figure 6).

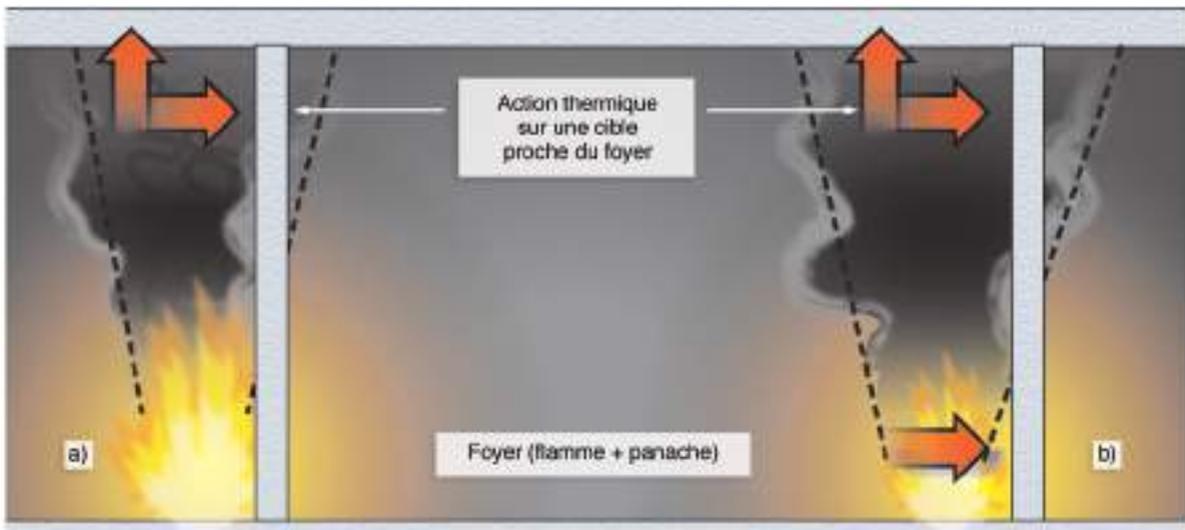


Figure 5a: la flamme atteint le plafond. La poutre et le poteau sont chauffés par la flamme.

5b: la hauteur de flamme est inférieure à la hauteur sous plafond. La poutre est chauffée par le panache thermique de flamme et une partie basse du poteau est chauffée par la flamme.

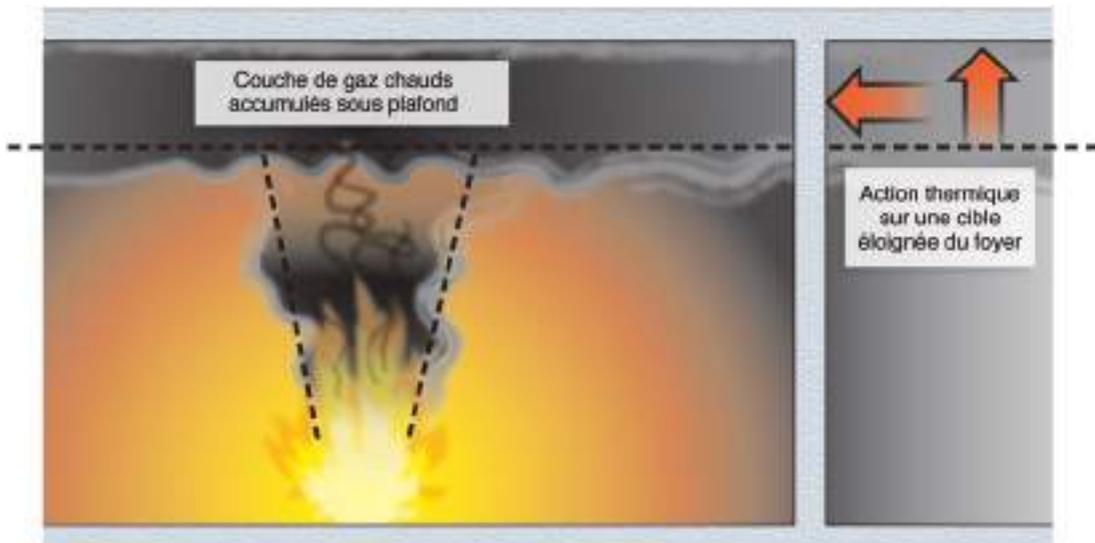


Figure 6: les poutres et les parties hautes des poteaux sont chauffés par les gaz chauds accumulés sous le plafond. Ces cibles ne « voient » pas les flammes du foyer, elles ne sont donc pas soumises à leur rayonnement direct.

■ 2.1.1 - La cible est plongée dans la zone de flamme ou de panache

Un départ de feu au pied d'un poteau correspond à cette situation. En effet, tant que le combustible n'est pas épuisé, la partie basse du poteau sera chauffée directement par les flammes et gaz chauds du foyer. La poutre située au-dessus de l'axe vertical du foyer sera également chauffée par les flammes du foyer et/ou son panache thermique selon que la base du foyer est plus ou moins proche de la couverture. Un départ de feu au voisinage d'un élément de compartimentage correspond également à cette situation.

La durée de l'action thermique localisée est déterminée si l'on connaît la vitesse de perte de masse des objets combustibles en feu. Mais on ne la connaît pas avec précision. Le § 2.2.1 fournit quelques raisons à ce manque de connaissances. On peut seulement dire, en s'appuyant sur des essais réels réalisés en entrepôts pour différents modes de stockage, que la combustion est rapide et intense mais que la durée de cette phase n'est que de quelques dizaines de minutes. Ensuite, l'action thermique locale décline avec l'épuisement du combustible et cède la place à une sollicitation thermique due aux gaz chauds accumulés sous le plafond (voir § 2.1.2)

Cette situation de feu localisé, caractérisée par une action thermique à cinématique rapide et intense mais de courte durée devant celle d'un feu d'entrepôt qui peut dépasser plusieurs heures, fait l'objet d'un scénario de feu (§ 2.3.1).

Pour les calculs : on admet dans ce cas que l'agression thermique est due à la température sur l'axe du foyer. Celle-ci est maximale dans la section de cet écoulement à une hauteur donnée. On peut négliger la contribution d'autres sources d'agression par rayonnement car les gaz chauds absorbent généralement la quasi-totalité du rayonnement thermique incident.

La température sur l'axe du panache à différente hauteur est calculée à partir de formules de corrélations et d'une valeur maximale.

Le flux de chaleur net absorbé¹ peut être calculé à partir d'une expression semblable à celle de l'EC 1991-1-2, chapitre 3.1. les valeurs des coefficients d'échanges peuvent reprendre ceux correspondant au feu conventionnel ISO R834, au feu naturel ou bien encore d'autres valeurs qu'il conviendra alors de justifier au regard du problème traité.

Remarque : pour les calculs d'échauffement des éléments de la structure on peut admettre que la température des gaz chauds suit l'évolution temporelle de l'activité du foyer. Ainsi, si la phase de croissance du feu est de 5 minutes, la température augmentera en 5 minutes pour atteindre la valeur maximale fournie par la formule utilisée.

1 Voir glossaire.

■ 2.1.2 - *La cible est plongée dans les gaz chauds accumulés sous le plafond (couche chaude)*

Les poutres et les poteaux (la partie haute seulement) situés loin du foyer sont soumis à ce type d'action thermique. La poutre au-dessus du premier foyer comme la partie supérieure poteau, après avoir été chauffées par les flammes et/ou le panache thermique et après épuisement du combustible sont ensuite soumis à ce type d'action thermique. Les éléments de compartimentage sont aussi concernés.

Un débit de gaz chauds et de fumées résultant de l'activité du premier foyer, puis de son extension à d'autres objets combustibles, provoque la création puis le remplissage d'une couche de fumée s'étalant sous le plafond. Le temps s'écoulant, l'épaississement de la couche de fumée conduit à une sollicitation thermique du plafond pour laquelle la contribution de la couche de fumée augmente et celle de la flamme et de son panache diminue. Ce phénomène s'accroît à mesure que l'épaisseur de couche de fumée augmente. Après quelques minutes, la sollicitation thermique de cibles placées en plafond est exclusivement due aux gaz chauds à son contact.

Ce type d'action thermique correspond à une phase d'extension du feu (pré-inflammation généralisée). Durant cette phase, dont la durée est supérieure à celle de la phase de démarrage (voir § 2.3.1 et § 2.1.1) le feu se développe, la température des gaz chauds sous plafond, à l'intérieur du canton, de la cellule augmente sans toutefois dépasser un niveau critique correspondant à l'inflammation généralisée.

Cette phase d'extension du feu peut faire l'objet d'un ou plusieurs scénarios de feu (§ 2.3.2 à 2.3.4).

Pour les calculs : si la cible est dans une zone haute chaude, on suppose qu'elle est soumise à l'influence de la température de la zone haute. On peut négliger la contribution radiative de la flamme. Cette hypothèse est acceptable pour une cible loin du foyer ou si le milieu gazeux absorbe de façon notable le rayonnement thermique, ce qui est généralement le cas pour les feux concernant les matériaux combustibles rencontrés en entrepôt.

Le flux de chaleur net absorbé peut être calculé à partir d'une expression semblable à celle de l'EC 1991-1-2, chapitre 3.1. Les valeurs des coefficients d'échanges peuvent reprendre ceux correspondant au feu conventionnel ISO R834, au feu naturel ou bien encore d'autres valeurs qu'il conviendra alors de justifier au regard du problème traité.

■ **2.1.3 - La cible est plongée dans l'air à température ambiante et reçoit une agression thermique radiative**

Tous les éléments de la structure et de compartimentage qui ne sont pas dans les flammes et le panache du foyer ni dans les gaz chauds sous plafond sont concernés par ce type d'action thermique.

La cible reçoit un rayonnement thermique provenant de deux sources :

- les flammes du foyer ;
- la couche de gaz chauds accumulés sous le plafond.

Ces deux contributions sont additionnées. L'action thermique résultante est l'éclairement² énergétique. Pour calculer le flux de chaleur net absorbé (l'action thermique) il faut au préalable calculer la valeur de l'éclairement (flux thermique incident) et par conséquent caractériser le flux de chaleur émis en direction de la cible. Le chapitre 2.2.3 explique la manière de calculer l'éclairement sur une cible.

2.2 - Généralités sur l'élaboration des scénarios de feu

Ce chapitre décrit les principaux phénomènes physiques mis en jeu lors d'un feu et propose des simplifications nécessaires à une application pratique de ces phénomènes au calcul de l'action thermique dans le cadre d'une étude spécifique d'ingénierie prévue au 6^e alinéa de l'arrêté du 5 août 2002.

2.2.1 - Activité des foyers et débit calorifique

On observe deux phénomènes dans la croissance de l'activité d'un foyer non soumis à une influence externe: la « montée en régime thermique » de la source de gaz combustibles et « l'extension de la surface active ». Ils sont caractérisés par le débit de gaz combustible quittant l'interface du solide et le débit de chaleur associé à la combustion de ces gaz.

On distingue une phase de croissance, une phase de puissance maximale et une phase de déclin. Pendant la phase de croissance la surface en pyrolyse active s'étend. La vitesse d'extension varie selon la nature du matériau, l'orientation de la surface ainsi que des conditions de sollicitation thermique. Par exemple, si un solide a été globalement chauffé, c'est toute la surface exposée à l'air qui peut

2 Voir glossaire.

quasi instantanément s'allumer. La puissance maximale est atteinte en fin de la phase d'extension. Elle se maintient à ce niveau pendant le temps nécessaire à la consommation de l'épaisseur du solide. L'activité du foyer décline ensuite.

La diversité des matériaux combustibles, le mode d'entreposage rendent difficiles une prédiction fine de l'évolution du débit calorifique³. Dans le cadre d'une étude spécifique d'ingénierie, où l'accent est mis sur des feux sévères, il est envisageable de représenter de façon simplifiée l'activité du foyer par une valeur du débit calorifique par unité de surface impliquée par le feu. Le choix de cette valeur dépend principalement de la nature des objets combustibles entreposés.

Dans la réalité d'un feu, la puissance dégagée par la combustion de matières combustibles varie aussi selon l'état des stockages (divisé ou pas), du mode de stockage (racks, masse)... De plus, à partir d'un stade de développement, la ventilation de l'entrepôt limite le débit calorifique dégagé dont la valeur maximale dépend moins du matériau que de la dimension des ouvertures. Dans ces conditions, pour des feux sévères, le constat précédent réduit la sensibilité du résultat à la valeur du débit calorifique surfacique.

Remarque : pour les calculs, l'évolution temporelle du débit calorifique est représentée par une courbe simplifiée. Par exemple, la phase de croissance et la phase de déclin peuvent être représentées par des lois linéaires. La phase de plein développement est quant à elle représentée par un plateau à puissance constante.

■ 2.2.2 - Rôle des ouvertures et contrôle par la ventilation

Au tout début de l'activité d'un feu accidentel, l'oxygène présent dans l'entrepôt alimente le foyer. Puis, l'oxygène est amené par les ouvertures de la cellule. Si le flux d'oxygène est suffisant, le développement du feu est piloté par la vitesse de dégradation des matériaux combustibles (débit de pyrolyse). Si ce flux est insuffisant, la combustion est incomplète et la puissance libérée croît plus lentement. Le développement du feu est alors piloté par le flux d'air entrant dans la cellule. Ce régime de fonctionnement du feu est appelé « contrôle par la ventilation⁴ ». Dans ce cas, pour une cellule ouverte sur l'extérieur par des ouvertures verticales (les portes), le débit calorifique s'exprime à partir des dimensions des ouvertures et du débit d'air entrant.

Ainsi, pour qu'un feu sévère (plusieurs dizaines de MW) puisse se développer il est nécessaire que l'une des portes d'accès aux quais soit ouverte. En effet, si une cellule est fermée, le volume d'air disponible permet seulement la combustion de quelques tonnes de matériau combustible, soit une très faible partie de la quantité totale. Dans ce cas, le feu ne peut pas atteindre une puissance importante sans ouvertures supplémentaires.

3 Voir glossaire.

4 Voir glossaire.

■ 2.2.3 - Rayonnement thermique direct des flammes

Pour pouvoir calculer l'éclairement reçu sur une cible il est nécessaire de représenter géométriquement les flammes. Trois modèles de complexité croissante sont proposés. Ils sont utilisables tous les trois. La géométrie de la flamme, la distance de la cible à la flamme, les dimensions de la cible relativement à la flamme guident au choix du modèle de représentation géométrique à utiliser.

Le modèle simple de source ponctuelle peut être utilisé pour des cibles placées à des distances nettement plus grandes que la largeur de la source et situées à des hauteurs du même ordre de grandeur que celle de la source. Il est plutôt utilisable pour des flammes et des cibles situées à l'extérieur de l'entrepôt (calcul de l'éclairement en limite de propriété par exemple).

Le modèle de mur de flamme peut par exemple être utilisé pour représenter le rayonnement d'un feu d'objets disposés en rack.

Le modèle de flamme cylindrique sera quant à lui plus approprié pour un foyer dont la largeur et la longueur sont du même ordre de grandeur de façon à pouvoir assimiler la surface du foyer à un cylindre horizontal. Ce pourrait par exemple être le cas pour un feu de stockage en palettes.

L'expression de l'éclairement sur une cible peut s'écrire: $E_{cl} = FE_f$ en W/m^2 où F est le facteur de forme sans dimension et E_f l'émittance de l'émetteur de rayonnement en W/m^2 . L'expression de F diffère selon le modèle géométrique de la flamme retenu.

Source ponctuelle: la source de rayonnement est assimilée à un point dont on n'a pas alors à connaître les dimensions réelles pour estimer l'éclairement sur une cible: la distance (d) est le seul paramètre entrant dans le calcul du facteur de forme.

La source est notée Z , la cible, élément de surface, est notée $d1$. $F_{d1-Z} = \frac{1}{d^2}$

Mur de flamme: l'émetteur de rayonnement est un rectangle vertical représentant la flamme. Chaque « cible » est un autre rectangle, de petites dimensions, parallèle au premier, représentant un petit élément de surface de la cible.

La distance entre le mur de flamme et une cible tient compte de la position de celle-ci, à la fois dans le plan et en hauteur.

Pour calculer l'éclairement, il faut connaître les éléments suivants.

- La surface rayonnante. Pour cela, on assimile la flamme à un rectangle dont on détermine la largeur et sa hauteur. Cette dernière correspond à une estimation de la hauteur moyenne de la flamme qui est en réalité de forme accidentée, avec des « creux » et des « bosses » instationnaires. Cet aspect complexe rend difficile

l'évaluation de la hauteur moyenne de flamme, qui peut néanmoins être estimée en utilisant des formules de corrélation appropriées.

- La distance entre mur de flamme et cibles. On peut admettre que le bord de la flamme coïncide avec le bord du foyer.
- L'émittance moyenne du mur de flamme. Elle peut être estimée à partir de la température de la flamme si celle-ci est connue, à partir d'une hypothèse de fraction rayonnée de la puissance calorifique.
- Le facteur de forme. La cible est un élément de surface plane ; la source un rectangle parallèle au plan de la cible. La normale à l'élément, normale aussi au rectangle, passe par un sommet de ce rectangle (dont les côtés sont a et b). La cible est à la distance d du rectangle (figure suivante). La source est notée 2, la cible, élément de surface, est notée d1.

$$\text{Avec: } X = \frac{a}{d} \quad \text{et} \quad Y = \frac{b}{d}$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right]$$

Flamme cylindrique : l'émetteur est assimilé à un cylindre vertical de base horizontale dont la surface est celle de l'emprise au sol du foyer.

Pour calculer l'éclairement, il faut connaître les éléments suivants.

- Le rayon du cylindre est déduit de la surface du foyer.
- La hauteur du cylindre émetteur. Elle peut être fournie à l'aide de formules de corrélations donnant la hauteur moyenne de flammes de diffusion.
- La distance entre cylindre et cibles. On peut admettre que le bord de la flamme coïncide avec le bord du foyer.
- L'émittance de la flamme. Elle peut être estimée à partir de la température de la flamme si celle-ci est connue, à partir d'une hypothèse de fraction rayonnée de la puissance calorifique ou bien encore à partir de formules de corrélations donnant la température sur l'axe vertical d'une flamme de diffusion.
- Le facteur de forme – la cible : une surface plane élémentaire dont la normale est perpendiculaire à l'axe d'un cylindre source. Le cylindre, de rayon r , est de longueur finie l ; une de ses bases est dans le plan contenant la normale à l'élément de surface. La distance entre le cylindre et la cible est d .

La source est notée 2, la cible d1.

$$\text{Avec: } L = \frac{l}{r} \quad \text{et} \quad H = \frac{h}{r}$$

$$X = (1 + H)^2 + L^2$$

$$Y = (1 - H)^2 + L^2$$

$$F_{d1-2} = \frac{1}{\pi H} \tan^{-1} \left(\frac{L}{H^2 - 1} \right) + \frac{L}{\pi} \left[\frac{X - 2H}{H\sqrt{XY}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} \right) - \frac{1}{H} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(H-1)}{(H+1)}} \right) \right]$$

Une solution plus fine peut consister à découper le cylindre en sources élémentaires constituées par des tranches horizontales d'épaisseur constante. À chaque

tranche sont associées une température, une émissivité (ces deux termes fournissent l'émittance de la tranche), une position en hauteur et dans le plan horizontal et une épaisseur. La température retenue peut être fournie par une formule de corrélation donnant la température sur l'axe de la flamme. La hauteur de la flamme peut également être fournie par une formule de corrélation.

2.3 - Choix de scénarios

Le scénario feu est choisi au regard de la problématique, ici la stabilité. Il est aussi choisi au regard d'une cible, ici un élément de structure dont on souhaite évaluer les conditions de stabilité. La cible peut être proche ou plus éloignée du foyer. Nous verrons, au chapitre suivant, comment estimer l'action thermique selon sa position relativement aux sources d'agression dues aux feux. La nature, l'amplitude et l'intensité de ces sources varient au cours du temps, au cours du développement du feu, depuis le premier allumage jusqu'à l'extinction du feu par les secours, ou par épuisement du combustible.

Le choix du scénario peut ainsi dépendre également du temps où plus précisément de la phase de développement du feu. Cinq phases sont considérées ici. Rappelons que les différentes phases décrites ci-dessous admettent l'intégrité de l'enveloppe de la structure. Cette hypothèse est fondée au début du feu. À mesure qu'il s'étend, il conviendra de confirmer cette hypothèse avant de retenir la phase de l'incendie.

■ 2.3.1 - Phase de démarrage

On admet par exemple l'allumage accidentel d'un premier objet entreposé dans les rayonnages au niveau du sol de la zone de stockage. Le volume investi par les flammes dans les rayonnages augmente par l'effet des échanges thermiques convectifs et radiatifs entre les flammes, panaches et écoulements gazeux.

Le volume d'air présent dans la cellule est suffisant pour permettre le développement de ce feu. Il n'est donc pas nécessaire que des portes extérieures ou des exutoires de fumée soient ouverts.

La durée de l'action thermique sur la cible est limitée dans le temps (quelques dizaines de minutes).

Le poteau, la poutre de la structure à l'endroit du départ de feu sont concernés par ce scénario.

■ 2.3.2 - Phase d'extension du feu

La première phase de démarrage est suivie de celle de l'extension du feu aux rayonnages voisins. La chronologie des événements successifs (allumages successifs, effondrement, déversement) devient alors pratiquement impossible à prévoir et à représenter à l'aide d'une approche par le calcul même si on pouvait utiliser un critère de propagation pour un matériau donné, par exemple un critère de température, ce critère n'aurait plus de valeur en cas de chute de produit enflammé des rayonnages. On peut seulement prétendre qu'elle aboutit à un feu impliquant une grande quantité de combustible, libérant ainsi un débit calorifique de plusieurs MW sur une surface de stockage croissante.

L'oxygène présent dans la cellule est susceptible de ne plus être en quantité suffisante pour permettre un développement du feu. Des ouvertures supplémentaires peuvent être nécessaires. Différents états d'ouverture des portes d'accès aux quais et des exutoires de fumées doivent être examinés.

L'ensemble des poutres et la partie haute des poteaux situés loin du foyer sont sollicités par les gaz chauds accumulés sous le plafond. Les parties basses de poteaux situés à proximité du feu peuvent en plus être sollicitées par le rayonnement thermique direct des flammes.

■ 2.3.3 - Phase de feu développé

La surface impliquée par le feu désormais importante (quelques centaines de m²). Le débit calorifique maximal peut approcher la centaine de MW. L'influence de l'état des portes d'accès aux quais et des exutoires de fumées sur les températures atteintes par les gaz doit être examinée. Ici plus encore qu'aux phases précédentes des ouvertures sur l'extérieur sont nécessaires pour atteindre le débit calorifique considéré. La couche de fumée est désormais épaisse. La sollicitation thermique de cibles placées en plafond est exclusivement due aux gaz chauds à son contact. Les poutres, et tout ou partie de la hauteur des poteaux, sont sollicités par les gaz chauds.

■ 2.3.4 - Incendie d'un canton

La surface impliquée par le feu est égale à celle d'un canton. Le débit calorifique maximal dépasse la centaine de MW. À ce niveau de puissance la quantité de combustible présent permet une durée de l'incendie de plusieurs heures. Pour permettre un tel débit calorifique il est nécessaire que toutes les portes d'une cellule soient ouvertes, ainsi que les exutoires de fumées. La surface utile d'exutoires ainsi que l'instant d'ouverture de ces derniers sont les paramètres de ces scénarios. La couche de fumée est désormais épaisse. La sollicitation thermique de cibles placées en plafond est exclusivement due aux gaz chauds à son contact. Les poutres et tout ou partie de la hauteur des poteaux sont sollicités par les gaz chauds.

■ 2.3.5 - Incendie d'une cellule

La surface impliquée par le feu est égale à celle d'une cellule, pouvant atteindre plusieurs milliers de m². Le débit calorifique maximal dépasse plusieurs centaines de MW. Le feu est généralisé et les gaz chauds remplissent tout le volume de la cellule considérée. Tous les éléments de la structure sont sollicités par les gaz chauds. Pour le cas où l'on admet la ruine de la couverture, les gaz chauds accumulés dans la cellule sont rapidement évacués et les éléments de la structure sont alors chauffés par les gaz chauds provenant des flammes des foyers.

2.4 - Le choix des outils de calculs

■ 2.4.1 - Rappel sur les outils de calculs disponibles

Les modèles de feu permettent, à partir des données fournies par l'utilisateur (géométrie du bâtiment, caractéristiques du foyer déclenchant le scénario, caractéristiques des sources potentiellement combustibles à son voisinage, conditions aérodynamiques et thermiques initiales régnant dans le bâtiment, etc.) de calculer au cours du temps les actions thermiques sur des cibles, ici les éléments de structure d'un entrepôt.

Les modèles peuvent être regroupés en 3 grandes familles.

Les modèles locaux (ou de champs) : on écrit localement des équations de bilan et d'échange. Par exemple : les équations aux dérivées partielles de Navier-Stokes (conservation de la quantité de mouvement). On introduit des modèles de turbulence, de combustion, de cinématique chimique, d'échanges de chaleur par rayonnement entre gaz et parois.

Le domaine étudié est découpé en un grand nombre de volumes de contrôle ou « mailles » au niveau desquels les grandeurs sont supposées uniformes. À chaque maille sont attribuées des inconnues représentant les valeurs des grandeurs physiques recherchées. Il s'agit alors de résoudre numériquement, de manière locale et instationnaire, les équations de Navier Stokes traduisant les lois d'échange et de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, des espèces et de l'énergie.

Cependant, la puissance de calcul des ordinateurs ne permet actuellement pas une utilisation pratique de tels outils pour un bâtiment constitué de plusieurs niveaux eux-mêmes constitués de plusieurs locaux.

Il faut de bons algorithmes de résolutions. Quelques programmes de ce type donnent de bons résultats. Le logiciel FDS est aujourd'hui largement utilisé en ingénierie. Il en existe d'autres.

Les modèles globaux (de zones ou de volumes finis) : le volume concerné par les effets du feu est découpé en « grosses » zones où on admet que les caractéristiques sont uniformes (mais variables au cours du temps). Les équations de bilan et d'échange sont « peu » nombreuses et conduisent à des systèmes d'équations différentielles du temps.

L'idée de base d'un découpage en zones d'un espace de bâtiment concerné par un feu vient de l'observation que les gaz chauds issus d'un foyer s'accumulent sous le plafond d'un local en présentant une frontière basse à peu près horizontale avec l'air frais situé au-dessous. Ceci est valable pour des locaux de forme géométrique classique, des parallélépipèdes rectangles ainsi que pour des foyers placés en partie basse du local et assez puissants par rapport aux dimensions du local et en l'absence de « courants d'air » importants.

Des dizaines de modèles de ce type sont plus ou moins opérationnels. Les moyens de calcul et les algorithmes de résolution numérique nécessaires sont plus accessibles. Le CSTB utilise le logiciel CIFI2009 qu'il a développé et qui a fait l'objet de confrontations au niveau international.

Les modèles « simples ». Ce sont :

- soit des formules physiques permettant le calcul approché de l'évolution d'une grandeur (la hauteur de flamme, le débit d'air entraîné par un foyer...), donc des modèles ponctuels ;
- soit des résultats de traitement statistique (corrélations, régression...) de mesures effectuées en situations réalistes, qui sont utilisées de façon prédictive à l'intérieur de certaines limites.

Ils visent plutôt des ordres de grandeurs. Ces modèles conduisent à des calculs rapides. Par exemple, les formules permettant de calculer la hauteur de flamme sont dans la pratique destinées à estimer si la flamme d'un foyer peut « toucher » un élément haut dans un bâtiment (et mettre en danger sa stabilité).

■ 2.4.2 - Choisir un modèle et utiliser un logiciel

Les quelques questions suivantes peuvent aider le praticien de l'ISI à choisir le modèle (formule de corrélation, modèle global, modèle de champ) approprié pour répondre à la question posée et le logiciel associé.

- Quels sont les objectifs de sécurité ?
 - protection des personnes ;
 - protection des biens et des structures ;
 - protection de l'environnement.

- Quelles sont les fonctions importantes pour la sécurité qui doivent être maintenues ?
 - la stabilité d'un entrepôt, le compartimentage d'une cellule ou d'un ensemble de cellules ;
 - l'efficacité d'un dispositif de désenfumage naturel ou mécanique ;
 - le fonctionnement d'un équipement sensible à la sécurité (réseau d'alimentation en eau d'extinction).
- Quels sont les phénomènes physiques qu'il conviendra de représenter ?
 - allumage du premier foyer et développement de son activité ;
 - extension du feu aux objets combustibles voisins ;
 - tous les objets présents participent à la combustion ;
 - action thermique sur un dispositif de détection, une tête d'arrosage, un exutoire de fumée ;
 - action thermique sur un élément de structure ;
 - interaction eau/foyer ;
 - sollicitation thermique des ouvertures vers l'extérieur (bris de vitrage), à l'intérieur du bâtiment (portes, par exemple) ;
 - pression à l'intérieur du local.
- À quel stade de développement du feu s'intéresse-t-on ?
 - à l'allumage ;
 - pendant la phase de croissance du feu (pré-inflammation généralisée) ;
 - au stade d'un feu généralisé (post-inflammation généralisée).
- Quelles sont les cibles ?
 - personnes, secours ;
 - objets combustibles, équipements ;
 - structure ;
 - environnement.
- Où se situe la cible relativement à la source d'agression ?
 - dans ou hors du local source du feu,
 - dans les flammes ou le panache thermique du foyer,
 - dans un écoulement de gaz chauds sous plafond ou dans une couche de gaz chauds accumulés sous le plafond,
 - à proximité d'une paroi.

3. Analyse du bâtiment

3.1 - Analyse préliminaire

Pour permettre l'étude de l'impact des incendies sur les cibles (éléments de structure) et satisfaire les critères de sécurité réglementaires, il est nécessaire d'analyser le plan de l'entrepôt en gardant à l'esprit la physique des phénomènes, décrite dans la partie précédente.

Une première étape consiste à identifier les barrières physiques à l'extension du feu pour ainsi que les zones de stockage afin de déterminer les surfaces maximales pouvant être en feu simultanément. Par exemple, on identifiera les murs coupe-feu qui séparent les différentes cellules. La position des écrans de cantonnement est également une donnée importante. Enfin, il convient d'identifier précisément les ouvertures vers l'extérieur :

- type : portes, puits de lumière, exutoires de fumée, fenêtres ;
- mode d'ouverture : automatique, manuelle, fonte du vitrage ;
- déclenchement de l'ouverture : seuil de température, alarme, etc.

Cette analyse des ouvertures impacte les conditions de désenfumage et de ventilation de l'incendie.

Enfin, le type et la position des zones de stockage sont aussi des données importantes du problème. Elles varient selon le type de produits stockés.

Concernant les éléments de structure, il s'agit d'abord de recenser les cibles de l'incendie et de déterminer ensuite quels sont les critères de sécurité à vérifier pour chaque cible afin d'atteindre les objectifs de sécurité de la structure globale.

Les structures visées dans le cadre de ce guide sont constituées de portiques en béton armé ou précontraint. Ces portiques sont reliés par des poutres principales perpendiculaires qui supportent directement les pannes. Les pannes supportent des éléments de couverture. Les portiques comprennent des poteaux en béton armé ou précontraint et des poutres en béton armé ou précontraint, liés ensemble. Tous les éléments de structure constituent les cibles potentielles, dont le comportement doit être étudié.

Les types de poteaux les plus fréquents ont des sections de forme carrée ou rectangle, avec ou sans feuillure ou engravure.

Les poutres des portiques et les autres poutres principales peuvent être à section constante ou variable, en forme de I, de T ou encore de section rectangulaire.

Les pannes ont souvent une section constante avec ou sans blochet et de forme rectangulaire, en T ou en U inversé.

La couverture est généralement constituée de panneaux en béton, en béton cellulaire, des bacs métalliques à isolation inversée ou d'éléments de type sandwich. Les façades peuvent être réalisées à l'aide de bardage (béton, ou autre) ou de panneaux de grande dimension fixés aux poteaux. Elles peuvent également être constituées de remplissage en maçonnerie. Plus rarement, on trouve des voiles béton coulés en place. En fonction de leurs conditions de fixation sur la structure porteuse, ces éléments peuvent également constituer une part des charges à prendre en compte pour l'étude de la structure.

La structure des murs coupe-feu doit également être bien identifiée. En particulier, il s'agit de déterminer si cette structure est indépendante de la structure porteuse de l'entrepôt ou si elle y est intégrée (cas courant). Dans ce dernier cas, les poteaux situés au niveau du mur supportent les éléments constituant le mur : panneaux de béton cellulaire, maçonnerie, voile en béton armé. La condition de dépassement en toiture est parfois réalisée par une poutre de couronnement dont la section a une forme en T inversé.

3.2 - Conditions d'expositions des cibles

Une fois les scénarios d'incendie retenus et les cibles identifiées, il faut déterminer les conditions d'exposition des cibles. Deux échelles sont à différencier.

- Pour les analyses élément par élément : il est nécessaire de savoir comment est répartie l'action thermique sur le pourtour de la section et selon la longueur de l'élément.
- Pour les analyses globales : s'ajoute aux facteurs précédents la possibilité d'avoir simultanément différentes actions thermiques en fonction de la position des cibles.

Pour illustrer cette répartition spatiale des actions thermiques, on prend l'exemple d'un feu se déclarant au centre d'une cellule, autour d'un poteau. Ce cas est illustré sur la figure 7.

Le poteau central est soumis à l'action thermique relative à une cible située dans le panache. La section est exposée sur ses 4 côtés.

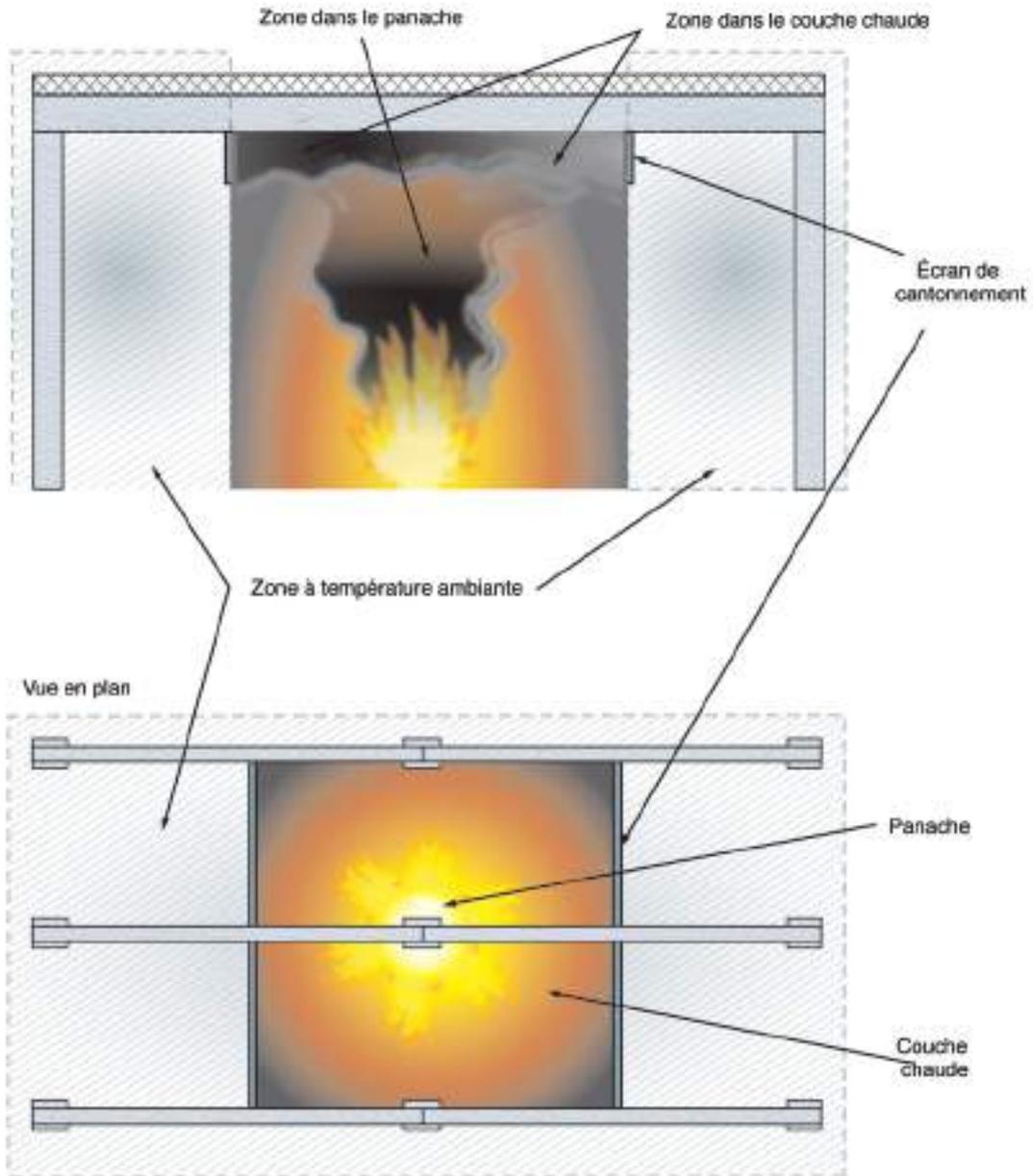


Figure 7 : variation des actions thermiques dans l'espace

Les sections de poutres sont exposées sur 3 côtés si on considère que la couverture repose directement sur leur semelle supérieure. Selon leur longueur, 3 actions thermiques interviennent simultanément dans la cellule :

- celle relative à une cible située au droit du panache à proximité du poteau central
- celle relative à la zone de couche chaude à l'intérieur du canton
- le reste est à température ambiante, tant que le cantonnement est efficace.

3.3 - Détails constructifs (liaisons, façades)

Lorsqu'on considère le comportement global de la structure en situation d'incendie, pour déterminer la cinématique de ruine en particulier, il est nécessaire de bien connaître le comportement des liaisons entre éléments de structure et celle des éléments secondaires sur la structure. En effet :

- Les liaisons entre poutres et poteaux déterminent la validité des modèles structuraux. Si la liaison est rompue, le modèle portique n'est plus valide. Les types de liaison courants entre éléments principaux de structure sont des clavetages béton, des broches ou des appuis simples (non liés). Pendant l'incendie, les liaisons peuvent être soumises à des efforts très importants induits en particulier par les déformations relatives des éléments de structure.
- Les liaisons entre éléments de mur ou de bardage et les poteaux ou la fixation des équipements et structures secondaires comme les auvents impactent les charges reprises par la structure. En particulier, les auvents haubanés peuvent induire des moments de flexions importants dans les poteaux de façade.

4. Comportement au feu : calcul de l'échauffement et réponse de la structure

4.1 - Échauffement des éléments

Un élément de structure peut être soumis à une action thermique uniforme ou non. Pour les éléments linéaires (poutres, poteaux), les conditions aux limites peuvent être :

- une température des gaz uniforme sur le périmètre, pour une section donnée, par exemple un poteau entouré par les flammes ;
- une température des gaz non uniforme sur le périmètre, pour une section donnée, par exemple un poteau exposé à un rayonnement sur une face ;
- une température des gaz non uniforme selon la direction longitudinale, par exemple une poutre située au droit du foyer.

Pour les actions thermiques conventionnelles et l'action thermique correspondant à un feu généralisé, la courbe de température des gaz est uniforme dans l'espace, pour tous les éléments d'une structure.

L'échauffement de la section est obtenu en résolvant l'équation de la chaleur sur une section de l'élément. On considère généralement que la conduction dans le sens longitudinal peut être négligée et qu'un calcul 2D des champs de température dans une section est satisfaisant.

On tient compte des transferts thermiques entre l'élément et son milieu gazeux par radiation et par convection.

Le flux de chaleur entrant dans l'élément est la somme d'une composante convective et d'une composante radiative :

- densité du flux entrant par convection : $\varphi_c = h (T_g - T_s) \text{ (W/m}^2\text{)}$,
- densité du flux entrant par rayonnement : $\varphi_r = \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4) \text{ (W/m}^2\text{)}$.

où : σ : est la constante de Stefan-Boltzmann,
 T_s : température de la surface de l'élément chauffé,
 ε : coefficient d'émissivité résultant.

On peut aussi représenter l'action thermique par une température équivalente qui permet de ne pas avoir à expliciter le terme de radiation, puisque la contribution de ce type de transfert thermique est déjà intégrée à la définition de la

température équivalente. La condition aux limites sur les faces exposées est donc soit exprimée en termes de flux incident, soit en termes de température des gaz environnants.

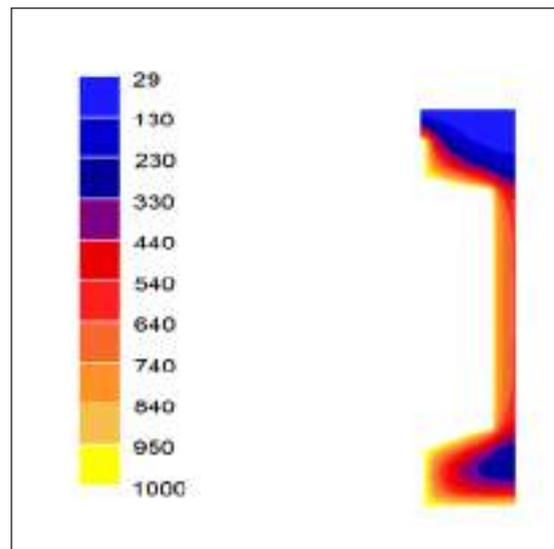
Lorsque les champs de température sont calculés pour une section, les données suivantes sont retenues pour les éléments en béton, conformément à l'Eurocode 1 partie 1-2 et à l'Eurocode 2 partie 1-2 AN.

- Pour l'action normalisée ISO R834, les coefficients d'échanges des transferts convectif et radiatif sont (NF EN 1991-1-2AN) :
 - surface exposée au feu : $h = 25$ (W/m² K) et $\varepsilon = 0,7$
 - surface non exposée au feu : $h = 9$ (W/m² K).
- Pour les actions thermiques de type feu naturel, les coefficients d'échanges des transferts convectif et radiatif sont (NF EN 1991-1-2AN) :
 - surface exposée au feu : $h = 35$ (W/m² K) et $\varepsilon = 0,7$
 - surface non exposée au feu : $h = 9$ (W/m² K).
- La conductivité thermique du béton : $\lambda_c(\theta)$ (NF EN 1992-1-2AN, § 3.3.3)
- La chaleur spécifique du béton : $c_p(\theta)$ (NF EN 1992-1-2, § 3.3.2)
- La masse volumique du béton : $\rho(\theta)$ (NF EN 1992-1-2, § 3.3.2)
- La conductivité thermique de l'acier : $\lambda_s(\theta)$ (NF EN 1993-1-2AN, § 3.3.3)
- La chaleur spécifique de l'acier : $c_p(\theta)$ (NF EN 1993-1-2, § 3.3.2)

À défaut de renseignements précis et fiables sur le type de béton et sa teneur en eau, on retiendra un béton de type siliceux avec une teneur en eau de 1,5 %.

Un exemple de champ de température dans une section de poutre I est présenté sur la figure 8.

Figure 8 : champ de température dans une section de poutre en I pour l'action thermique conventionnelle, à 2 h.



Lorsque les actions thermiques sont décrites par la courbe normalisée, il est possible de faire appel à des distributions de température simplifiées telles que celles données dans l'annexe A de l'Eurocode 2 partie 1-2, sous réserve de vérifier le domaine d'emploi de ces isothermes.

4.2 - Réponse de la structure soumise à une action thermique

Le calcul de la réponse de la structure à l'action thermique est nécessaire pour évaluer la stabilité au feu des éléments et pour analyser la cinématique d'effondrement de la structure.

■ 4.2.1 - Propriétés thermo-mécaniques des matériaux

Lorsqu'on ne recourt pas à des valeurs tabulées ou des méthodes simplifiées valables dans le cas de l'action thermique conventionnelle, les calculs avancés doivent prendre en compte l'effet de la température sur les propriétés des matériaux. L'Eurocode 2 partie 1- 2 et son annexe nationale, donnent les valeurs des paramètres du calcul.

- Dilatation thermique du béton : $(\Delta l/l)_c(\theta)$ (NF EN 1992-1-2, § 3.3.1)
- Dilatation thermique des aciers : $(\Delta l/l)_s(\theta)$ pour les aciers passifs et $(\Delta l/l)_p(\theta)$ pour les aciers de précontrainte (NF EN 1992-1-2, § 3.4)
- Résistance à la traction du béton $f_{ck,t}(\theta)$ (NF EN 1992-1-2, § 3.2.2)
- Facteur de réduction de la résistance à la compression du béton $k_c(\theta)$ (NF EN 1992-1-2, § 4.2.4)
- Facteur de réduction de la résistance caractéristique des armatures $k_s(\theta)$ ou $k_p(\theta)$ (NF EN 1992-1-2, § 4.2.4)
- Lois de comportement à chaud de l'acier et du béton : $f_{c,\theta}$, $\varepsilon_{cl,\theta}$, $\varepsilon_{cu,\theta}$ (NF EN 1992-1-2, § 3.2.2)

■ 4.2.2 - Action thermique uniforme : vérification de la stabilité au feu d'un élément

Chaque élément est considéré indépendamment. L'action thermique est uniforme sur la longueur de l'élément. On doit vérifier qu'à un instant donné : $E_{d,t} \leq R_{\theta,t}$

Avec: $E_{d,t}$ les efforts agissants du dimensionnement au temps t
 $R_{\theta,t}$ la résistance de l'élément à l'instant t : moment résistant, effort tranchant, effort normal

La vérification consiste donc à calculer la résistance résiduelle de la section en tenant compte de l'affaiblissement des propriétés mécaniques avec la température, pour le champ de température déterminé par les calculs d'échauffement au temps t .

■ 4.2.3 - Action thermique uniforme : comportement d'ensemble (cinématique de ruine)

Dans le cas d'un feu généralisé à une cellule, l'action thermique peut être uniforme sur tous les éléments de la cellule. On s'intéresse à la cinématique de ruine c'est-à-dire :

- aux déformations d'ensemble de la structure : dilatation, courbure,
- à l'ordre d'apparition des ruines locales,
- à l'entraînement des éléments adjacents dans l'effondrement d'un élément de structure.

Pour ce faire, on a besoin de calculer la réponse à l'aide d'un modèle 2D ou 3D capable de réaliser des calculs en grands déplacements, non linéaires car les propriétés mécaniques des matériaux varient en fonction de la température. Il convient de s'assurer que la résistance des éléments n'est pas dépassée pendant la durée de l'action thermique, en particulier si le modèle ne permet pas de vérifier directement certains critères (rotation limite, résistance au cisaillement).

La figure 9 montre la déformation d'un portique soumis à une action thermique uniforme juste avant l'effondrement total de la structure.

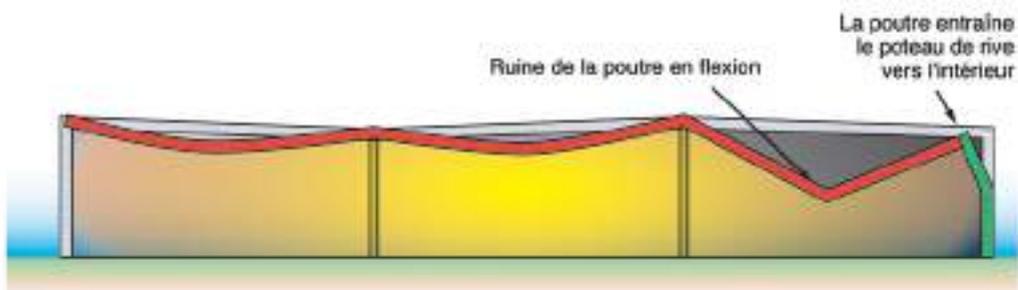


Figure 9 : cinématique de ruine - entraînement du poteau vers l'intérieur lors de la ruine de la poutre

Dans certains cas, sous réserve de bien évaluer l'impact des déformations des éléments adjacents sur le comportement de l'élément étudié, on peut envisager une analyse élément par élément, en déterminant l'ordre d'apparition des ruines locales et en examinant l'effet des effondrements (entraînement).

■ 4.2.4 - *Action thermique non uniforme : comportement d'ensemble (plusieurs courbes température)*

La différence avec le cas précédent est que l'action thermique est décrite par plusieurs courbes de température, qui dépendent de la position de la cible par rapport au foyer.

Les principes de vérification sont les mêmes que dans le § 4.2.3.

■ 4.2.5 - *Compatibilité des déformations*

La compatibilité des déformations entre éléments liés ensemble est un point important. En effet sous l'action de la température et des gradients thermiques, des dilatations et des courbures ont lieu. Lorsque les éléments sont totalement libres de se déformer, il n'y a pas d'impact d'un élément sur l'autre. Dans la pratique, les liaisons entre éléments font intervenir des jeux ou des blocages. Les déformations aux extrémités des éléments sont gênées ce qui entraîne l'apparition de contraintes pouvant être très sévères.

Lorsque les liaisons contiennent des jeux, il est important de vérifier à quel moment les jeux sont comblés pour assurer la validité des modèles retenus. De même, certains éléments secondaires (panneaux, cloisons) peuvent gêner les déformations des éléments principaux. Ces particularités sont à prendre en compte dans l'analyse pour éviter de sous-estimer des effets potentiellement sévères pour le comportement d'ensemble de la structure.

4.3 - Outils de calcul

Les éléments suivants sont à prendre en compte dans le choix de l'outil de calcul.

Calcul de l'échauffement :

- les caractéristiques des matériaux sont non linéaires et dépendent de la température ;
- la température des gaz chauds (ou du flux) dépend du temps.

Calcul de la réponse de la structure :

- les caractéristiques mécaniques des matériaux sont non linéaires et dépendent de la température ;
- les déformations de la structure sous l'effet de l'échauffement (dilatation, courbure) peuvent entraîner des contraintes importantes dans les sections lorsque ces déformations sont gênées (structures hyperstatiques) ;
- les grandes déformations entraînent des distributions de charges variables dans le temps (effet du second ordre, report de charge).

La simulation du comportement au feu d'une structure est un problème thermo-mécanique couplé dépendant du temps. Les calculs avancés au sens de l'Eurocode nécessitent donc de mémoriser à chaque pas de temps les distributions de température dans les sections et de recalculer les caractéristiques mécaniques en chaque point de la section. Les modèles aux éléments finis utilisant des éléments à fibres ou à couches répondent à cette nécessité.

Un point crucial des simulations par les logiciels éléments finis pour les calculs thermo-mécaniques réside dans la capacité à suivre les lois de comportement du béton et des aciers conformes aux prescriptions de l'Eurocode 2 partie 1-2.

5. Annexes

Annexe 1 - Données nécessaires pour réaliser une étude

■ 1.1 - *Données relatives aux bâtiments*

Classement de l'ouvrage (type d'ICPE) Pour les bâtiments existants: âge de construction Nature des parois (façades et toiture) Ouvertures: type, dimension, mode d'ouverture Système de détection et d'alarme Dimensions (plans de recouvrement ou de conception) Disposition et taille des cantonnements Nature, disposition et dimension des murs séparatifs coupe feu.

■ 1.2 - *Stockage*

Type de stockage (racks, vrac...), nature des produits stockés, disposition dans l'espace.

■ 1.3 - *Structure*

Structure

Dimensions, enrobages.

Matériaux

Béton: classe de béton, type de granulats, teneur en eau.

Armatures: type d'armature (passive ou de précontrainte), type d'acier (A, B, C), limite élastique et module d'Young.

Charges

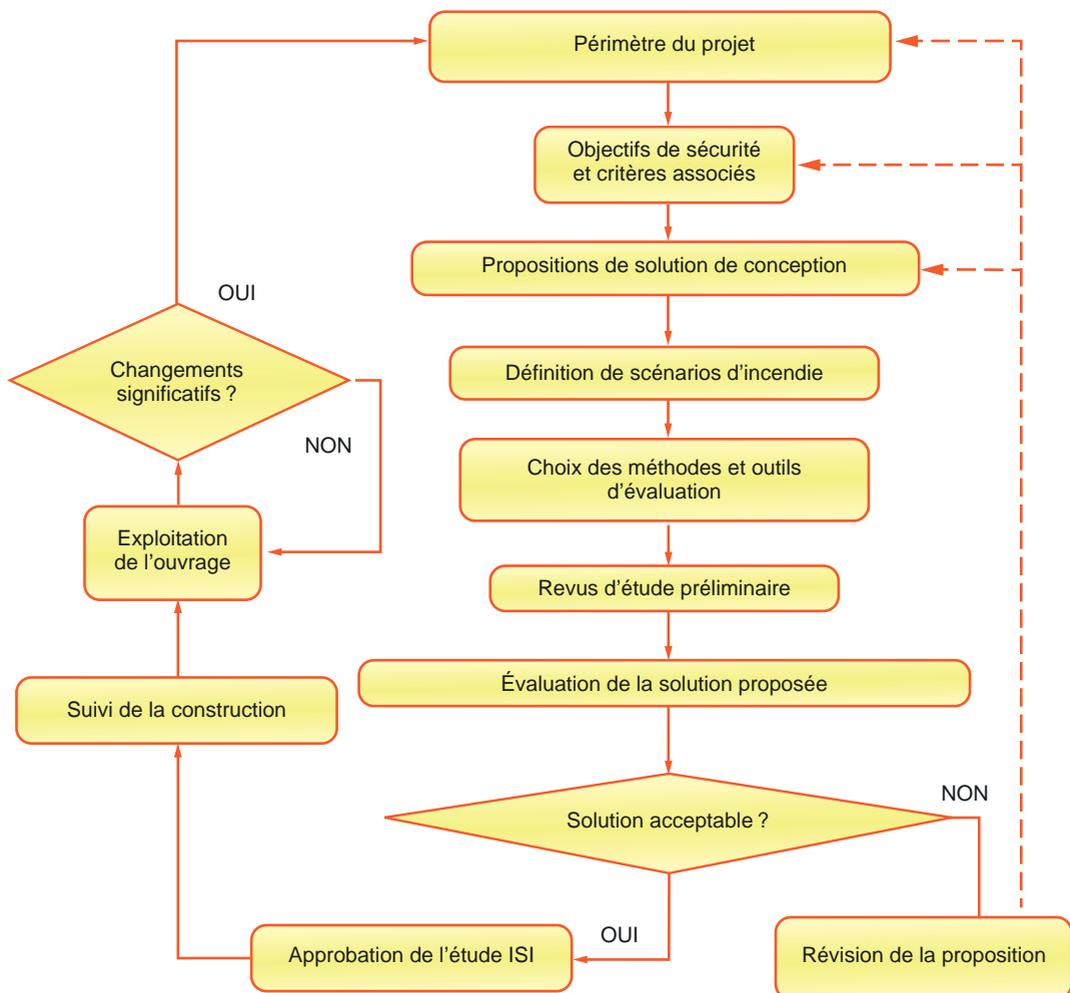
Charges permanentes, charges d'exploitation, équipements (ponts roulants, auvents, etc.)

Détails de mise en œuvre

Nature des liaisons entre éléments de structure, liaisons entre panneaux de façade et structure.

Annexe 2 - Démarche d'une étude

Le logigramme ci-dessous est extrait du document intitulé : *Ingénierie de sécurité incendie - Méthodologie générale pour la conception, la construction et l'exploitation d'ouvrages* et établi dans le cadre du Projet National - Ingénierie de la Sécurité Incendie (PN-ISI).



Annexe 3 - Proposition du contenu minimal d'un rapport d'étude

■ 3.1 - *Objet de l'étude*

Précise le cadre de l'étude et l'objectif recherché. Par exemple, est-ce un entrepôt neuf ou existant, l'étude est-elle faite dans le cadre d'une demande d'autorisation d'exploiter, un renouvellement d'autorisation, dans le cadre d'une démarche volontaire ?

■ 3.2 - *Documents et information de référence*

Faire la liste des documents ayant servi de base à la description de l'entrepôt et à la définition des scénarios.

Ce paragraphe liste les éléments suivants.

- Les documents administratifs : décision de la DRIRE ou mise en demeure de la préfecture, Arrêté de référence.
- Les documents relatifs à la structure : plan, note de calcul : préciser les indices des versions retenues.
- Les documents relatifs au stockage : nature, forme de stockage, contraintes d'exploitation.
- Les documents relatifs à la sécurité incendie : étude de danger, PV d'essais ou de classement, POI.

■ 3.3 - *Description sommaire de l'entrepôt*

Il s'agit d'une brève description des caractéristiques de l'entrepôt accompagnée si nécessaire de schémas. Elle comprend une présentation générale de l'ouvrage, la description du stockage, les détails utiles sur le système de détection et d'alarme, le cantonnement et les ouvertures.

■ 3.4 - *Rappel des objectifs de sécurité et critères associés*

Les objectifs de sécurité peuvent être :

- stabilité « infinie » sous feu naturel ;
- stabilité locale pendant x min ;
- non-effondrement en chaîne ;
- non-effondrement vers l'extérieur ;
- compartimentage ;
- autres objectifs (évacuation par exemple).

À chaque objectif, il convient d'associer le critère retenu pour apprécier le niveau de sécurité :

- résistance des éléments ;
- déformation limite ;
- température maximale ;
- autres critères dont la pertinence sera exposée ici.

■ 3.5 - Scénarios d'incendie pris en compte

Cette partie présente les scénarios possibles et les scénarios retenus pour les calculs. Elle indique également si ces scénarios ont fait ou non l'objet d'une validation par les autorités compétentes.

Certains paramètres fondamentaux des scénarios doivent être explicités : charge incendie, débit de pyrolyse en fonction du temps, conditions de ventilations, éléments de construction concernés...

■ 3.6 - Évolution des actions thermiques

Pour chaque scénario retenu, détermination de l'évolution de l'action thermique flux/température vers les éléments objets de l'étude, en fonction du temps.

- Indication de la (les) méthode(s) (numérique, analytique...) utilisée(s) Illustration : courbes flux (température) – temps pour chaque scénario et localisation prépondérante.
- Commentaire des résultats obtenus.

■ 3.7 - Température des éléments

Pour chaque scénario retenu et à partir de la détermination du flux incident (ou températures au voisinage) sur chaque élément concerné, la température de l'élément est déterminée.

- Indication de la méthode (numérique, analytique..), des données d'entrée (conductivité, chaleur spécifique...) et hypothèses utilisées.
- Illustration (exemples) : courbes température – temps pour chaque scénario et localisation prépondérante, champs de température aux endroits significatifs.
- Commentaire des résultats obtenus.

■ 3.8 - *Comportement mécanique à températures élevée*

Pour chaque scénario retenu et à partir des températures calculées, détermination du comportement mécanique.

- Indication de la méthode (numérique, analytique..), des données d'entrée (loi contrainte-déformation...) des conditions aux limites et hypothèses utilisées.
- Illustration : courbes résistance ou déplacement – temps pour chaque scénario et localisation (élément) prépondérante, analyse des liaisons.
- Commentaire des résultats obtenus : il est important de faire le lien entre le résultat présenté et l'objectif de sécurité visé.

■ 3.9 - *Conclusion*

Comparaison entre objectifs recherchés et résultats obtenus, pour chaque scénario.

■ 3.10 - *Proposition d'un cahier des charges pour les conditions d'exploitation*

Compte tenu des conclusions de l'étude, les conditions d'exploitation à ne pas dépasser, afin d'assurer que les scénarios d'incendie ne seront pas dépassés, sont précisées.

Des dispositions constructives ou des solutions d'amélioration sont éventuellement proposées.

■ 3.11 - *Références*

Il s'agit des documents de référence techniques utilisés pour déterminer les scénarios de feu ainsi que la référence des règles de calculs utilisées pour la vérification de la structure.

Annexe 4 - Exemple de calcul

Voir le chapitre 2 de ce livre.

Annexe 5 - Glossaire

Feu conventionnel

Dans la pratique des essais de résistance au feu des éléments de construction et d'ouvrage, une éprouvette placée dans un four d'essai est soumise à une sollicitation thermique associée à l'évolution de la température des gaz chauds occupants le volume du four définie par l'ISO : $T_g = T_0 + 345 \text{Log}_{10}(8t+1)$ où T_0 est la température ambiante initiale en °C et t le temps en minutes. On parle alors de feu conventionnel. Notons que d'autres courbes température/temps que celle définie ci-dessus sont envisageables.

Feu naturel

L'activité du feu n'est alors plus représentée par une courbe température/temps. L'action thermique qui découle de cette activité dépend des foyers potentiels (nature, géométrie, dimensions et quantité déterminent l'amplitude et la durée de l'apport de chaleur), du local (nature, dimensions et propriétés des parois), de sa ventilation (naturelle : dimensions et position de des ouvertures ; extraction mécanique : débit extrait).

Action thermique

C'est la grandeur physique qu'il faut calculer pour ensuite être exploitée pour le calcul des conditions de stabilité. Il s'agit du flux de chaleur incident sur la surface de l'élément. Il s'exprime en W/m^2 .

Flux de chaleur net absorbé

C'est la grandeur physique qui détermine l'échauffement de l'élément. Il dépend bien sûr de l'action thermique mais aussi de coefficients d'échanges thermiques caractéristiques des gaz chauds et de l'élément. Des valeurs de ces coefficients sont par exemple proposées dans l'Eurocode.

Éclairement (énergétique)

Quand la cible est située hors du foyer et sous la couche de fumée accumulée sous le plafond, elle est alors chauffée uniquement par rayonnement thermique. Le flux de chaleur incident (l'action thermique) sur la cible est alors appelé éclairement. Il s'exprime en W/m^2 .

Débit calorifique

Il caractérise l'activité du foyer, du feu. Il représente la puissance délivrée par le feu. Il s'exprime en Watt. Il varie au cours du temps. Il est généralement représenté par une phase de croissance correspondant au démarrage du feu, suivie d'une phase

de plein développement correspondant à la combustion de tout le combustible présent et enfin d'une phase de déclin correspondant à l'épuisement du combustible.

Contrôle par la pyrolyse ou par la ventilation

Au tout début de l'activité d'un feu accidentel, l'oxygène présent dans l'entrepôt alimente le foyer. Puis, l'oxygène est amené par les ouvertures de la cellule. Si le flux d'oxygène est suffisant, le développement du feu est piloté par la vitesse de dégradation des matériaux combustibles (débit de pyrolyse). Si ce flux est insuffisant, la combustion est incomplète et la puissance libérée croît plus lentement. Le développement du feu est alors piloté par le flux d'air entrant dans la cellule. Ce régime de fonctionnement du feu est appelé « contrôle par la ventilation ».

Scénario (de feu)

La protection contre l'incendie fait appel à des scénarios d'incendies probables, basés sur le retour d'expérience des incendies passés. Pour définir un scénario, il faut décrire le lieu de l'action (volume ou volumes impliqué(s), dimensions, nature des parois, ouvertures, ventilation mécanique ou non...), définir la source d'énergie calorifique initiale et l'environnement combustible et donner des caractéristiques aux « acteurs » potentiels qui « entreront en scène » lorsqu'ils répondront aux sollicitations dont ils seront l'objet (objets et produits combustibles mobiliers ou immobiliers fixés au bâtiment). Le rôle de ces acteurs, qui n'est pas aisément prévisible *a priori*, dépendra de leurs caractéristiques et des conditions auxquelles ils seront soumis. Fixer le scénario nécessite ainsi de définir des conditions initiales et aux limites pour un ensemble de phénomènes qui s'enchaîneront et qu'on a prévu d'observer. L'ensemble de ces choix et la définition des grandeurs à mesurer ou à calculer posent les données du scénario. Le scénario de feu n'est donc pas seulement l'évolution temporelle du débit calorifique.

Structure

Les poutres, les poteaux, les portiques, les systèmes de contreventement, les éléments d'anti-flambement, les murs et panneaux porteurs, les planchers, les poutres supports et tout autre élément (le cas échéant les pannes et lisses) participant à la stabilité de l'ouvrage.

Occupants

Individus présents, même de manière temporaire, dans l'entrepôt au moment de l'occurrence de l'incendie.

Cellule

Partie d'un entrepôt compartimentée. Elle est délimitée par les murs coupe-feu et les façades.

Enveloppe du bâtiment

Façade et toiture non structurale.

Éléments séparatifs

Éléments porteurs ou non porteurs présentant une fonction de compartimentage.



Chapitre

2

Exemple d'application : entrepôt logistique de 29 000 m²

1. Objet

Le but de ce chapitre est d'illustrer les vérifications à faire dans le cadre d'une étude de la stabilité au feu pour un entrepôt. Certains critères relatifs à des zones d'intérêt sont retenus à titre d'illustration.

Dans le cas d'une étude réelle, il serait nécessaire de faire des vérifications dans toutes les zones du bâtiment. Dans cet exemple, on vérifie la stabilité au feu sous action thermique conventionnelle ISO R834, et sous feu naturel. Dans la pratique, il s'agit d'une alternative, il n'est donc généralement pas requis de faire les deux.

2. Documents et information de référence

Les documents suivants servent de référence à l'étude.

- **Plans de structure**

- 0001 E – Poteaux
- 0002 C – Toiture
- 0003 G – Élévation murs coupe-feu
- 0004 E – Élévations coupes
- 0005 C – Panneaux architectoniques
- 2765 0 – Cahier de détail des éléments préfabriqués

- **Autres documents**

S'agissant d'un exemple, les autres documents ne sont pas disponibles.

3. Description sommaire de l'entrepôt

Entrepôt de stockage de 29 000 m², de hauteur 14,5 m sous toiture. L'entrepôt est divisé en 5 cellules de 48 x 120 m. La structure porteuse de l'entrepôt est composée:

- de 6 types poteaux BA préfabriqués
 - section carrée PO5050 simple avec feuillures ou avec engravures (façades);
 - section carrée PO6060 simple ou avec engravures;
 - poteau de façade section rectangle PO3050cm de type baïonnette;
- de 3 types de poutres précontraintes préfabriquées
 - section de type I; IN50 (rives) et IE105;
 - section de type T; PT5550;
- de 4 types de pannes précontraintes préfabriquées
 - sections de type T; PP5230 ou PP6030 ou PT5550;
- de 1 type de poutres préfabriquées sur mur coupe-feu, de section T inversée.

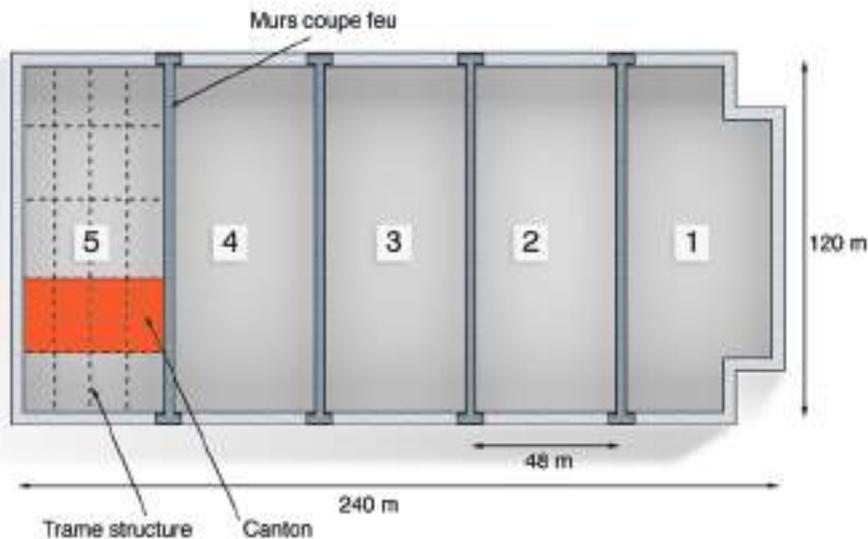


Figure 10: vue simplifiée de l'entrepôt en plan

La toiture est constituée de bacs métalliques à isolation inversée. Elle contient un nombre d'exutoires permettant de respecter le ratio réglementaire: leur surface utile cumulée représente 2 % de la surface de la toiture.

Les façades sont revêtues de panneaux architectoniques en béton armé d'épaisseur 16 cm.

Les murs séparatifs entre cellules sont constitués de panneaux de béton cellulaires de 14 cm d'épaisseur qui sont insérés dans les poteaux rainurés (poteaux en forme de H).

La trame principale des portiques est de 12 x 24 m². Les poutres principales ont une portée de 24 m, les pannes ont une portée de 12 m.

Les cantons ont une taille de 48 x 24 m et sont disposés selon la largeur de la cellule (48 m) entre les poutres secondaires (entraxe 24 m). Ils ont une hauteur de 1,5 m.

4. Rappel des objectifs de sécurité et critères associés

Il s'agit d'un entrepôt de plus de 12,5 m de hauteur. On le suppose équipé d'un système d'extinction automatique. L'article 6 de l'arrêté du 5 août 2002 fixe donc le niveau de sécurité à atteindre pour la structure :

- R60: 1 h de stabilité au feu sous l'action thermique ISO R834 ;
- ou démonter l'absence de ruine en chaîne et de ruine vers l'extérieur.

En outre, l'Article 8 demande que les murs coupe-feu entre cellules soient de degré REI120.

Les critères associés aux objectifs ci-dessus pour apprécier le niveau de sécurité sont les suivants.

- Non-effondrement en chaîne : les poteaux des murs coupe-feu doivent conserver leur résistance au feu pour toute la durée des scénarios étudiés : la résistance à chaud des poteaux doit être supérieure à la charge résultante sous combinaison ELU incendie.
- Non-effondrement vers l'extérieur : la déformation horizontale en tête des poteaux de façade doit être dirigée vers l'intérieur des cellules à la fin des scénarios d'incendie et le poteau doit supporter les déplacements en tête vers l'extérieur sans périr par flambement.
- Évacuation : la durée de stabilité de la structure doit être supérieure à la durée d'évacuation pour tous les scénarios envisagés.
- Compartimentage : les poteaux des murs coupe-feu doivent être stables au feu pendant 2 heures sous feu ISO (R120) et la température moyenne en face non exposée ne doit pas dépasser 140 °C.

5. Scénarios d'incendie pris en compte

Le premier scénario correspond à la situation suivante. Le feu se déclare au pied d'un poteau tout proche des racks de stockage¹. L'extension verticale du feu est rapide (quelques minutes²). Le poteau se trouve sollicité sur toute sa hauteur et la poutre est localement, au droit du foyer, sollicitée selon la même intensité que le poteau³. L'intensité de l'action thermique résultant de ce scénario est caractérisée par la température des flammes et des gaz chauds de combustion. Sa durée dépend de la nature des produits stockés, de leur conditionnement, du taux de remplissage des rayonnages... Elle ne peut donc être connue qu'approximativement. De plus, le feu s'étend et les gaz chauds remplissent le canton et s'accumulent au plafond. L'action thermique initiale, causée par le démarrage du feu cède sa place ensuite à une action thermique caractérisée par la température des gaz chauds sous le plafond. Par ailleurs, durant la même période, le combustible proche du poteau s'épuise et l'action thermique en pied de poteau décline. Dans ces conditions, la durée de l'action thermique, due à la flamme et aux gaz de combustion, sur toute la hauteur du poteau et localement sur la poutre est fixée à 10 minutes. Ensuite, l'action thermique sur la partie haute du poteau et des poutres du canton est due à la température de la couche chaude. C'est le deuxième scénario retenu. Sa durée est difficile à connaître avec précision. Elle correspond à la phase de pré-inflammation généralisée. C'est pendant cette phase que les mesures de mise en sécurité agissent. Activation du désenfumage par ouverture des exutoires par exemple. Nous avons retenu sur cet exemple une durée de 35 minutes. Ensuite le feu est pleinement développé. La température est élevée. C'est le troisième scénario retenu. Cette phase de feu intense et généralisé peut s'étendre sur plusieurs heures. Pour les calculs nous avons limité sa durée à 2 heures⁴.

Il existe de nombreux scénarios de feux possibles. On se préoccupe de feux intenses.

On cherche à étudier un nombre de scénarios limité pour en tirer des enseignements.

1 Pour cet exemple nous avons supposé un mode de stockage en racks.

2 Des essais ont montré que le dernier niveau de rayonnages brûlait en une à deux minutes après l'allumage au pied.

3 Pour cet exemple, nous avons supposé que le dernier niveau de rayonnage était proche de la couverture conduisant ainsi à la présence de flammes et de gaz chauds au contact des poutres. Pour un mode de stockage en tas, il conviendrait de vérifier si la hauteur de la flamme est suffisante pour chauffer la poutre avec la même intensité que le poteau.

4 Si les calculs de stabilité montrent qu'à deux heures le risque de ruine existe, alors la durée doit être augmentée. Il faut garder à l'esprit que les calculs considèrent l'intégrité de l'enveloppe de l'entrepôt. Cette hypothèse peut ne pas être vérifiée quand la température atteint et dépasse une valeur susceptible de causer l'embrasement généralisé des objets stockés, soit, une valeur supérieure à 700 °C.

Aussi, les scénarios présentés ci-dessous ont été choisis de façon à ce que chacun représente des situations de feu ou d'incendie différentes et réalistes. Selon le nombre de portes ouvertes, le nombre d'exutoires ouverts et l'instant d'ouverture de ces derniers, depuis le premier allumage, jusqu'à l'embrasement généralisé de la cellule en passant par un feu occupant tout ou partie d'un canton, 5 situations ont été considérées :

1. feu localisé,
2. feu sévère à l'intérieur d'un canton,
3. feu développé sur $\frac{1}{4}$ de la surface d'un canton,
4. feu développé dans un canton,
5. feu généralisé dans une cellule, lorsque la couverture a disparu.

5.1 - Feu localisé: scénario 0

On admet par exemple l'allumage accidentel d'un premier objet entreposé dans un rayonnage au niveau du sol de la zone de stockage. Le volume investi par les flammes dans les rayonnages augmente par l'effet des échanges thermiques convectifs et radiatifs entre les flammes, panaches, et écoulements gazeux. L'extension verticale du feu est très rapide. On peut considérer un embrasement sur toute la hauteur du rayonnage entre la première et la deuxième minute.

Ventilation du foyer : le volume d'air présent dans la cellule est suffisant pour permettre le développement de ce feu. Il n'est donc pas nécessaire que des portes extérieures soient ouvertes.

Sollicitation thermique sur les cibles : l'application de formules de corrélation permet de calculer la hauteur de la flamme surmontant le dernier de rayonnage. La valeur de la hauteur de la flamme (quelques m) est le plus souvent supérieure à la distance entre le sommet du rayonnage et la toiture.

Si le feu démarre dans un rayonnage à proximité d'un poteau, alors on considérera qu'il est sollicité par la flamme sur toute sa hauteur.

Si le rayonnage est situé à l'aplomb d'une poutre, alors on considérera que la partie de la poutre située au-dessus du rayonnage sera sollicitée par la flamme dans un rayon de 5 m.

Pour les calculs, on a donné à la température moyenne des gaz chauds une valeur maximale majorante de 850 °C.

Les conditions de combustion d'un objet entreposé en rayonnage varient naturellement selon la nature du combustible (bois, carton, plastique), ses dimensions, sa géométrie mais aussi selon les dimensions et la géométrie des objets qui l'entourent. Il est par conséquent bien difficile de connaître avec précision le débit massique de pyrolyse, donnée indispensable permettant d'estimer la durée du feu. On peut seulement admettre que la combustion d'objets entreposés en rayonnage est rapide et intense.

Pour les calculs, la durée de cette phase de feu est estimée à 10 minutes. La température du milieu gazeux atteint la valeur 850 °C après 60 s. La température est maintenue à ce niveau durant 10 minutes.

5.2 - Feu sévère: scénarios 1, 2, 3, 4 et 4-1

La première phase de démarrage (scénario 0) est suivie de celle de l'extension du feu aux rayonnages voisins. La chronologie des événements successifs (allumages successifs, effondrement, déversement) devient alors pratiquement impossible à prévoir et à représenter à l'aide d'une approche par le calcul même si on pouvait utiliser un critère de propagation pour un matériau donné, par exemple un critère de température, ce critère n'aurait plus de valeur en cas de chute de produits enflammés des rayonnages. On peut néanmoins considérer qu'elle aboutit à un feu impliquant une grande quantité de combustible, libérant ainsi un débit calorifique de plusieurs MW sur une surface de stockage croissante.

Pour les calculs, on considère qu'à cinq minutes une surface égale à 30 m² est impliquée par le feu, libérant une puissance maximale de 9 MW (300 kW/m²) pendant 5 minutes. L'examen des conditions de danger sur les cibles portera sur les dix à quinze premières minutes.

Ventilation du foyer : l'oxygène présent dans la cellule n'est plus en quantité suffisante pour permettre un développement du feu. Des ouvertures supplémentaires sont nécessaires. Différents états d'ouverture des portes d'accès aux quais et des exutoires de fumées sont examinés. Ces configurations correspondent aux scénarios 1, 2, 3, 4 et 4-1.

Sollicitation thermique sur les cibles : nous avons vu que durant la phase précédente (scénario 0) la sollicitation thermique de cibles placées en plafond est due à la flamme et à son panache thermique. Un débit de gaz chauds et de fumées en résultant, provoque la création puis le remplissage d'une couche de fumée s'étalant sous le plafond. Le temps s'écoulant, l'épaississement de la couche de fumée conduit à une sollicitation thermique du plafond pour laquelle la contribution de la couche de fumée augmente et celle de la flamme et de son panache diminue. Ce phénomène s'accroît à mesure que l'épaisseur de couche de fumée augmente.

Après quelques minutes, la sollicitation thermique de cibles placées en plafond est exclusivement due aux gaz chauds à son contact.

Le calcul de l'action thermique (température de la couche de gaz chauds) a été effectué ici à l'aide d'un modèle à 2 zones. Il est bien sûr possible d'utiliser un modèle de calcul plus fin de type modèle de champ.

5.3 - Feu développé : scénarios 5, 6, 7 et 8

Ces scénarios considèrent une extension plus rapide du feu que les scénarios précédents. La surface impliquée par le feu est égale au quart de la surface d'un canton, soit 312 m². Le débit calorifique maximal atteint 93 MW en cinq minutes.

Ventilation du foyer : L'influence de l'état des portes d'accès aux quais et des exutoires de fumées sur l'enfumage et les températures atteintes par les gaz est examinée. Ici plus encore qu'aux scénarios précédents des ouvertures sur l'extérieur sont nécessaires pour atteindre le débit calorifique considéré. Ici encore 4 configurations d'état des ouvertures ont été examinées

Sollicitation thermique sur les cibles : La température des gaz chauds dans la cellule a été calculée à l'aide d'un modèle à 2 zones gazeuses.

5.4 - Incendie d'un canton : scénarios 9, 10, 11 et 12

La surface impliquée par le feu est égale à celle d'un canton, soit 1 250 m². Le débit calorifique maximal atteint 375 MW en quinze minutes. À ce niveau de puissance la quantité de combustible présent permet une durée de l'incendie de plusieurs heures.

Ventilation du foyer : Pour permettre un tel débit calorifique il est nécessaire que toutes les portes d'une cellule soient ouvertes, ainsi que les exutoires de fumées. La surface utile d'exutoires ainsi que l'instant d'ouverture de ces derniers sont les paramètres de ces scénarios.

Sollicitation thermique sur les cibles : La température des gaz chauds dans la cellule a été calculée à l'aide d'un modèle à deux zones.

5.5 - Incendie d'une cellule : scénarios 13

Il est admis désormais la ruine partielle de la structure et de l'enveloppe de l'entrepôt. Dans cette situation, sauf à connaître les dimensions et positions des ouvertures créées par le feu, il est difficile de simuler dans le cas général les conditions thermiques dans la cellule. On peut toutefois admettre que les ouvertures seront de dimensions suffisamment importantes pour libérer des gaz chauds accumulés dans l'entrepôt à l'extérieur. Il en résulte que la température dans l'entrepôt ne pourra pas atteindre le même niveau que s'il était resté intègre. La température que nous pourrions alors retenir serait alors plutôt voisine de la température moyenne de flamme.

La cible principale envisagée pour ce feu serait plus spécifiquement le mur d'enceinte de l'entrepôt, c'est-à-dire le bardage et les poteaux. En effet, on peut admettre que l'ouverture créée suppose la ruine des poutres supportant la partie de la couverture ouverte. Dans la mesure où le feu est très sévère et qu'il concerne l'ensemble d'une cellule on peut admettre que la sollicitation sur les cibles est uniforme.

On admettra de façon conservatrice que le feu le plus intense est à proximité de la cible et que sa combustion débute. Ainsi l'action thermique résulte de la situation de feu antérieure à la ruine locale et de la combustion des objets entreposés à proximité de la cible concernée.

La durée de la sollicitation peut être appréhendée de plusieurs façons. Nous proposons de retenir une durée conventionnelle comprise entre 1 h et 2 heures car le calcul d'une durée du feu précise semble hors de portée. En effet, celle-ci dépend de nombreux facteurs qu'il est bien difficile de connaître même au cas par cas. Ces facteurs sont les suivants : histoire de l'action thermique avant la ruine, mode d'entreposage (tas, rack), taux de remplissage, nature des objets combustibles.

Le choix de cette durée s'appuie sur les durées de feu retenues pour les poids lourds (instruction technique tunnel), où le chargement peut être assimilé à un stockage voisin de celui rencontré en entrepôt.

Ventilation du foyer : pour permettre un tel débit calorifique il est nécessaire que toutes les portes d'une cellule soient ouvertes, ainsi que les exutoires de fumées. De plus, les lanterneaux servant à l'éclairage naturel doivent être ruinés. La surface d'ouverture en toiture dépasse alors 200 m².

Sollicitation thermique sur les cibles : pour les calculs, on a donné à la température moyenne des gaz chauds de 900 °C.

Pour les calculs, la durée de cette phase a reçu la valeur 2 heures.

Le tableau ci-dessous regroupe les 5 scénarios de feu considérés associés à 14 configurations. Dans la suite nous noterons le scénario de chaque configuration.

Stade de développement du feu	Cible	N° scénario	Ventilation des foyers
Feu localisé	Structure	0	Le volume d'air de la cellule est suffisant pour assurer la combustion de plusieurs tonnes de matériau combustible
Feu sévère sur une partie d'un canton	Structure	1	1 porte d'accès au quai ouverte
		2	3 portes ouvertes
		3	1 porte ouverte et exutoires cellule ouverts
		4	1 porte ouverte et exutoires cellule ouverts à 3 minutes
		4-1	1 porte ouverte et exutoires canton ouverts à 3 minutes
Feu développé sur ¼ de canton	Structure	5	1 porte d'accès au quai ouverte
		6	3 portes ouvertes
		7	6 portes ouvertes
		8	6 portes ouvertes et exutoires cellule ouverts à 3 minutes
Incendie du canton	Structure	9	9 portes ouvertes
		10	9 portes ouvertes et exutoires cellule ouverts
		11	9 portes ouvertes et exutoires canton ouverts à 3 minutes
		12	9 portes ouvertes et exutoires cellule ouverts à 3 minutes
Incendie de la cellule	Structure	13	Perte de compartimentage en toiture. Ouvertures importantes dans la couverture laissant échapper flammes et gaz chauds vers l'extérieur

Les figures 11 et 12 représentent l'évolution temporelle de la température des gaz autour d'un poteau (scénario 0) ou sollicitant le mur extérieur lorsqu'une ouverture en couverture existe (scénario 13) et du débit calorifique (scénarios 1 à 12).

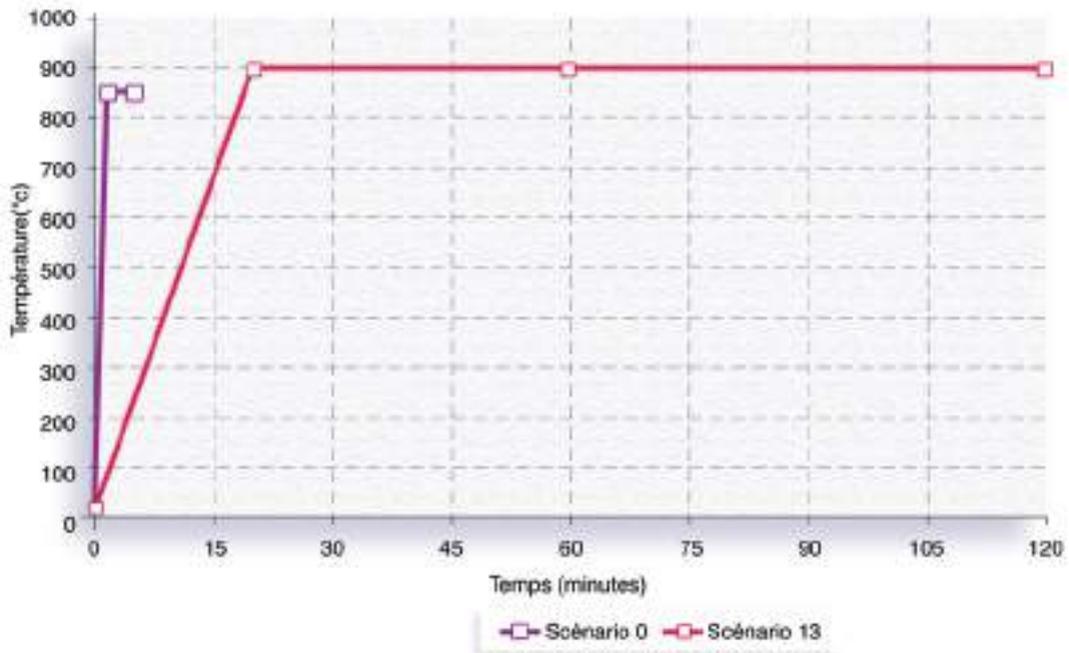


Figure 11 : évolution temporelle de la température des gaz autour d'un poteau (scénario 0) ou sollicitant le mur extérieur lorsqu'une ouverture en couverture existe (scénario 13).

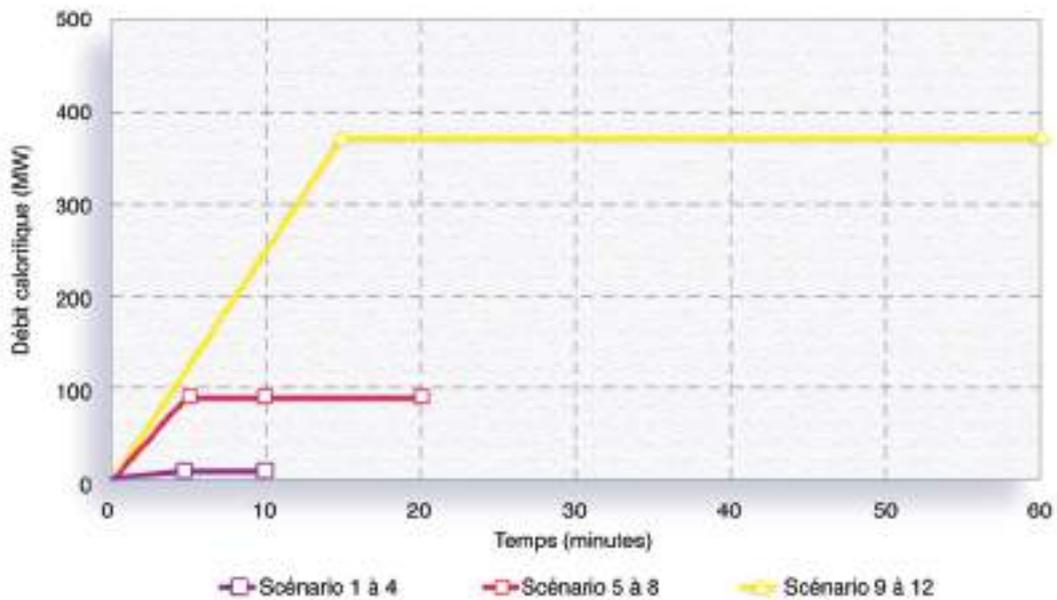


Figure 12: Scénarios 1 à 12: Évolution temporelle du débit calorifique

5.6 - Résultats des simulations

Les figures 13 à 18 représentent les évolutions temporelles de la température des gaz chauds (figures 13, 15, 17) et de la hauteur libre (figures 14, 16, 18).

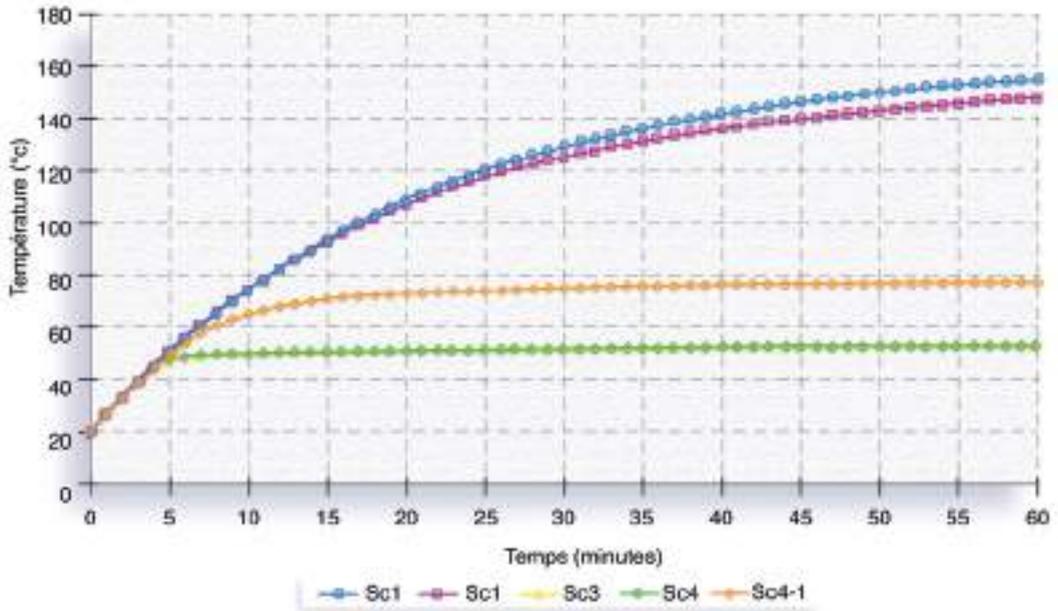


Figure 13: température des gaz chauds accumulés sous plafond

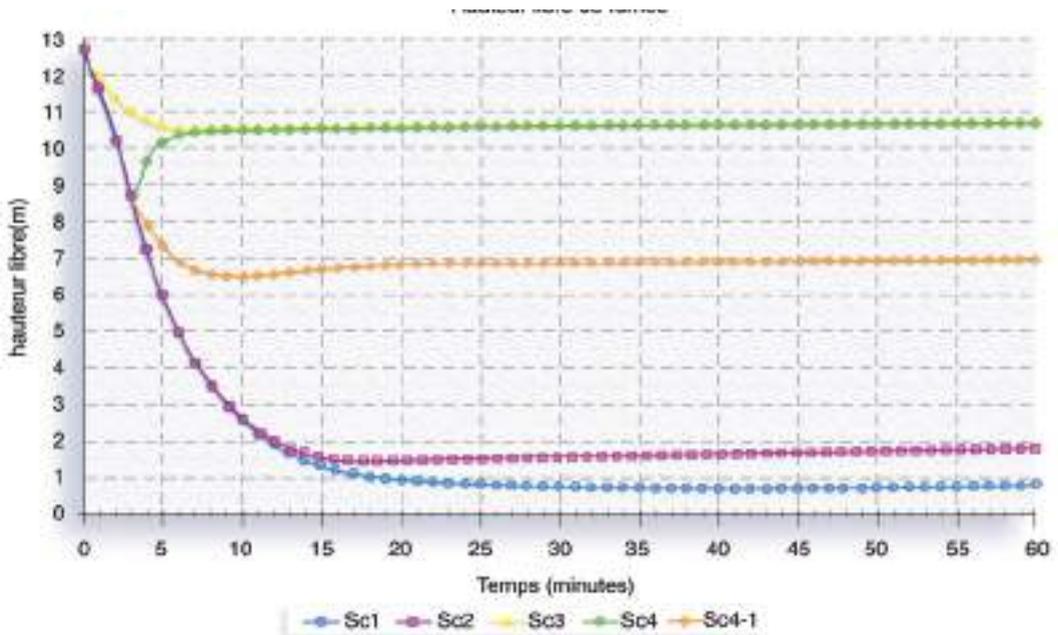


Figure 14: hauteur libre de fumée

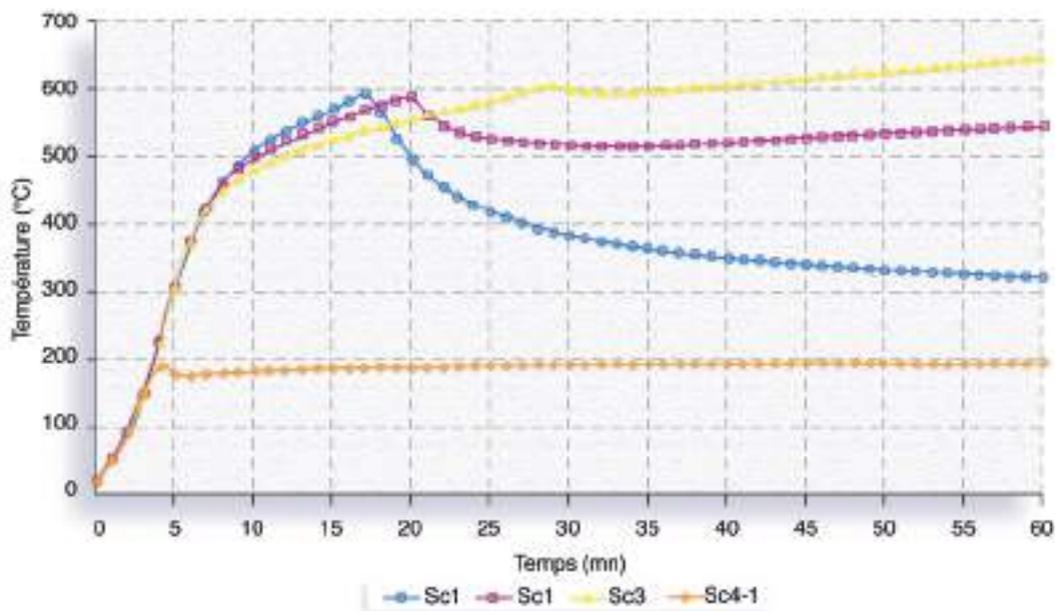


Figure 15 : température des gaz chauds accumulés sous plafond

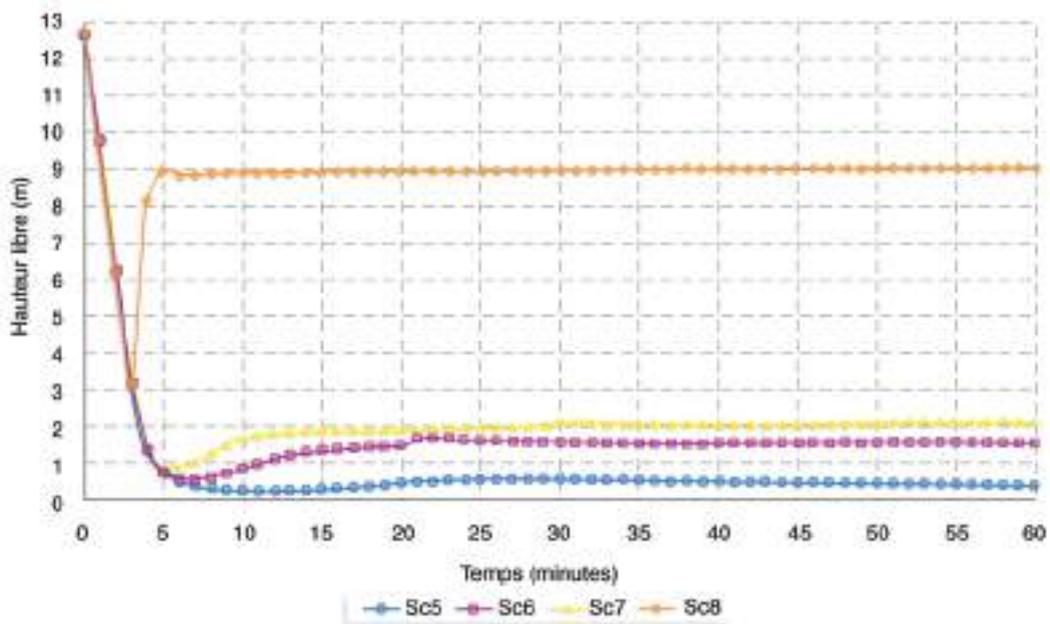


Figure 16 : hauteur d'interface

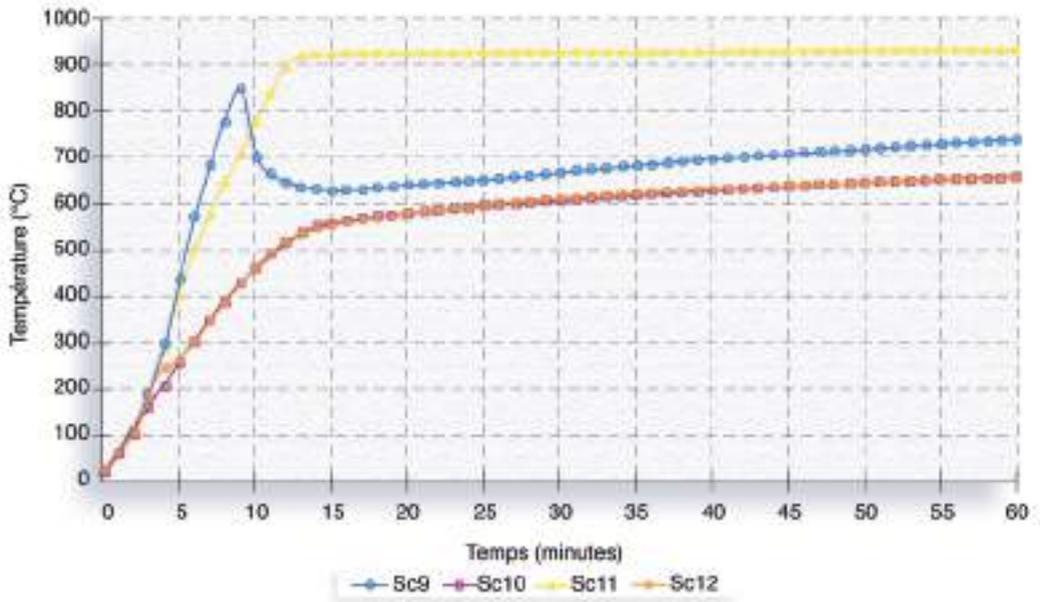


Figure 17: température des gaz chauds accumulés sous plafond

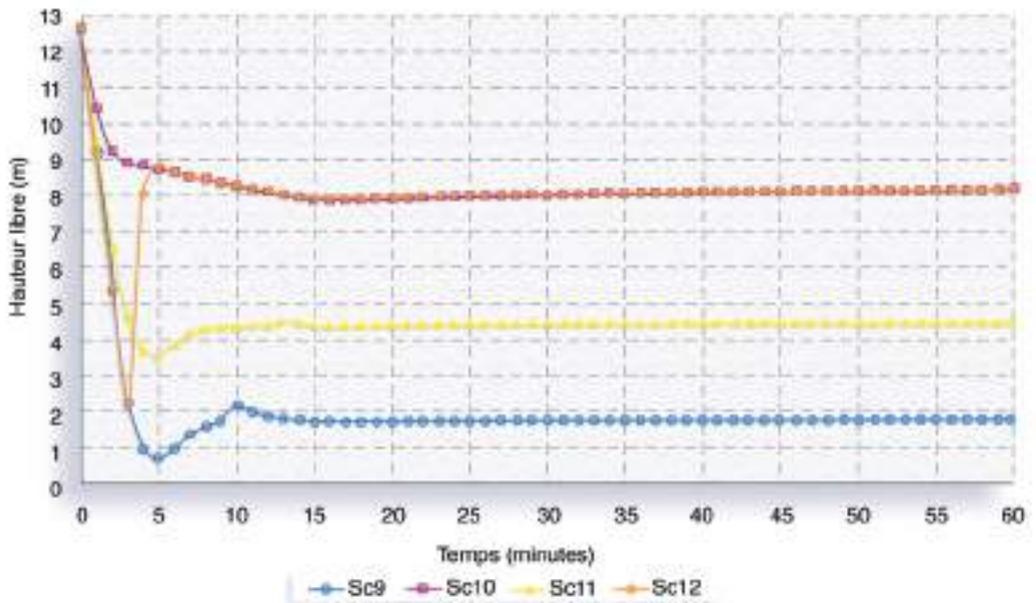


Figure 18: hauteur d'interface

5.7 - Actions thermiques sur les structures

Les résultats des calculs démontrent les points suivants.

■ **Feu sévère : scénarios 1 à 4 (figures 4 et 5)**

- Que la grande quantité de fumée générée par la combustion des produits conduit à un remplissage rapide de la cellule sans ouverture des exutoires de fumées (Sc1 et Sc2). La température des gaz chauds augmente et approche 100 °C à quinze minutes (figure 13). **Ce niveau de température reste cependant sans danger pour les éléments de structure situés loin du foyer.**
- Qu'une partie de cette même quantité de fumée est extraite par les exutoires conduisant à limiter le remplissage de la cellule (Sc3). Dans le cas où les exutoires d'un seul canton sont ouverts (Sc4-1), on relève une hauteur libre de 7 m (figure 14). Cette dernière augmente encore si tous les exutoires de la cellule sont ouverts (Sc4). La température moyenne de la couche de fumée est alors inférieure à celle qu'on observait exutoires fermés. Elle reste a fortiori sans danger pour les éléments de structure situés loin du foyer (figure 4).
- Que l'ouverture des exutoires du canton comme des cantons voisins contribue à diminuer la température des gaz chauds accumulés sous le plafond de la cellule.
- **Que, finalement, dans cette première phase de feu, la température des gaz chauds accumulés sous le plafond reste sans danger pour la structure.**

■ **Feu développé sur ¼ de canton : scénarios 5 à 8 (figures 15 et 16)**

- Que la température des gaz chauds dépasse 500 °C (Sc5, Sc6 et Sc7) valeur susceptible de conduire à allumage rapide des objets combustibles en contact de ces gaz (« flash over »), voir figure 15. Remarque : cette situation est de nature à entraîner brutalement des conditions intenable pour les occupants présents comme pour les secours.
- Qu'en revanche, l'ouverture rapide de l'ensemble des exutoires de l'entrepôt (Sc8) conduit à limiter le remplissage de fumée de la cellule. La hauteur libre s'établit à 9 m (figure 7) et la température moyenne des gaz atteint 200 °C (figure 5).
- Qu'ainsi, pour un feu très sévère de plusieurs dizaines de MW impliquant une grande quantité de combustible, l'ouverture rapide des exutoires de fumées de toute la cellule conduit à une température des gaz chauds nettement plus faible.
- **Qu'en tout état de cause, à ce stade de développement du feu, le niveau de la température des gaz chauds est alors susceptible de causer des désordres mécaniques à la structure.**

■ **Feu développé du canton : scénarios 9 à 12 (figures 17 et 18)**

• Qu'au-delà d'un stade de développement impliquant la taille d'un canton, la température des gaz chauds atteint plusieurs centaines de degrés à l'intérieur de la cellule (figure 17).

L'analyse des simulations effectuées permet de retenir 3 actions thermiques correspondant à 3 scénarios de feu susceptibles de causer un danger sur la structure :

1. Feu localisé (scénario 1)

Le scénario 0 est exploité. Dans ce cas la température atteint 850 °C en 2 minutes. Elle est ensuite maintenue à ce niveau pendant 10 minutes. Elle décline ensuite. L'analyse des conditions de danger portera sur les premières minutes.

2. Feu développé sur un canton (scénario 2)

Les résultats des scénarios 9 à 12 sont exploités. La température atteint 600 °C en 15 minutes. Elle est maintenue à ce niveau pendant 20 minutes.

L'analyse des conditions de danger sous ce niveau de sollicitation portera plutôt sur la première demi-heure de feu.

3. Feu généralisé couverture ruinée (scénario 3)

Dans ce cas la température atteint 900 °C après 20 minutes. Elle est ensuite maintenue à ce niveau jusqu'à 120 minutes.

La 10 représente les actions thermiques retenues.

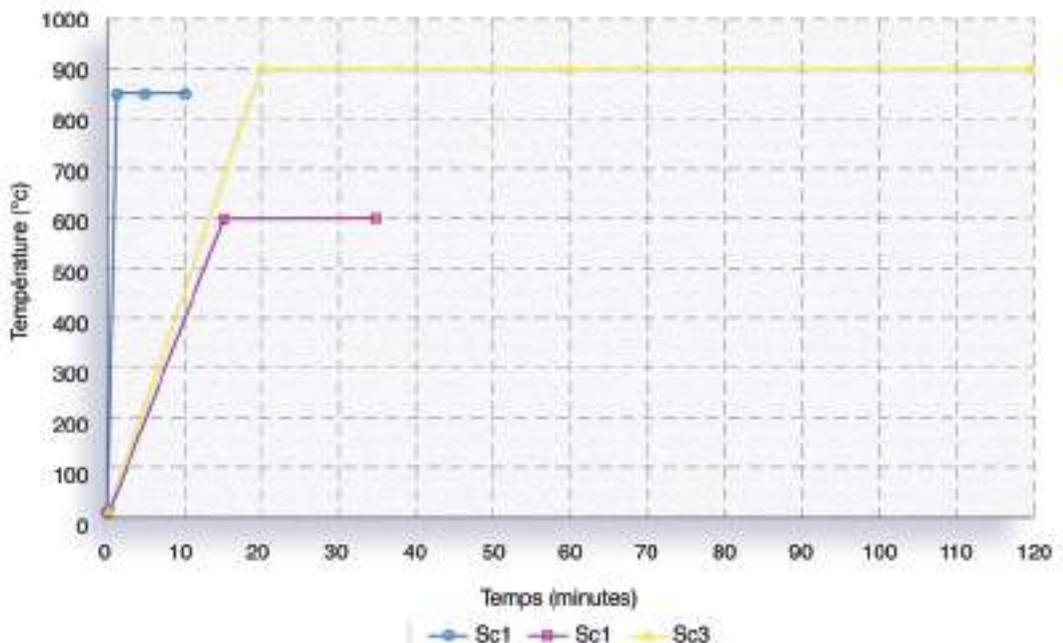


Figure 19: actions thermiques retenues pour l'étude

6. Analyse du bâtiment

6.1 - Actions thermiques sur la structure

On étudie la cellule 5.

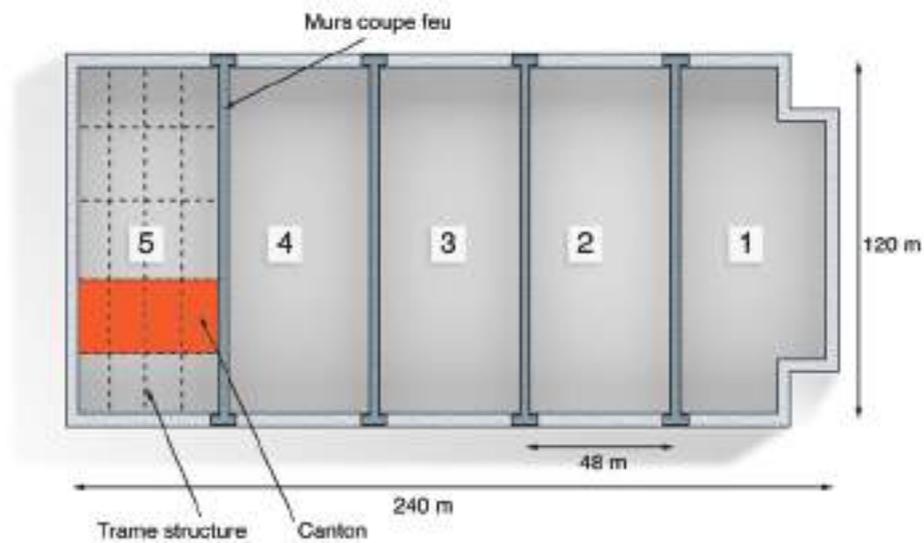


Figure 20: vue en plan de la cellule étudiée

■ **Action thermique locale**

Dans le scénario de feu localisé (début d'incendie), on considère un premier cas où un poteau entouré de racks est exposé à l'action thermique. Les poutres qui reposent sur le poteau sont exposées au feu dans une zone délimitée par un cercle de 5 m de diamètre qui représente le panache de fumées. Le reste de la structure est à température ambiante.

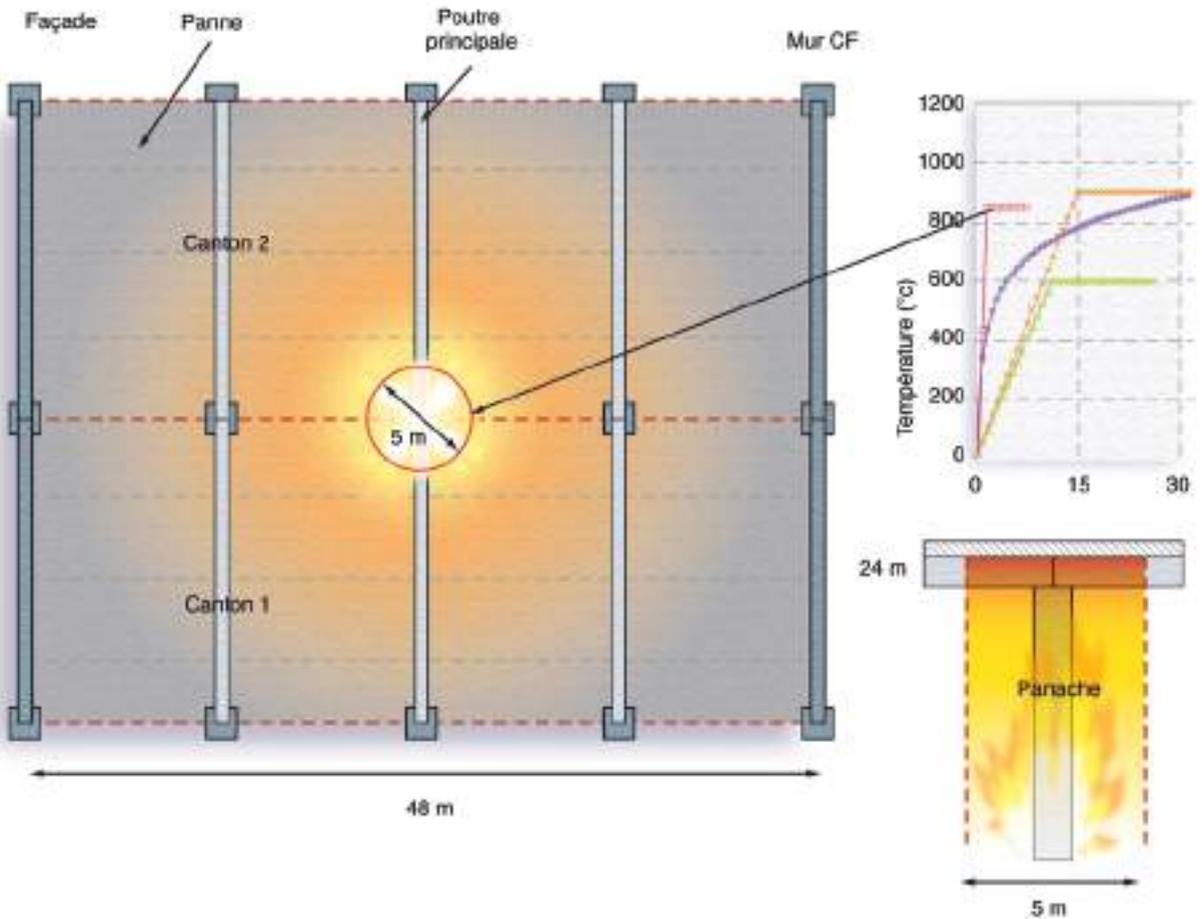


Figure 21 : cas n° 1, feu localisé au niveau d'un poteau

On considère un deuxième cas où le feu se déclare au milieu d'un canton. Les poutres qui reposent au droit du foyer sont exposées au feu dans une zone délimitée par un cercle de 5 m de diamètre qui représente le panache de fumées. Le reste de la structure est à température ambiante.

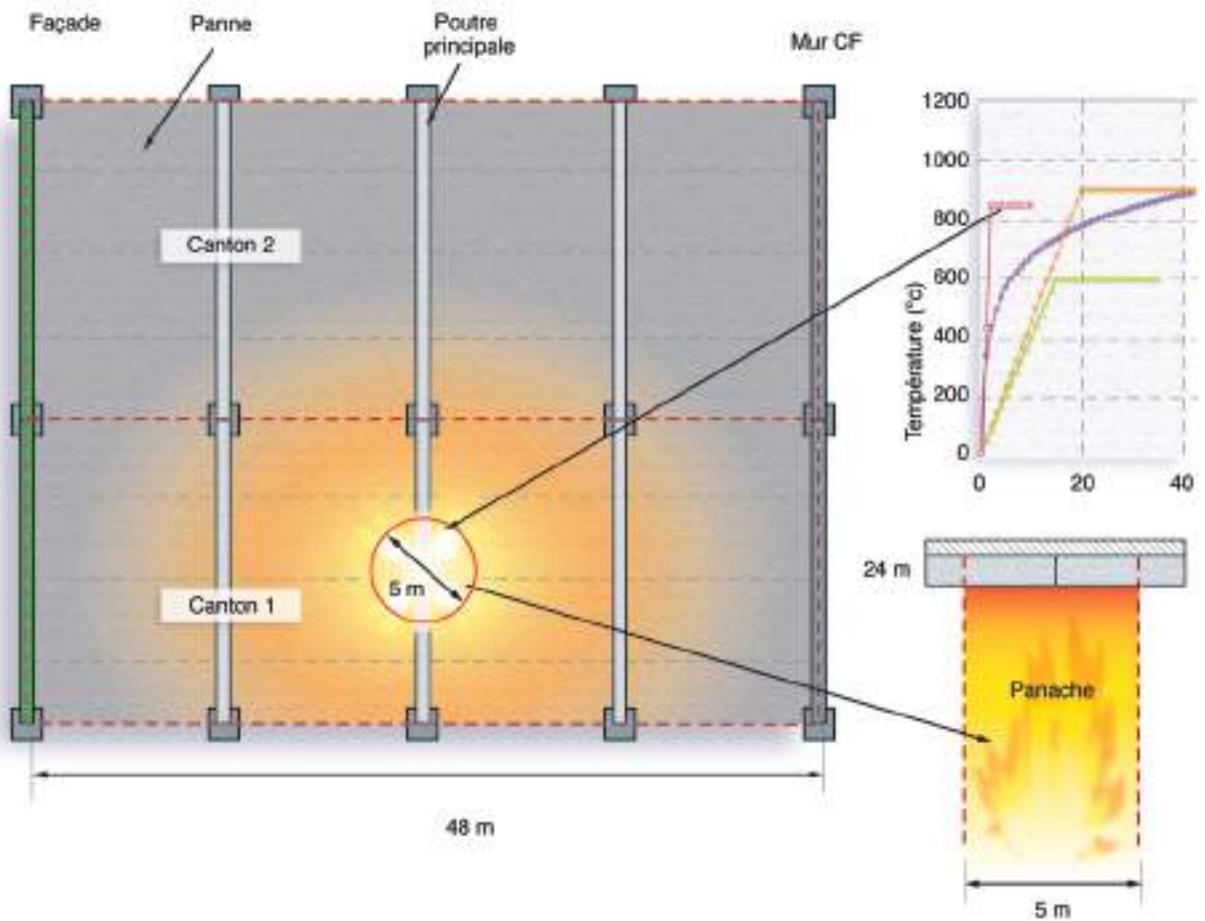


Figure 22 : cas n° 2, feu localisé au droit d'un écran de cantonnement

■ **Actions thermiques non uniformes en plan**

Dans le scénario de feu de canton, la structure située dans le même canton est soumise à l'action thermique représentée par la courbe de température « feu de canton » T2, et les éléments de structure situés en dehors de la couche chaude sont à température ambiante. La température des gaz entourant les autres poteaux n'est pas uniforme selon leur hauteur :

- sur leur partie située en dessous de la couche chaude, ils sont à température ambiante
- sur leur partie située dans la couche chaude, ils sont soumis à des gaz dont la température suit la courbe « feu de canton » T2.

La figure 23 illustre ce cas.

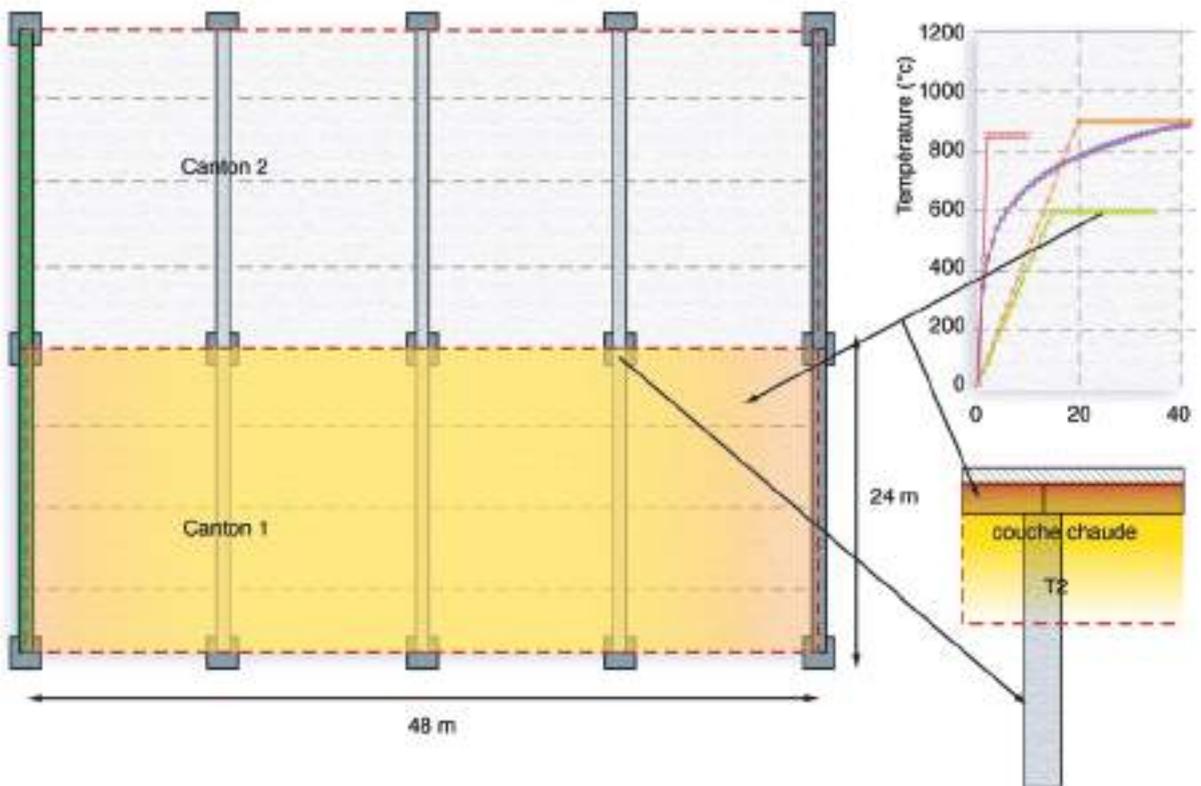


Figure 23 : feu étendu à un canton

Pour la suite des calculs, on retient une hauteur d'interface de la couche chaude à 7,5 m, constante pendant la durée du scénario, ce qui suppose une ouverture correcte des exutoires au plus tard 3 minutes après le début de l'incendie.

■ Actions thermiques uniformes en plan

Dans le cas de l'action thermique correspondant au feu de cellule, il y a stratification des fumées, avec apparition d'une couche chaude dont la hauteur se stabilise. En conséquence, les poteaux sont soumis à une action thermique représentée par la courbe de température « feu de cellule » T3 en partie supérieure (dans la couche chaude) et par la température ambiante en dessous. Cette répartition des températures selon deux zones en élévation est uniforme en plan.

Pour la suite des calculs, on retient une hauteur d'interface de la couche chaude à 8 m, constante pendant la durée du scénario, ce qui suppose une ouverture correcte des exutoires, mais ne prend pas en compte l'apport de ventilation due à la ruine des lanterneaux.

Lorsque la courbe conventionnelle est utilisée, l'action thermique est uniforme en plan et en élévation, tous les éléments étant exposés à des gaz à la même température.

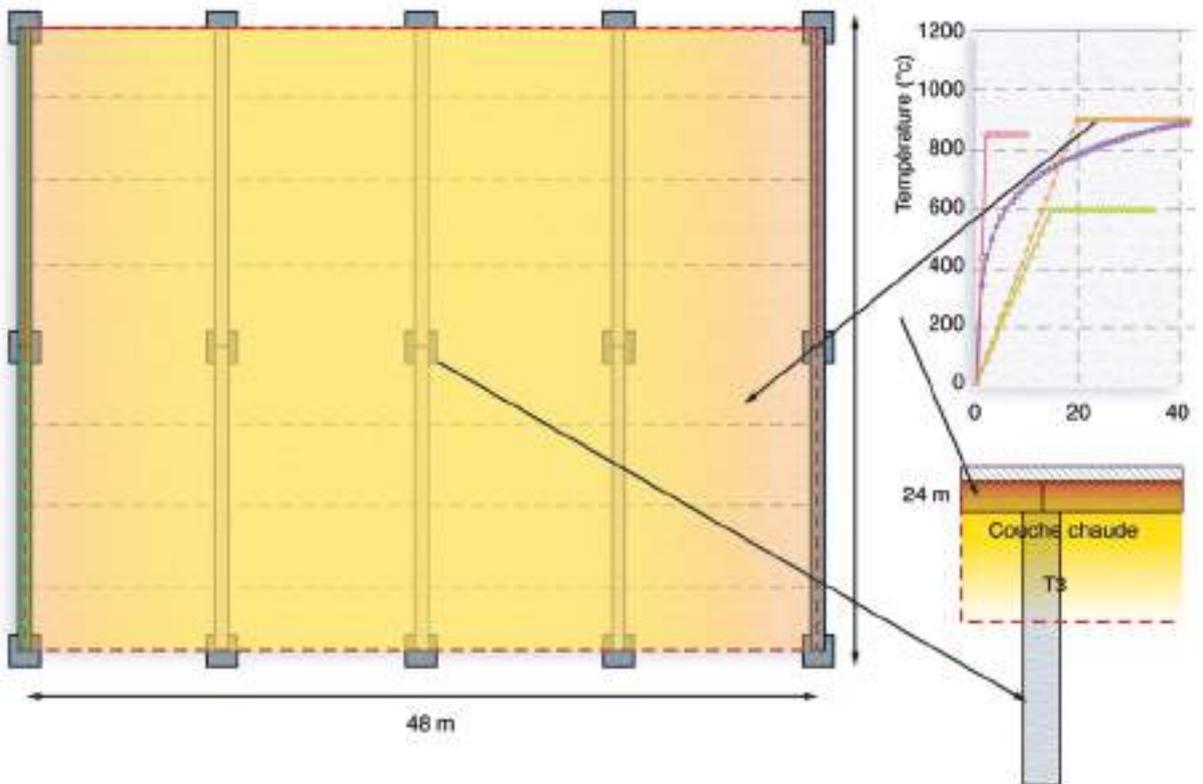


Figure 24 : feu étendu à une cellule

6.2 - Détails constructifs

Les poteaux sont fondés sur encvements.

La liaison entre les poutres et les poteaux se fait au moyen de deux broches diamètre 20 mm, traversant la semelle inférieure et disposées de part et d'autre de l'âme.

La liaison entre les pannes et les poutres principales est réalisée par un goujon situé dans le becquet.

6.3 - Modélisations des cibles

La modélisation des cibles dépend en grande partie de la nature de la liaison entre éléments de structure, en condition d'incendie. Une étude spécifique des liaisons par broche et goujon est à faire, mais elle n'est pas présentée ici.

Pour le feu localisé, on étudiera la réponse des cibles suivantes :

- poteau central, section PO5050 ;
- poutre principale exposée à mi-travée section IE105 ;
- panne exposée à mi-travée, section PP5230.

La disposition des racks est telle qu'une zone de circulation large de 4 m se situe en périphérie des cellules. Le cas d'un foyer situé à côté des poteaux de façade ou du mur coupe-feu n'est donc pas étudié.

Pour le scénario de feu localisé, une analyse élément par élément suffit. Si un risque de ruine locale est détecté, à ce niveau de sollicitation des investigations complémentaires sont nécessaire pour prendre en compte le rôle du reste de la structure (non exposé au feu) dans la cinématique de ruine de l'entrepôt.

Pour le feu de canton ou de cellule, on étudiera donc la réponse de deux portiques principaux.

- Selon la direction de la poutre principale, pour étudier le risque d'effondrement vers l'extérieur des façades.

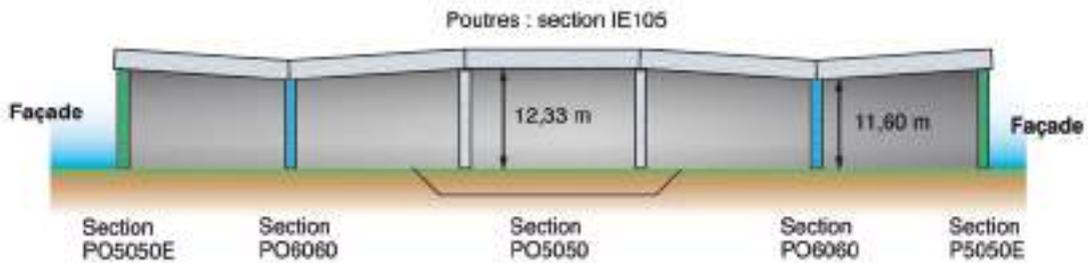


Figure 25 : portique selon les poutres principales en I

• Selon la direction des pannes pour étudier pour étudier le risque d'effondrement vers l'extérieur de la façade (pignon) et le risque de ruine en chaîne (effondrement de la cellule adjacente). Cette modélisation a pour but de vérifier dans quelles conditions les pannes participent à la stabilisation de ces murs. Si la liaison est remise en cause pendant l'incendie, il faudra étudier la cinétique de ruine de murs comme des murs autostables (non tenus en tête) et changer de modèle structural.

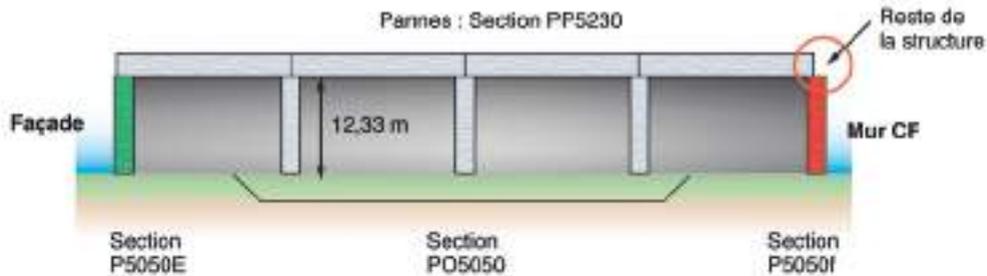


Figure 26 : portique selon les pannes

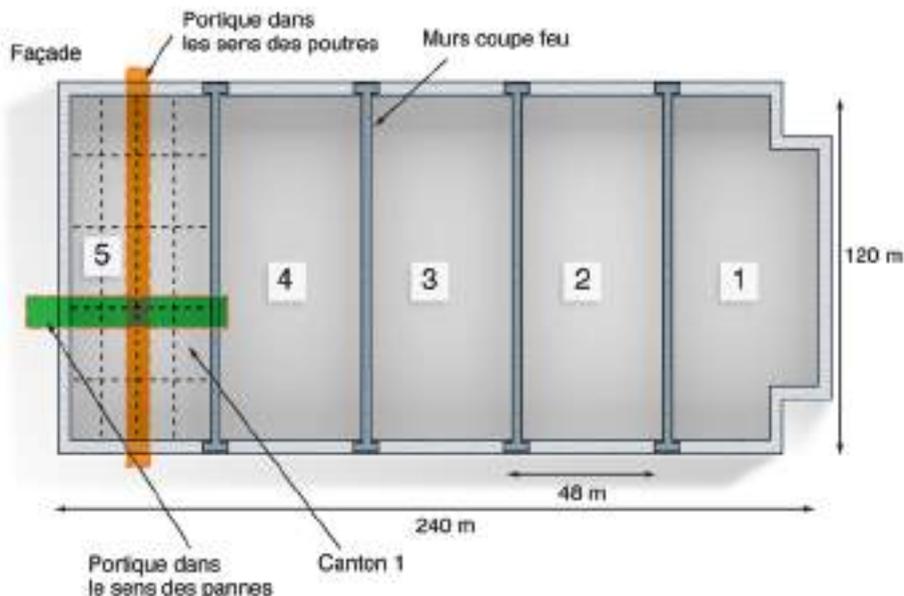


Figure 27 : vue en plan de l'implantation des portiques étudiés

7. Échauffement des éléments

7.1 - Méthode de calcul

Lorsque les actions thermiques sont décrites par la courbe normalisée, il est possible de faire appel à des distributions de température simplifiées telles que celles données dans l'Annexe A de l'Eurocode 2 partie 4-2, sous réserve de vérifier le domaine d'emploi de ces isothermes. Dans le cas de calculs de type feu naturel, l'échauffement de la section est calculé en résolvant l'équation de la chaleur, à partir des conditions aux limites de température imposée. On tient compte des transferts thermiques entre l'élément et son milieu gazeux par radiation et par convection.

Pour les actions thermiques les calculs d'échauffement sont réalisés avec le logiciel SAFIR. Dans le cas d'éléments dont la stabilité au feu est vérifiée sous la courbe ISO, on peut également utiliser le logiciel CIM'FEU.

7.2 - Hypothèses

On réalise un calcul de transfert thermique en deux dimensions, en tenant compte des caractéristiques thermo-physiques du béton conformément à l'Eurocode 2 partie 1.2 (EN 1992-1-2). Les éléments cibles de la structure sont situés loin du foyer dans une zone de fumée. On considère donc que la sollicitation thermique est uniforme sur la périphérie des éléments. Conformément à l'Eurocode 1 partie 1.2 (EN 1991-1-2) le calcul thermique est réalisé en fixant le coefficient de convection à $h = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ sur les surfaces exposées et $h = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ sur les surfaces non exposées, le coefficient d'émissivité équivalent est fixé à 0,7 pour le béton.

Pour rappel, dans le cas de l'action thermique conventionnelle, fixant le coefficient de convection à $h = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ sur les surfaces exposées et $h = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ sur les surfaces non exposées, le coefficient d'émissivité équivalent est fixé à 0,7 pour le béton.

D'autre part, on retient une teneur en eau de 1.5 % en masse, et la masse volumique du béton est prise égale à 2300 kg/m^3 .

7.3 - Calcul de l'échauffement

En fonction du type d'élément et de sa position dans la cellule, le nombre de faces exposées peut varier. La figure ci-dessous représente les différentes configurations possibles.

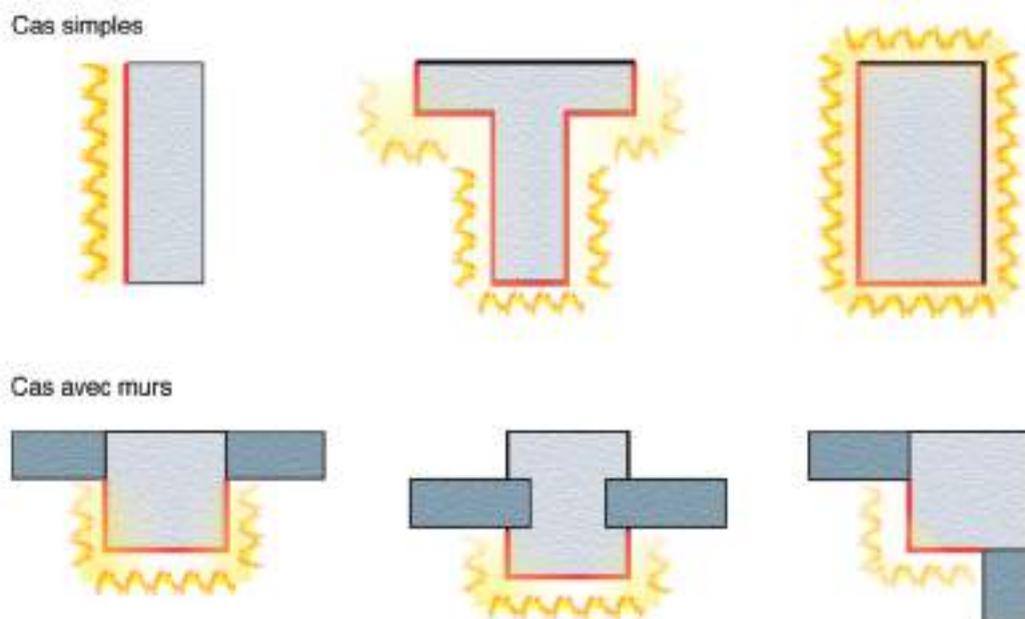


Figure 28 : schéma des faces exposées pour des éléments de structures de section courante

Le tableau ci-après fait la synthèse des conditions aux limites. Les faces non exposées sont en contact avec l'air à température ambiante, prise égale forfaitairement à 20 °C.

Les poutres peuvent être considérées exposées sur 4 côtés parce que les pannes créent un espace entre la couverture et la poutre qui permet le passage des gaz chauds. Cependant, le cas exposé sur 3 côtés doit être également étudié, car il conduit à un gradient de température plus sévère dans la section. Il est difficile de représenter les conditions d'expositions réelles, mais l'étude des deux cas donne une enveloppe satisfaisante.

Le cas des poteaux situés dans le mur coupe-feu présente la particularité de tenir compte des panneaux du mur. Leur caractère coupe-feu fait écran à la sollicitation thermique sur la moitié de la section. Le cas des poteaux situés en façade est assez similaire à celui des poutres vues précédemment. En effet, les panneaux de façades n'ont pas de caractère coupe-feu. En début d'incendie, ils restent en place et font écran à la sollicitation thermique. Les poteaux sont donc exposés

sur 3 côtés partiellement. Ce cas donne le gradient maximal. Ensuite, si ces panneaux s'effondrent, les poteaux peuvent être exposés sur 4 côtés. Ce cas donne l'échauffement maximal. Les deux configurations sont étudiées pour obtenir une enveloppe du comportement réel.

Élément	Section	H [cm]	b [cm]	bw [cm]	L [m]	Position	Nb faces exposées
Poteau	PO5050	50	50		10.33	intérieur	4
	PO5050 avec feuillure	50	50		9.60/10.35/9.97	mur CF	3-
	PO5050 avec engravure	50	50		10.33/10.52/10.15/ 10.89/11.26	façade	3/4
	PO5050 avec engravure	50	50		10.33/10.52/10.15/ 10.89/11.27	angles façade	2/4
	PO6060	60	60		9.6	intérieur	4
	PO6060 avec engravure	60	60		9.6	façade	3
	PO3050	50	30		10.33	façade	3
Poutres	IN50	50	40	12	12	intérieur	
	IE105	105	50	12	24	intérieur	3/4
	PT5550	55	50	15	12	intérieur	3/4
Pannes	PP5230	52	30	7	12	intérieur	3
	PP6030	60	30	7	12	intérieur	3
	PT5550	55	50	15	12/6 ?	intérieur	3
	PT5550	55	50	15	12/6 ?	façade	2

7.4 - Résultats des calculs d'échauffement

Les figures 29 et 30 montrent à titre d'illustration les champs de température calculés sous l'action thermique conventionnelle (ISO R834), pour une durée de 2 heures, dans le cas de la poutre de type IE105, exposée sur 3 côtés, et dans le cas d'une section de poteau incluse dans le mur coupe-feu (PO5050 avec feuillure).

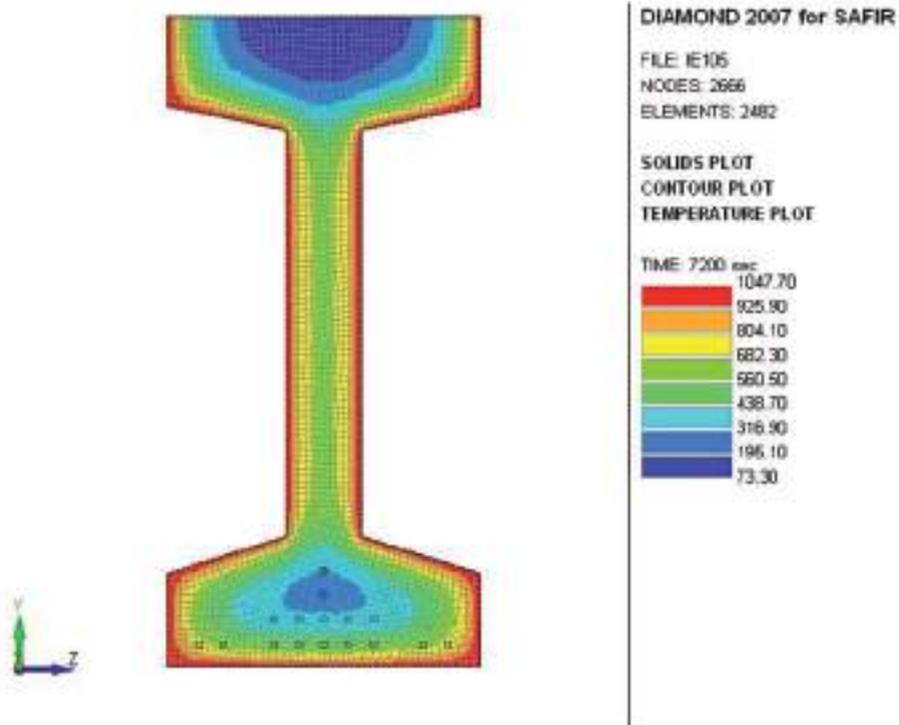


Figure 29: champs de température à 2 heures, sous action thermique conventionnelle ISO R834 - poutre IE105

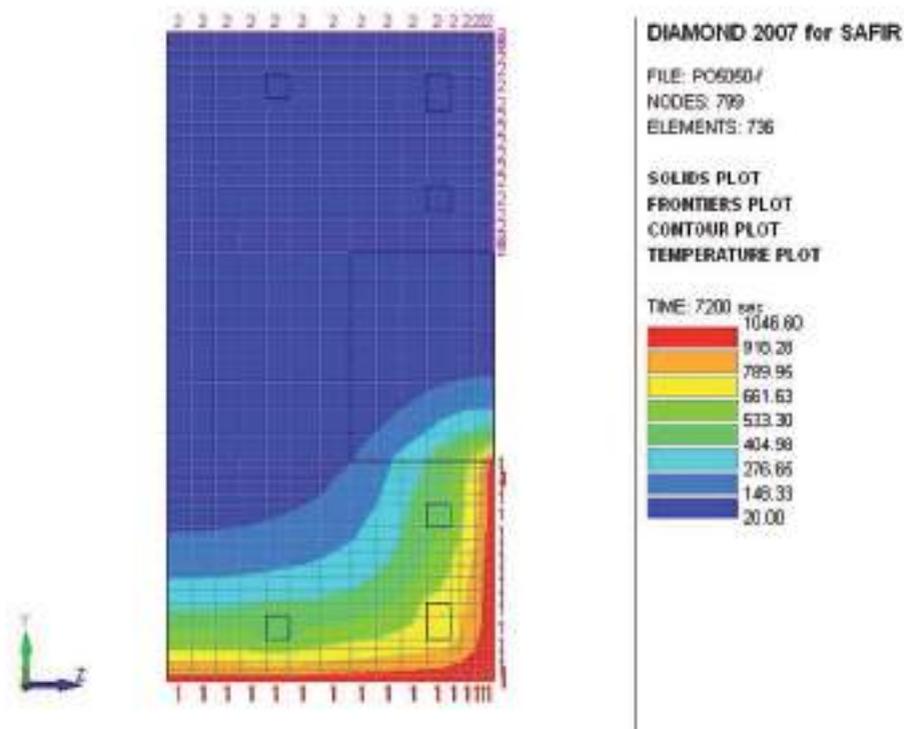


Figure 30: champs de température à 2 heures, sous action thermique conventionnelle ISO R834 - section de poteau PO5050-f

La figure 31 montre le maillage des sections inférieures et supérieures des poteaux de façade de façade.

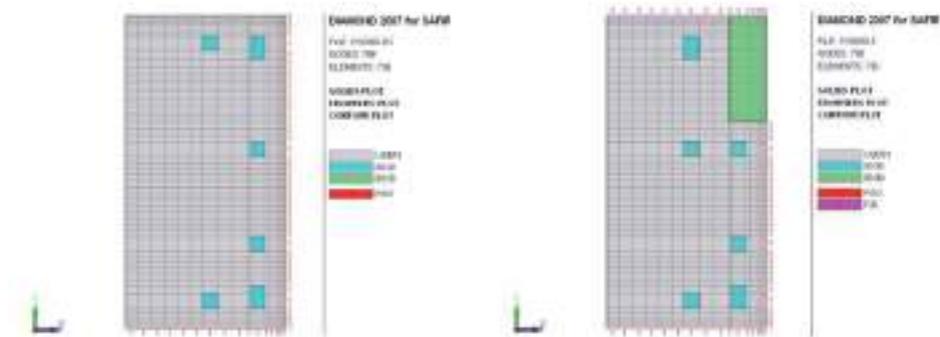
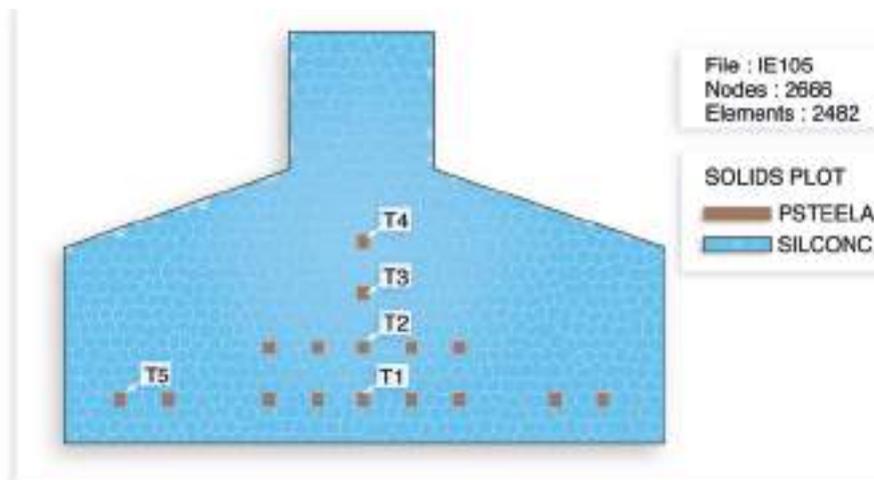


Figure 31 : maillage des sections des poteaux de rive
(à gauche : section supérieure, à droite : section inférieure avec engravure)

Les graphiques suivants détaillent l'évolution des températures dans les armatures des poutres pour différentes actions thermiques. Les armatures repérées sur la figure ci-dessous ont des températures représentatives de l'échauffement du talon de la poutre.

On note sur les courbes ci-contre que l'échauffement résultant du feu de cellule est du même ordre que celui obtenu avec la courbe conventionnelle ISO R834. Pour ce qui est du feu localisé et du feu de canton, les échauffements restent très limités, et peu préjudiciables pour le comportement des structures.



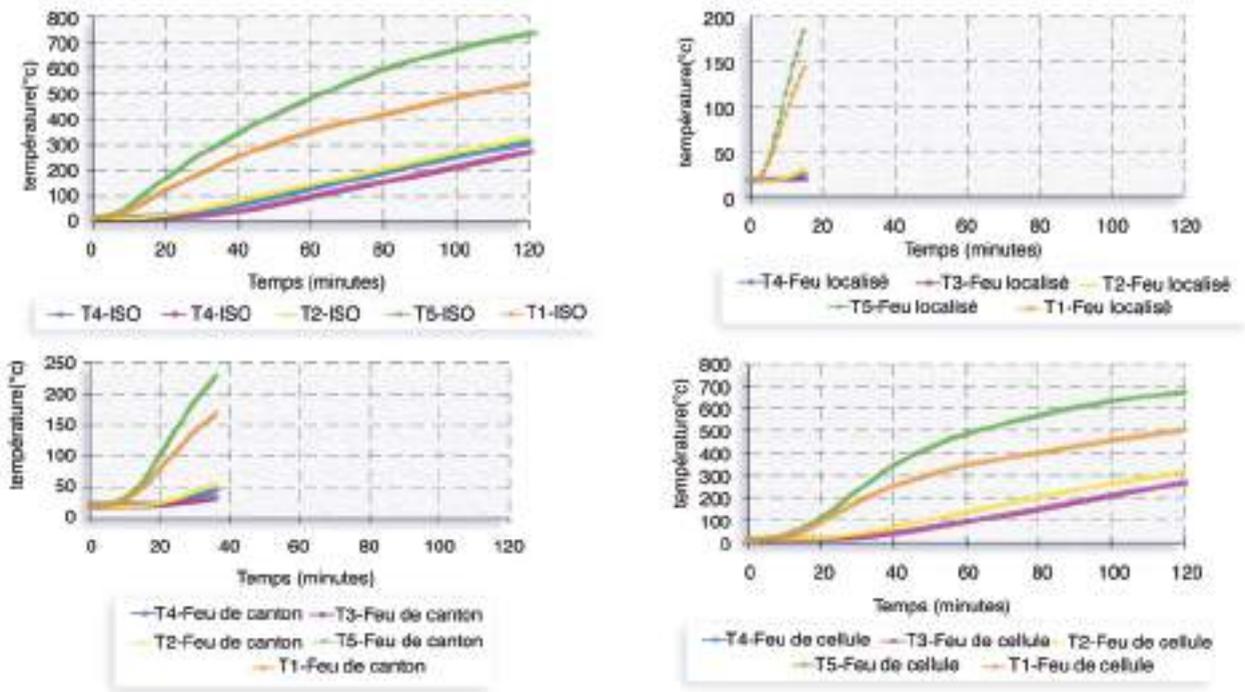


Figure 32 : températures dans les armatures de la poutre IE105

Pour la panne PP5230, l'échauffement sous feu ISO 2 h est le suivant.

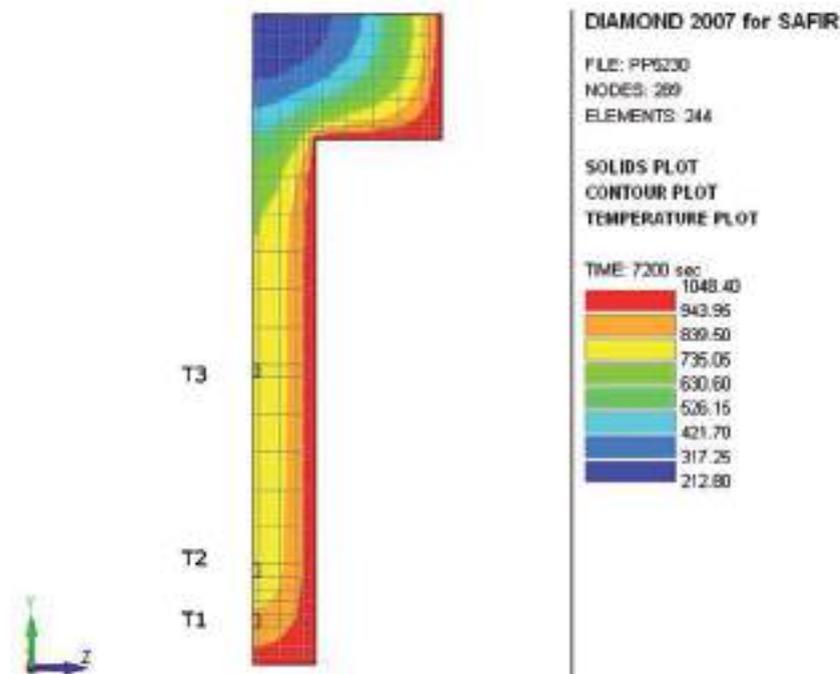


Figure 33 : échauffement de la demi-section des pannes PP5230

Le graphe ci-dessous présente l'évolution des températures dans les torons pour les 50 premières minutes.

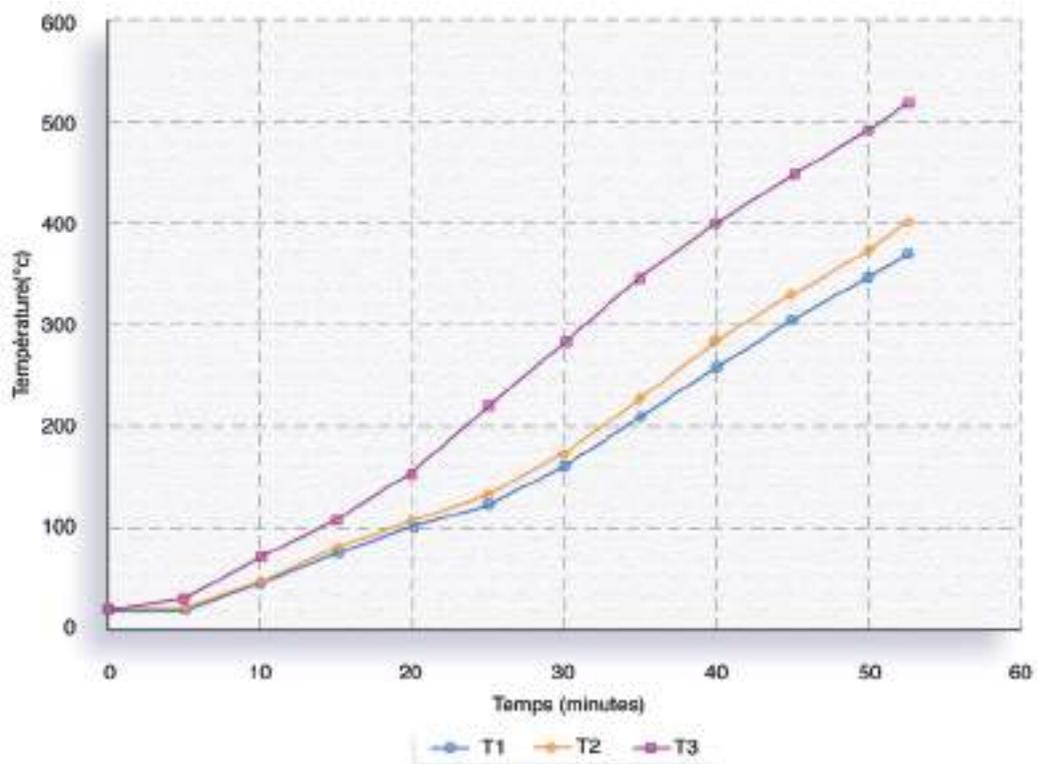


Figure 34 : évolution de la température dans les torons de la panne PP5230 (ISO)

8. Comportement mécanique à températures élevées

Pour rappel, on effectue les vérifications suivantes.

- Feu ISO : stabilité de la structure pendant 1 h et compartimentage pendant 2 h
De fait, les murs coupe-feu étant intégrés à la structure, il faut vérifier une stabilité au feu de 2 heures pour les poteaux du mur coupe-feu.
- Feu localisé : stabilité des éléments de structure (poutre ou poteau) pendant les premières minutes d'incendie.
- Feu de canton : stabilité des éléments de structure (poutre ou poteau) pendant les premières minutes d'incendie.
- Feu de cellule : On doit vérifier l'absence de ruine en chaîne et de ruine vers l'extérieur.

8.1 - Hypothèses mécaniques

On considère que le pied de poteau est encastré au niveau du dallage. Les poutres sont brochées en tête de poteau, ce qui réalise une liaison de type rotule, sauf en tête des poteaux PO3050 où il n'y a pas de brochage, on considère un appui simple.

Les pannes sont brochées sur les poutres principales au niveau de leur bécuet. Elles sont considérées comme bi-articulées, sous réserve de la tenue de la liaison.

Il n'y a pas d'auvent en façade.

Pour les poteaux de façades et les murs coupe-feu, en situation normale, on considère que le poids des panneaux est transmis directement d'un panneau sur l'autre et n'affecte pas directement les poteaux qui ne servent qu'au maintien latéral. Cependant, en situation d'incendie, les déformations hors plan des murs sont importantes, ce qui rend les poteaux sensibles aux effets du second ordre, et risque d'entraver le glissement des attaches dans les rails de support des panneaux. De façon sécuritaire, on considère donc que le poids des panneaux se reporte sur les poteaux en situation d'incendie.

8.2 - Matériaux

Selon les indications du fabricant des éléments précontraints, les poteaux sont réalisés avec un béton de classe C40/50. Le béton des poutres précontraintes est de classe 50/60 et les armatures de précontraintes ont une limite élastique de $f_{peg}=1\ 860$ MPa, la contrainte initiale étant de 1 425 MPa.

Toutes les armatures de béton armé ont une limite élastique de 500 MPa.

L'évolution des propriétés mécaniques des matériaux avec la température est conforme aux préconisations de l'EN 1992-1-2 et son Annexe Nationale. En particulier, les éléments en béton ont une teneur en eau de 1,5 % qui dispense de la prise en compte du risque d'éclatement du béton (NF EN 1992-1-2 § 4.5.1(2)).

8.3 - Charges

Selon les indications de la note de calcul à froid, les charges retenues pour le dimensionnement sont :

- le poids propre des éléments, G_p , calculé pour un poids volumique du béton armé valant 24 kN/m^3
- une charge de couverture de $G_c = 0,25\text{ kN/m}^2$
- une surcharge représentant les charges suspendues au plafond : $G_s=0,10\text{ kN/m}^2$
- les charges climatiques (neige) $S = 0,68\text{ kN/m}^2$
- panneaux de façade : $3,84\text{ kN/m}^2$
- panneaux des murs coupe-feu : $3,6\text{ kN/m}^2$
- la combinaison de charge la plus défavorable au regard de l'EN 1991-1.2 est :
 $G_p + G_c + G_s + 0,2 S$

Les pannes reprennent une charge correspondant à 6 m de largeur de toiture.

Les poutres principales (IE105) reprennent une charge correspondant à 12 m de largeur de toiture.

Pour les éléments du modèle, on retient donc les charges globales du 1.

Charges globales pour les calculs mécaniques		
Élément	Analyse élément par élément	Modèle 2D
Panne	PP5230 : 4,42 kN/ml PT5530 : 6,19 kN/ml	PP5230 : 4,42 kN/ml
Poutre IE105	15,50 kN/ml	15,50 kN/ml
Poteaux	Charges ponctuelles Au centre: 372 kN En rive: 186 kN Charges réparties PO5050 : 5,90 kN/ml PO6060 : 8,54 kN/ml En façade: Parallèle aux poutres IE : 46 kN/ml Parallèle aux pannes : 23 kN/ml Murs coupe-feu : 43,2 kN/ml	Charges ponctuelles (sens pannes) Au centre: 319 kN En rive: 160 kN Charges réparties: PO5050 : 5,90 kN/ml (5,45 si feuillure ou en gravure) PO6060 : 8,54 kN/ml En façade: Parallèle aux poutres IE : 46 kN/ml Parallèle aux pannes : 23 kN/ml Murs coupe-feu : 43,2kN/ml

8.4 - Résultats mécaniques

Cette partie a pour but de présenter la forme des résultats obtenus, et les interprétations associées. On utilise des exemples issus de l'entrepôt étudié.

■ Calcul élément par élément

Stabilité d'une poutre

La stabilité d'une poutre peut être étudiée soit en faisant un calcul de résistance à la flexion et à l'effort tranchant, (calculs de type CIMFEU), soit en simulant la poutre à l'aide d'un logiciel éléments finis et en contrôlant les déplacements. Pour les poutres étudiées, qui sont isostatiques, une chute brutale de la flèche à mi-travée indique l'effondrement. Il faut également vérifier en sus la résistance à l'effort tranchant, cette vérification n'étant pas effectuée par le logiciel utilisé (SAFIR).

Poutre IE 105 : portée 24 m, charge répartie 15,5 kN/ml, isostatique, Feu ISO

La figure 35 présente la courbe d'évolution de la flèche à mi-travée (f) et du déplacement horizontal (dx) à l'extrémité libre.

La courbe de cette figure montre que la flèche à mi-travée de la poutre présente une brusque augmentation à partir de 100 minutes, et une chute à 113 minutes. Le déplacement d'extrémité est négatif à l'origine (raccourcissement dû à la pré-contrainte) et augmente sous l'effet de la dilatation thermique. À partir de 113 minutes, il y a une chute brutale de ce déplacement car la poutre s'effondre vers l'intérieur (ruine en flexion).

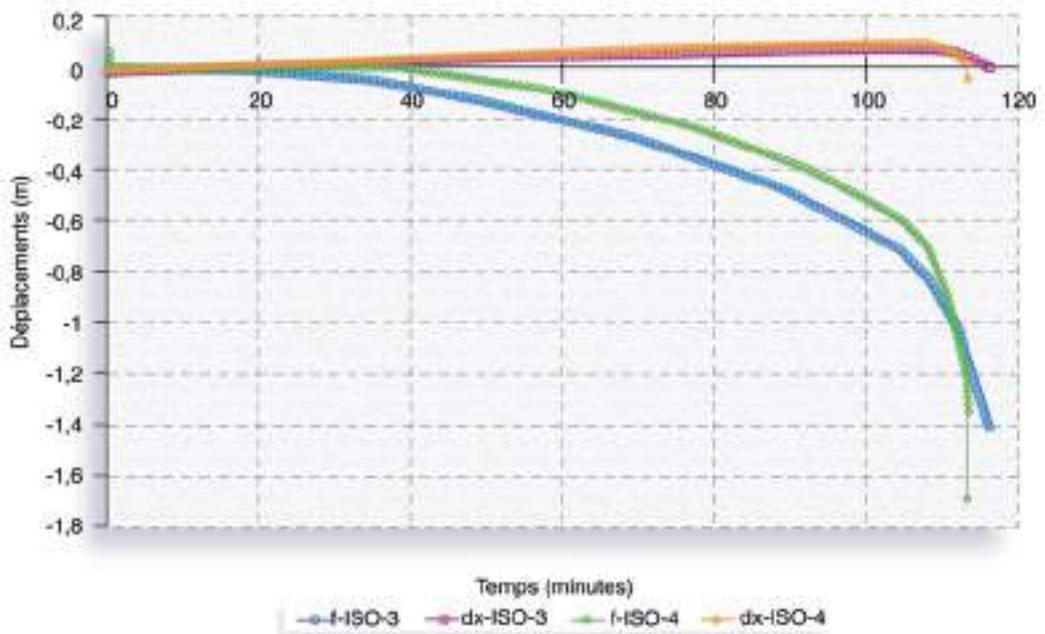


Figure 35 : évolution de la flèche à mi-travée et du déplacement d'extrémité pour la poutre IE105, sous feu ISO (dans le cas de 3 côtés exposés ou 4 côtés exposés)

La courbe donne l'évolution du comportement en flexion de la poutre. Pour conclure sur la stabilité au feu, il est nécessaire de vérifier la résistance à l'effort tranchant. On effectue le calcul à 120 minutes.

Les armatures d'effort tranchant sont constituées de 2 brins HA10 espacés de 5 cm, avec un enrobage de 2 cm. Compte tenu de la forme de la poutre (section en I), on vérifie la résistance du béton dans l'âme et la résistance des armatures d'effort tranchant dans cette même zone, à 2 cm des parements.

La température de référence pour les armatures est $\theta_p = 807 \text{ }^\circ\text{C}$.

La section réduite de l'âme a une largeur de 2,8 cm. Elle est calculée à partir du champ de températures à $t = 120$ minutes. Pour chaque maille de largeur b_i , la température au centre de la maille est notée θ_i , et sa largeur réduite est $b = b_i k_c(\theta_i)$ avec k le coefficient de réduction du béton selon l'Eurocode 2 partie 1-2. La largeur réduite de l'âme est obtenue en sommant les largeurs réduites de chaque maille.

En optant pour une valeur d'inclinaison des bielles telles que $\cot \theta = 2,5$, on trouve en appliquant les formules de résistance à l'effort tranchant issues de l'Eurocode 2 :

$$V_{Rd,s} = 192 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,min} = 261 \text{ kN}$$

$$\text{or } V_{Ed} = 186 \text{ kN}$$

donc la résistance à l'effort tranchant est satisfaite à 120 minutes.

La poutre IE105 est stable au feu ISO pendant 113 minutes.

Stabilité des pannes PP5230

Panne structurale PP5230 : portée 12 m, charge répartie 4,42 kN/ml, isostatique, feu ISO

La figure 36 montre les lèches à mi-travée pour les poutres PP5230, dans le cas d'une section exposée sur 3 ou 4 côtés.

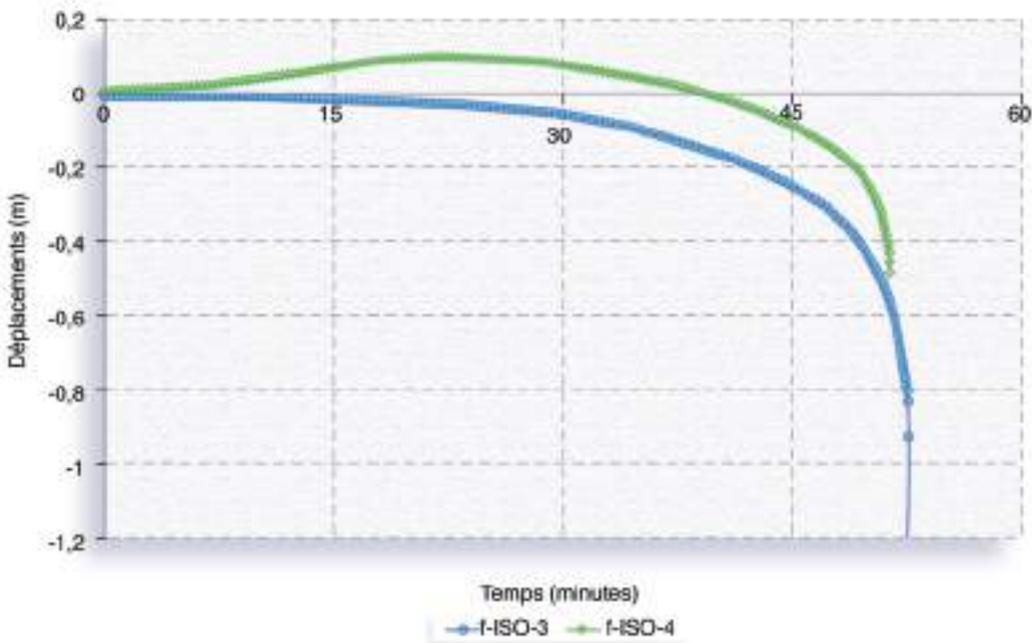


Figure 36 : flèches des poutres PP5230, feu ISO, exposées sur 3 ou 4 côtés

Les calculs de résistance au cisaillement ne conduisent pas à réduire la durée de stabilité au feu de la poutre.

La panne PP5230 est stable au feu ISO pendant 50 minutes.

Pour ce qui est du feu localisé (action thermique T1), la figure 37 montre deux modèles mécaniques, avec la déformée des poutres à 15 minutes, correspondant

à une poutre principale IE105 et une panne PP5230, supposées isostatiques, et exposées à l'action thermique T1 sur une longueur de 5 m à mi-travée.

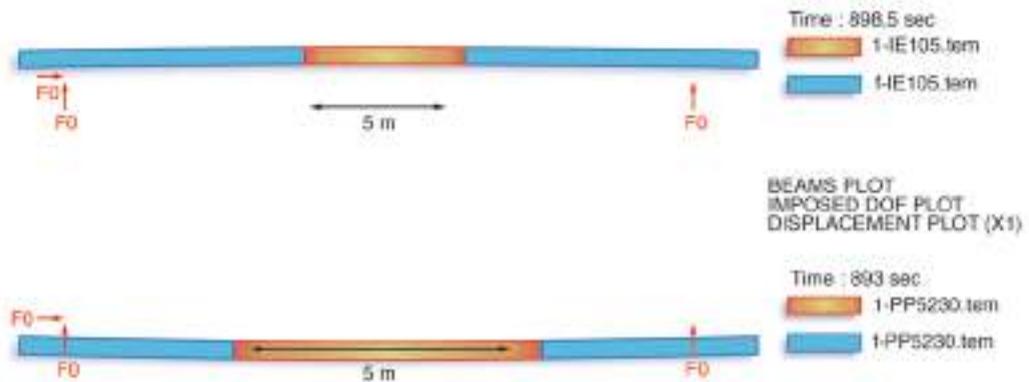


Figure 37 : modèle et déformée à 15 minutes de la poutre IE 105 (en haut) et de la panne (PP5230), pour l'action thermique T1

Les flèches à mi-travée atteignent respectivement +13 mm et -5 mm. Dans le cas de la poutre IE105, le chargement en situation d'incendie ne compense pas la contre-flèche due à la précontrainte, ce qui explique la valeur positive de la flèche.

Le déplacement de l'extrémité libre de la poutre est de 3,8 mm, celui de la panne est de 10 mm. Pour la poutre IE105, dont la raideur longitudinale est très forte comparée à la raideur des poteaux en flexion, cette valeur ne remet pas en cause le modèle isostatique. Pour la panne, la raideur longitudinale est plus faible comparée à la raideur du reste de la structure. Les déplacements des extrémités sont donc gênés. Compte tenu que l'appui de la panne est réalisé par son béquet, les déplacements gênés induisent un effort normal excentré dans la panne, ce qui a pour effet d'augmenter la flèche à mi-travée. Néanmoins, on considère que cet effet ne remet pas en cause la stabilité de la panne dans la situation considérée.

L'effort tranchant est très faible dans les zones exposées au feu. Le critère de résistance à l'effort tranchant est satisfait.

Pour le scénario de feu localisé, la poutre IE105 est stable pendant toute la durée de l'action thermique T1.

Pour le scénario de feu localisé, la panne PP5230 est stable pendant toute la durée de l'action thermique T1.

Stabilité d'un poteau

La stabilité d'un poteau peut être étudiée soit en faisant un calcul de résistance en compression et au flambement, (calculs de type CIMFEU), soit en simulant le poteau à l'aide d'un logiciel éléments finis et en contrôlant les déplacements. Pour les poteaux du mur coupe feu et les poteaux de façade, la courbure provoquée par le gradient thermique est très sévère. Il est nécessaire d'en tenir compte dans la vérification de la stabilité au flambement.

Poteau PO5050 avec feuillure (mur CF): hauteur 12,33 m, charge répartie 49,1 kN/ml, charge en tête 320 kN, encastré en pied, appui simple en tête.
Poteau PO5050 (façade, engravure jusqu'à 5,55 m): hauteur 12,33 m, charge répartie 28,9 kN/ml, charge en tête 186 kN, encastré en pied, appui simple en tête.

La figure 38 donne l'évolution de la flèche maximale d'un poteau PO5050 avec feuillure, positionné dans un mur coupe-feu (dx-CF) et d'un poteau de façade (dx-E). La simulation est faite sous feu ISO. La hauteur du poteau est de 12,33 m.

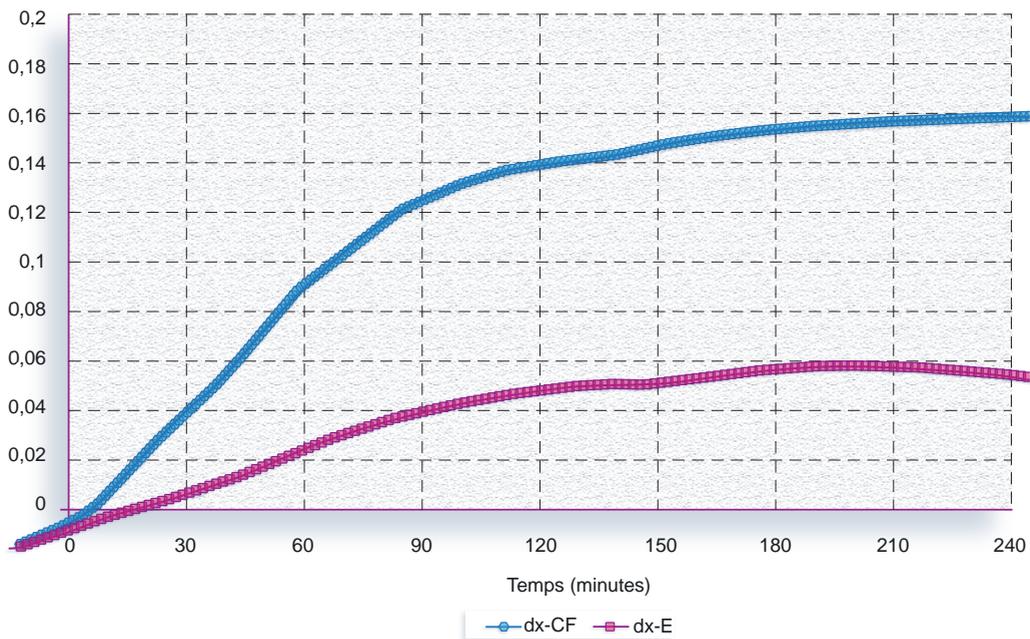


Figure 38: déplacement horizontal, poteau PO5050-f du mur coupe-feu et poteau PO5050E de façade, feu ISO.

Le déplacement horizontal du poteau à mi-hauteur traduit la courbure du poteau sous l'action du fort gradient thermique dans la section. On n'observe aucune variation brutale de la déformée, ce qui indique qu'on n'atteint pas la ruine par flambement. Cette conclusion est valable si les poteaux restent maintenus en tête. C'est

le cas pour le poteau du mur coupe-feu, dont les poutres de la cellule non exposée au feu assurent le maintien. En revanche, les poutres et les pannes qui tiennent les poteaux de façade en tête ont une durée de stabilité plus faible (respectivement 113 et 50 minutes). À partir de la ruine des poutres, le schéma statique change. Si on simule un poteau simplement encasté en pied et non tenu en tête (console), la durée de stabilité au feu est de 87 minutes. En conséquence, la durée de stabilité des poteaux extérieurs est conditionnée par celle des poutres.

De la même façon les poteaux centraux P05050 ont une durée de stabilité limitée à celle des poutres (113 minutes).

Le poteau du mur coupe-feu est stable au feu ISO pendant 4 h.

La durée de stabilité des poteaux centraux est conditionnée par celle des poutres qui les maintiennent en tête soit 113 minutes.

La durée de stabilité des poteaux de façades est conditionnée par celle des poutres qui les maintiennent en tête :

- 50 minutes dans le sens des pannes

- 113 minutes dans le sens des poutres

Pour les poteaux situés en zone centrale des cellules, l'action thermique du feu localisé T1 produit des échauffements beaucoup plus faibles que ceux obtenu ci-dessus. On ne présente donc pas de résultats pour ce cas, la stabilité du poteau pendant la durée du scénario est assurée, parce que ce scénario n'affecte pas la stabilité des poutres et des pannes qui tiennent les poteaux en tête.

Le poteau du mur coupe-feu est stable pendant toute la durée de l'action thermique T1 (feu localisé).

■ Calcul en portique 2D

La vérification de critères de sécurité associés aux calculs de la réponse de la structure sous l'action du feu naturel nécessite l'étude du comportement de la structure générale, en particulier pour analyser la cinématique de ruine (ruine en chaîne, ruine vers l'extérieur). En particulier, il est nécessaire de vérifier la capacité des liaisons à résister aux efforts spécifiques induits par l'incendie. Ces efforts sont dus aux dilatations gênées et aux déformations relatives des éléments assemblés. Aujourd'hui, il n'existe pas de méthode codifiée pour vérifier ce point. Une étude au cas par cas est nécessaire. Dans le cadre du présent guide, on suppose que les liaisons sont suffisamment résistantes pour garantir la validité des schémas

structuraux pendant toute la durée des sollicitations thermiques étudiées. Cette hypothèse revient à supposer que la ruine des liaisons n'est pas le facteur déterminant de la stabilité des portiques étudiés.

Cette hypothèse doit être justifiée pour chaque étude particulière. Elle ne peut être faite dans le cas général.

Risque de ruine en chaîne

Il est nécessaire de tenir compte du comportement de la structure de la cellule exposée au feu et de celle des autres cellules. On choisit ici de représenter les cellules non exposées au feu par la raideur globale en flexion de leurs poteaux non chauffés, ce qui a pour avantage de simplifier le modèle mécanique. En effet, la structure des cellules est connectée par les poutres qui ont à froid une raideur très grande par rapport à la raideur en flexion de poteaux. Les cellules adjacentes sont donc représentées par un ressort horizontal élastique, dont la raideur est calculée à partir des raideurs des poteaux restés froids. Ce ressort limite les déplacements en tête des poteaux mitoyens à deux cellules. Il faut vérifier ensuite que les structures non exposées restent bien dans leur comportement élastique pendant la durée de l'incendie, c'est-à-dire que les déplacements imposés par la cellule en feu ne provoquent pas la fissuration des sections non exposées au feu.

La raideur équivalente R du ressort représentant n poteaux non exposés au feu est donnée par la formule :

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{3EI_i}{h_i^3}$$

Où :

- I est le moment d'inertie du poteau ; soit $0,0052 \text{ m}^4$ pour les poteaux PO5050,
- h sa hauteur, soit $13,38 \text{ m}$,
- E le module d'Young instantané du béton armé, ici 35 GPa .

Dans le cas étudié, le ressort équivalent a une raideur de $2\,735 \text{ kN/m}$. Il représente la raideur de 12 poteaux non exposés au feu. Ensuite, on vérifie que la section des poteaux n'est pas fissurée en s'assurant que le déplacement en tête du poteau dans le mur coupe-feu reste inférieur à la valeur provoquant la mise en traction de la fibre extrême du poteau. La raideur des poutres dans leur plan est très supérieure à celle des poteaux en flexion, on peut considérer que les déplacements imposés en tête de poteaux de la structure non exposés sont répartis au prorata des inerties de flexion des poteaux. Un calcul élastique montre que lorsque le déplacement en tête courant ne dépasse pas 23 cm , le modèle de ressort élastique est valide.

Risque de ruine vers l'extérieur

On utilise le même modèle que précédemment. Le poteau de façade est tenu en tête par le reste de la structure selon la file considérée. On contrôle alors la valeur des déplacements horizontaux de la tête du poteau de rive.

Simulations sous feu ISO

On s'intéresse dans un premier temps au portique dans le sens des poutres IE105.

Portique dans le sens des poutres IE : hauteur des poteaux 12,33 m et 11,60 m.

Charges réparties :

Poutres : 15,5 kN/m

Poteaux de façade : 28,45 kN/m

Poteaux courants : 5,9 kN/ml,

Charge en tête 320 kN,

Poteaux encastré en pied.

Le portique est symétrique en géométrie et en chargement. On ajoute une condition de déplacement nul au milieu du portique pour assurer cette symétrie. Pour comparaison, les résultats sans cette condition supplémentaires sur la symétrie sont présentés sur la figure 39.

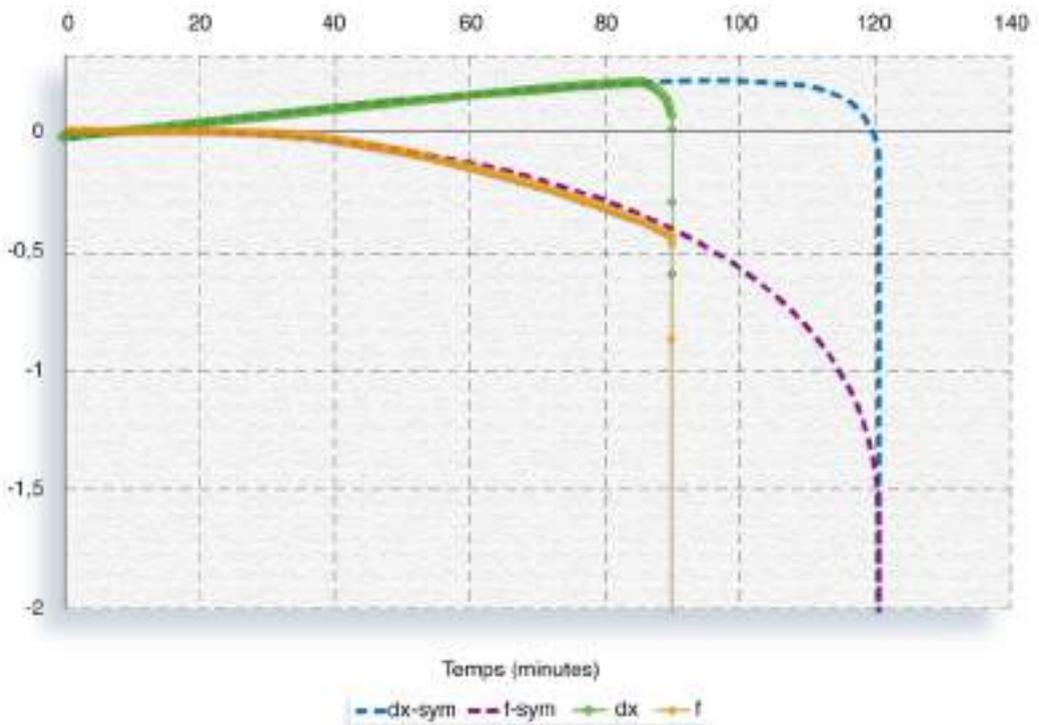


Figure 39 : modélisation du portique dans le sens des poutres IE 105, feu ISO

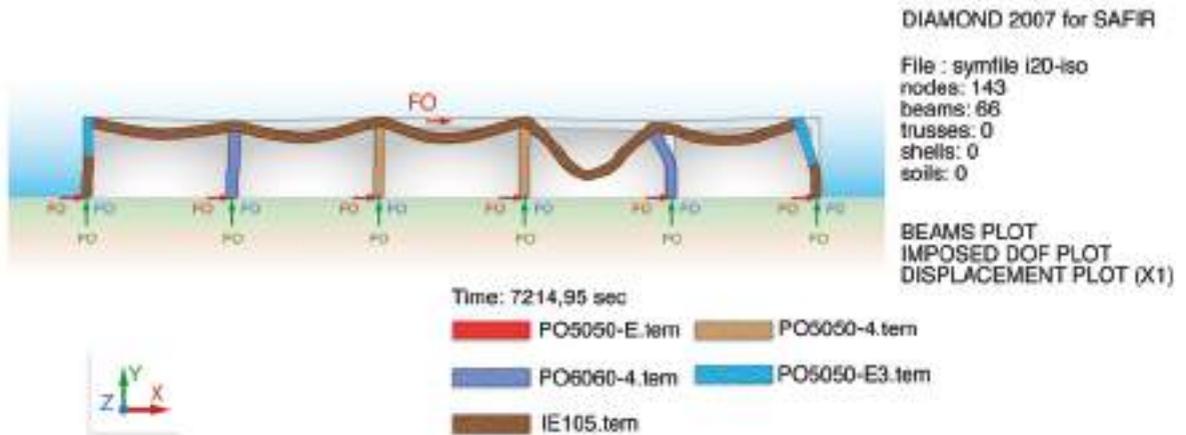


Figure 40: allure de la déformée juste avant l'effondrement du portique

Il apparaît clairement sur le graphique ci-dessus que la condition de symétrie permet d'éviter des instabilités numériques. Les durées de stabilité obtenue et les modes de ruines sont compatibles avec le résultat des calculs éléments par éléments: L'effondrement du portique est dû à la ruine de la poutre en flexion. Le fait de prendre en compte l'ensemble de la structure permet de redistribuer des efforts et aboutit à un (faible) gain de résistance, ce qui permet ici de justifier une durée de stabilité de 2 heures, alors que l'étude de la poutre seule aboutissait à une durée de 113 minutes.

La structure est stable au feu ISO pendant 2 h.

On s'intéresse maintenant au portique dans le sens des pannes.

Portique dans le sens des pannes PP: hauteur des poteaux 13,60 m.

Charges réparties :

Pannes: 4,42 kN/ml

Poteaux de façade: 28,45 kN/ml

Poteaux courants: 5,9 kN/ml,

Poteaux du mur coupe-feu: 48,65 kN/ml

Charge en tête:

Poteau de façade 160 kN,

Poteaux intermédiaire et mur coupe-feu: 319 kN

Poteaux encastré en pied, ressort de 2,735 MN/m en tête du mur coupe-feu.

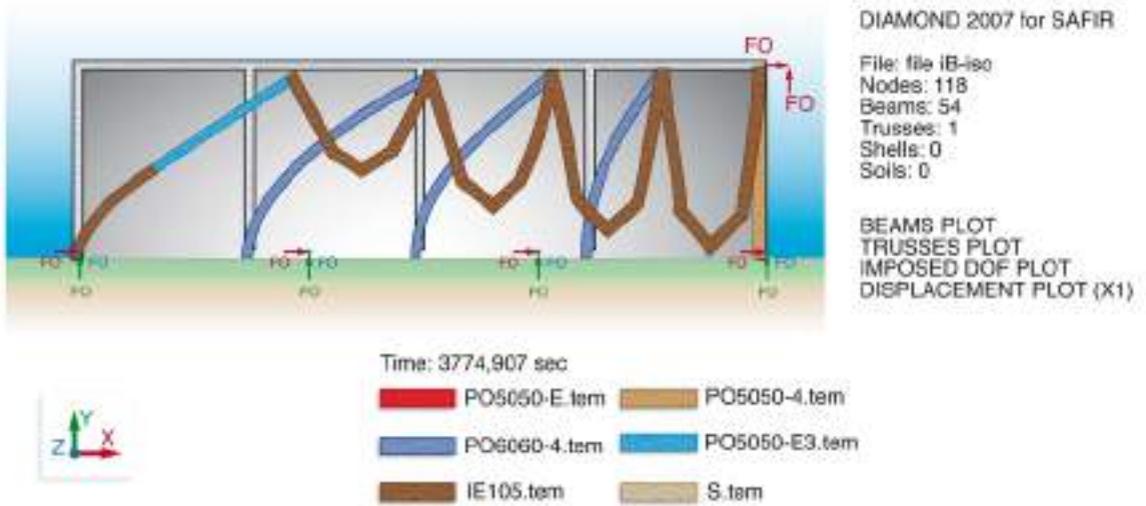


Figure 41 : allure de la déformée du portique juste avant l'effondrement

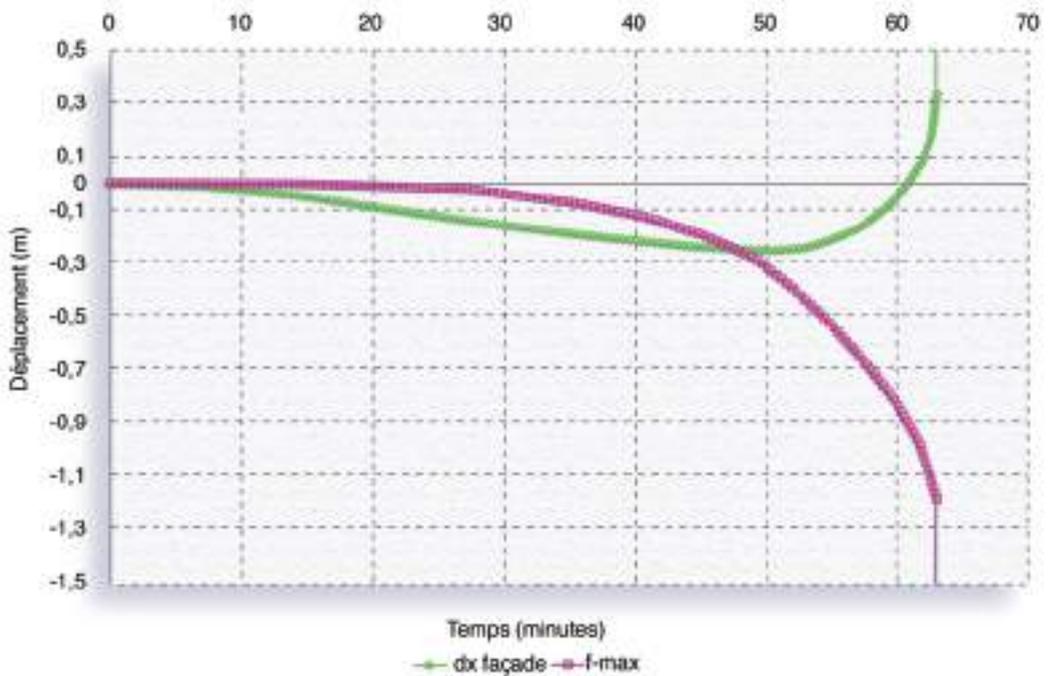


Figure 42 : déformation des pannes

On note qu'en tête de poteau, la déformation est d'abord vers l'extérieur ($dx < 0$) puis les grands déplacements de la panne et sa ruine imposent un déplacement de la façade vers l'intérieur. La stabilité du portique dépasse significativement celle de

la panne si elle est considérée seule (50 minutes). Une explication peut être trouvée en examinant les efforts dans la panne. La figure ci-dessous montre l'évolution des efforts dans la panne la plus déformée (côté mur coupe-feu).

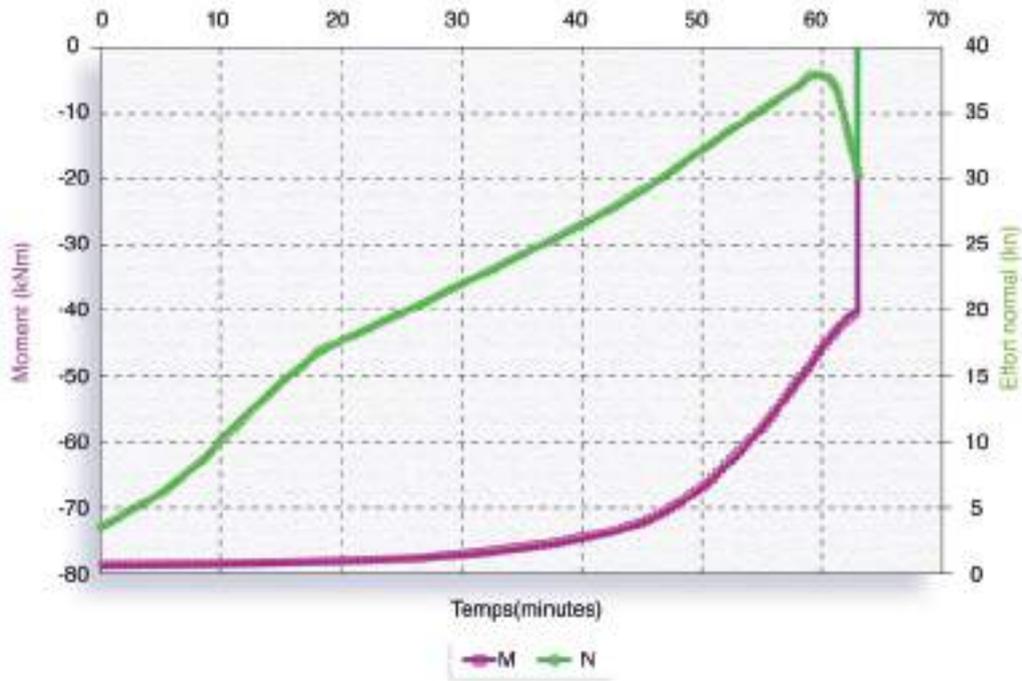


Figure 43 : évolution de l'effort normal et du moment de flexion dans les pannes

Les pannes sont soumises à de la traction car la déformation du poteau de façade vers l'extérieur sous l'effet du gradient thermique est retenue par les pannes. Lorsque la résistance de la panne en flexion composée est dépassée, l'équilibre est assuré par un fonctionnement en chaînette qui se traduit notamment par une brusque chute du moment sollicitant (vers 40 minutes). La modélisation de la structure complète permet là encore un petit gain de stabilité.

La structure dans le sens des pannes est stable au feu ISO 1 heure.

Simulation d'un incendie de canton

La figure 44 montre le modèle 2D de la structure d'une cellule de rive, dans le sens des poutres. On considère que qu'un canton situé en façade est exposé au feu. La structure des autres cellules est représentée par le ressort horizontal à droite de la figure. On examine le cas d'un feu de cellule. Dans les premières minutes de l'incendie, on considère le scénario (feu de canton), en tenant compte du fait que le feu démarre près du poteau central, qui est donc soumis à l'action localisée du scénario 1. La hauteur de couche chaude est de 7,5 m.

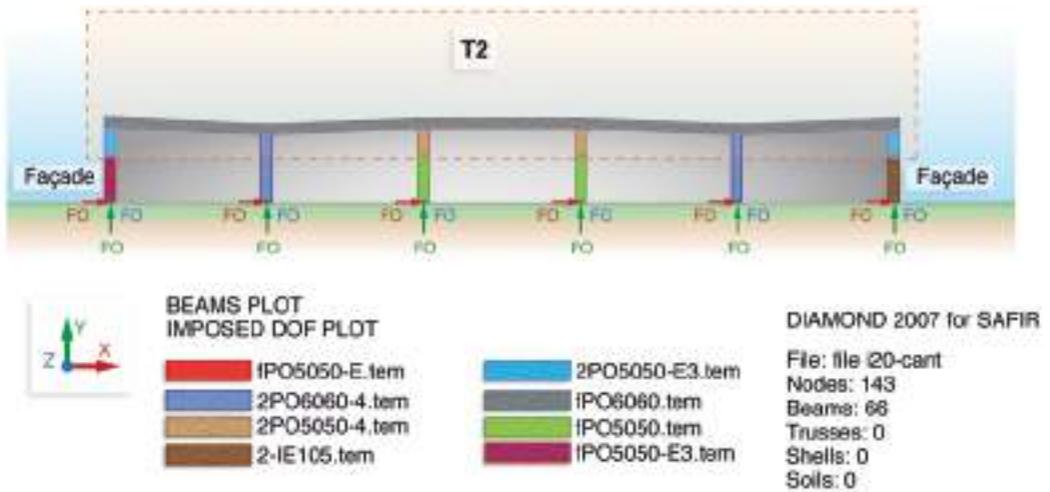


Figure 44 : modèle 2D pour l'incendie de canton (dans le sens des poutres)

La Figure 45 montre le modèle 2D de la structure d'une cellule de rive, dans le sens des pannes. La structure des autres cellules est représentée par le ressort horizontal à droite de la figure. On examine le cas d'un feu de cellule. Dans les premières minutes de l'incendie, on considère le scénario (feu de canton), en tenant compte du fait que le feu démarre près du poteau central, qui est donc soumis à l'action localisée du scénario 1. La hauteur de couche chaude est de 7,5 m.

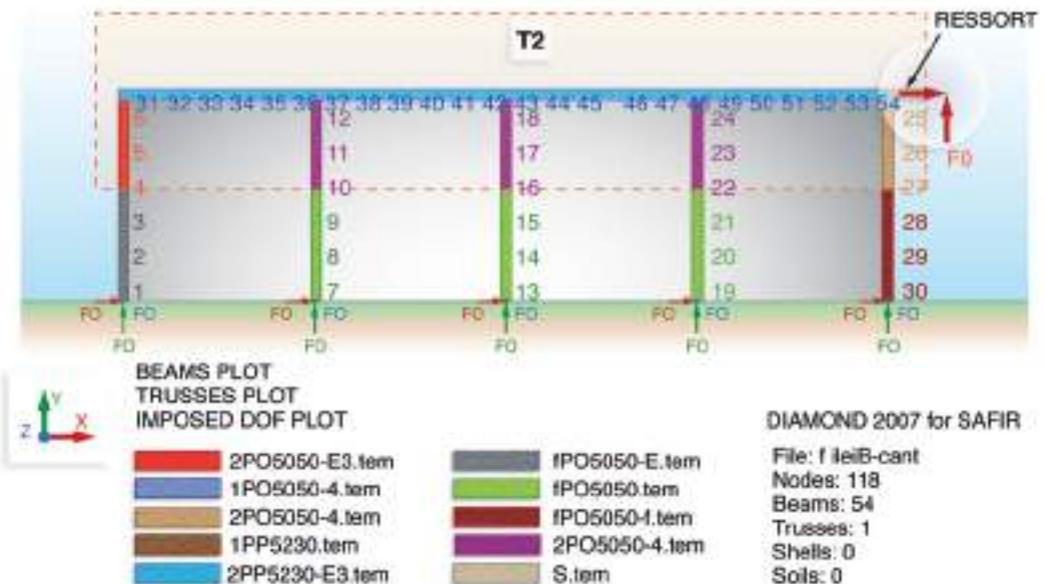


Figure 45 : modèle 2D pour l'incendie de canton (dans le sens des pannes)

Le feu de canton ne remet pas en cause la stabilité de la structure. Les déformées produites restent assez petites. En effet, compte tenu de la courte durée de l'action thermique (35 mn), l'échauffement des sections est encore assez restreint.

Les figures ci-dessous montrent l'allure de la déformée des deux portiques étudiés, avec un facteur d'échelle de 20. Pour le portique dans le sens des pannes, les déplacements maximaux sont de 78 mm horizontalement en tête du poteau de façade (l'amplitude totale du déplacement est de 85 mm sur la durée de cette

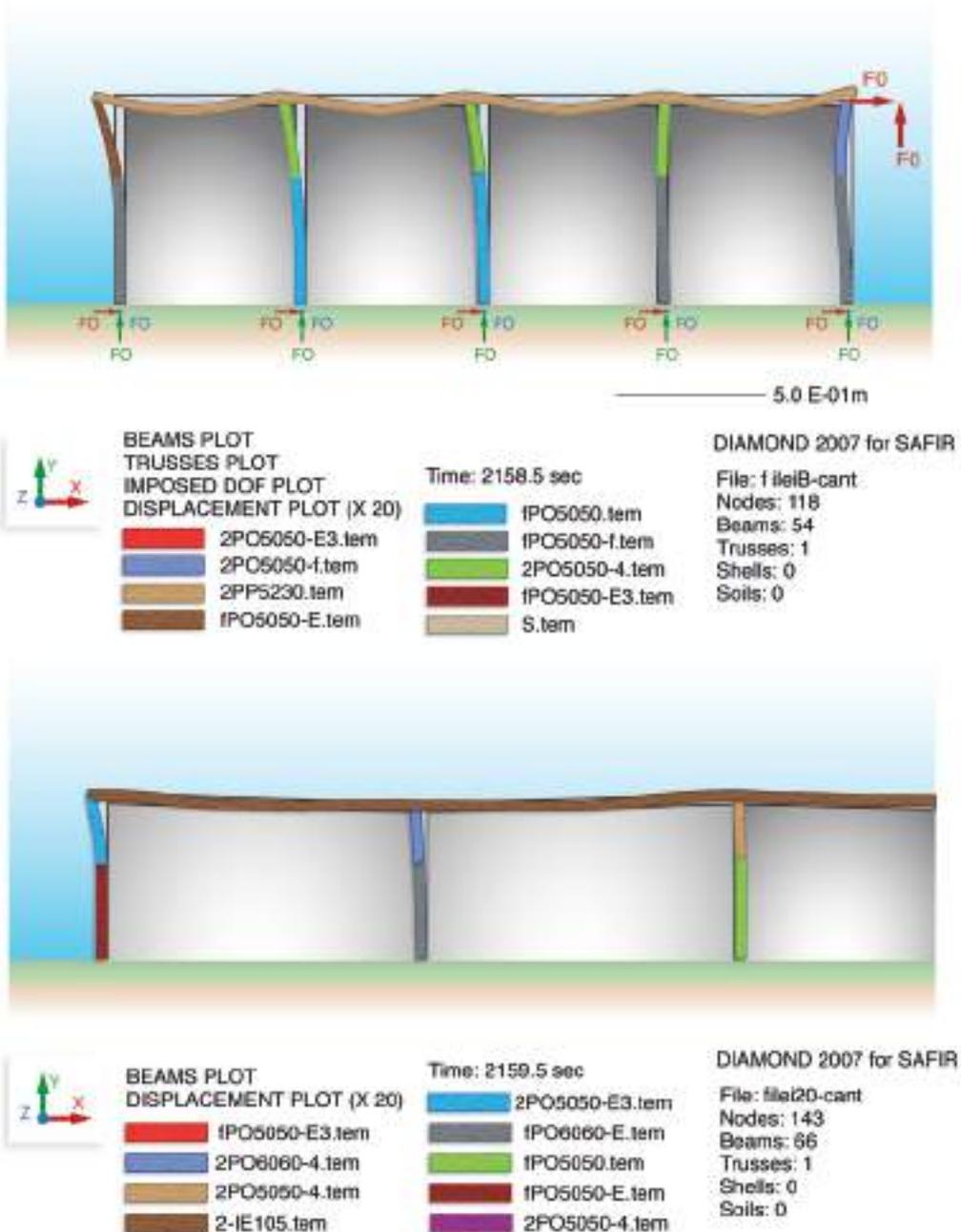


Figure 46: allure de la déformée des portiques avant la ruine (haut: dans le sens des pannes; bas: dans le sens des poutres)

action thermique) et de 37 mm verticalement à mi-travée des pannes. Pour le portique dans le sens des poutres, les déplacements maximaux sont de 44 mm horizontalement en tête du poteau de façade (l'amplitude totale du déplacement est de 60 mm sur la durée de cette action thermique) et de 20 mm verticalement à mi-travée des pannes.

La structure dans le sens des pannes est stable pendant toute la durée du scénario de feu de canton.

Simulation d'un incendie de cellule

Tous les éléments de structures sont exposés à une température uniforme de 900 °C. On calcule la durée de stabilité de la structure sous cette action. Le calcul est donc poursuivi jusqu'à la ruine.

Les poutres IE105 et les pannes PP5230 sont exposées sur toute leur périphérie (4 faces exposées) car pour ce scénario, on considère que la couverture a disparu. En revanche, les poteaux de façade sont toujours exposés sur 3 faces car le bardage béton est supposé rester en place jusqu'à la ruine de la structure.

Résultats

Dans le sens des pannes la durée de stabilité du portique sous un feu de cellule est de 50 minutes.

La structure dans le sens des pannes est stable pendant 50 minutes pour le scénario de feu de cellule.

9. Synthèse de la vérification des principaux critères de sécurité

9.1 - Stabilité sous feu ISO

Les résultats sont présentés pour la **cellule 1**.

On conduit une première analyse élément par élément à l'aide du logiciel CIMFEU, pour les éléments de structure qui appartiennent à son domaine d'utilisation, à savoir les pannes PP5230, les poutres IE105 et les poteaux carrés.

Parallèlement, une simulation à l'aide du logiciel SAFIR est faite pour l'ensemble des éléments de la structure. Le critère de ruine est alors :

- Pour les poutres :
 - soit une chute brutale de la flèche à mi-portée ;
 - soit un dépassement de la résistance en cisaillement (vérification manuelle effectuée pour le champ de température au temps indiqué) ;
- Pour les poteaux :
 - Une variation brusque du déplacement à mi-hauteur qui indique le flambement du poteau.

Remarques : toutes les poutres étant isostatiques, la vérification de la rotation limite n'est pas requise. Lorsque le logiciel CIMFEU est utilisé, les vérifications sont faites pour différentes durées de stabilité. On retient la plus grande durée pour laquelle tous les critères de stabilité au feu sont satisfaits.

La structure de l'entrepôt est stable au feu ISO pendant 1 h.

9.2 - Absence de ruine en chaîne et de ruine vers l'extérieur

Les résultats ont été présentés pour la **cellule 5**.

Pour les scénarios de feu localisé ou de feu de canton, aucune ruine n'est constatée.

La structure tend à se déformer vers l'extérieur, mais la stabilité est assurée. Les critères d'absence de ruine en chaîne et de ruine vers l'extérieur sont donc vérifiés.

Pour ce qui est du scénario de feu de cellule, la ruine se produit au bout de 50 minutes. La ruine des éléments horizontaux (poutres, pannes) intervient en premier, ce qui assure que l'ensemble de la structure s'effondre vers l'intérieur. De plus, il a été vérifié que les poteaux du mur coupe-feu ont une durée de stabilité bien plus grande que celle des pannes. En conséquence, le risque de ruine en chaîne est écarté.

Les critères d'absence de ruine en chaîne et d'absence de ruine vers l'extérieur sont respectés pour la structure étudiée.



INSTALLATIONS CLASSÉES ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

LIVRE II - EXPLOITATION DU LOGICIEL FLUMILOG

- > Analyse de la prise en compte des parois et de la structure
- > Études de cas pour les structures, les écrans thermiques et les implantations de bâtiments

Introduction

Dans le cadre du groupe de travail du GT Entrepôt, le MEEDDM a sollicité les compétences de l'INERIS et du CNPP pour étudier la mise en œuvre d'une méthode de calcul des effets thermiques relatifs consécutifs aux incendies d'entrepôts de stockage soumis à la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement. En effet, dans le cadre des études des dangers relatifs aux entrepôts de stockage et notamment à la modélisation des distances d'effets thermiques associés aux incendies, les outils de calcul utilisés par la majorité des bureaux d'étude sont fondés sur les essais réalisés avec des feux de liquides types hydrocarbures (voir Rapport Oméga 2 de l'INERIS « Feux de nappe »). Les hypothèses sont ensuite adaptées en fonction des cas étudiés et très divergentes d'un bureau d'étude à l'autre.

Fin 2009, il ressort de ce groupe de travail auxquels sont venus s'associer IRSN et Efectis, une méthode de calcul de référence sous forme d'un logiciel, Flumilog, pour évaluer les distances d'effets associés aux effets thermiques (8, 5 et 3 kW/m²). Les arrêtés du 15 avril 2010 relatifs aux rubriques 1510, 1511, 1530, 2662 et 2663 imposent une implantation de l'entrepôt à une distance minimale des limites du site calculée de façon à maintenir, en cas d'incendie, les effets létaux représentés par le flux de 5 kW/m² dans l'enceinte de l'établissement en prenant en compte la configuration la plus défavorable. Ces arrêtés précisent que cette distance minimale doit être calculée par la méthode de calcul Flumilog.

Le logiciel Flumilog disponible sur le site de l'INERIS, <http://www.ineris.fr/Flumilog/>, prend en compte des paramètres essentiels dans la construction des entrepôts, tels que la nature de la toiture et de la structure, la composition des parois... Cette méthode se rapproche ainsi de la réalité. Des essais à moyenne (96 m²) et grande échelle (860 m²) ont été réalisés afin de paramétrer le logiciel et de valider la méthode de calcul.

Afin d'évaluer l'impact de la nature des structures des bâtiments de stockage sur la modélisation des distances d'effets thermiques associés aux incendies, Safrege a étudié différents scénarios en intégrant divers types de marchandises, divers modes de stockage et diverses natures de structure.

La version utilisée pour la réalisation de la présente étude est : **Flumilog v2.01**.

● I Étude du logiciel Flumilog® 2.01	
Analyse de la prise en compte des parois et de la structure	107
1. Présentation du logiciel	108
1.1 Domaine d'application	108
1.2 Principe de la méthode	108
1.3 Les données d'entrées	110
1.3.1 Conditions extérieures	110
1.3.2 Géométrie de la cellule	110
1.3.3 Données de toiture	111
1.3.4 Parois de la cellule	111
1.3.5 Prises en compte de merlon	113
1.3.6 Mode de stockage	113
1.3.7 Prise en compte des combustibles présents	114
1.4 Prise en compte de la propagation de l'incendie dans la cellule	114
1.5 Caractérisation des flammes	116
1.5.1 Hauteur de la flamme	116
1.5.2 Emission de la flamme	117
1.6 Calcul des distances d'effets en fonction du temps	117
1.6.1 Calcul des flux reçus	117
1.6.2 Seuils réglementaires	117
2. Cahier des charges	119
2.1 Les paramètres étudiés	119
2.2 Présentation des scénarios étudiés	119
2.2.1 Cellule de référence	119
2.2.2 Variation des paramètres	120
3. Exploitation des résultats	121
3.1 Résultats de la cellule de référence	121
3.1.1 Remarques	122
3.1.2 Résultats obtenus	122
3.2 Influence de la toiture	123
3.2.1 Nature de la toiture	123
3.2.2 Pourcentage de désenfumage	124

3.3	Influence d'un écran thermique	125
3.4	Influence de la résistance au feu de la structure de la toiture	126
3.5	Influence combinée de la structure et de la nature des parois	127
3.6	Influence des matières stockées	128
3.6.1	Stockage de produits relevant de la rubrique 2663	128
3.6.2	Stockage de produits 2663 sans prise en compte d'écran thermique	129
3.6.3	Stockage de produits 2663 avec prise en compte d'un écran thermique	130
3.7	Influence du degré coupe-feu	131
3.8	Influence du mode de stockage	132
3.8.1	Stockage en masse	132
3.8.2	Sens des racks	132
3.9	Cas de l'incendie sur trois cellules	133
4.	Conclusion	136

● 2	Étude du logiciel Flumilog® 2.01 – Rapports	137
	Annexe 1 - scenarios de simulation	138
	Annexe 2 - rapport Flumilog - essai 1	142
	Annexe 3 - rapport Flumilog - essai 2	151
	Annexe 4 - rapport Flumilog - essai 3	157
	Annexe 5 - rapport Flumilog - essai 4	163
	Annexe 6 - rapport Flumilog - essai 5	169
	Annexe 7 - rapport Flumilog - essai 6	175
	Annexe 8 - rapport Flumilog - essai 7	181
	Annexe 9 - rapport Flumilog - essai 8	187
	Annexe 10 - rapport Flumilog - essai 9	193
	Annexe 11 - rapport Flumilog - essai 10	199
	Annexe 12 - rapport Flumilog - essai 11	205
	Annexe 13 - rapport Flumilog - essai 12	211
	Annexe 14 - rapport Flumilog - essai 13	217
	Annexe 15 - rapport Flumilog - essai 14	223
	Annexe 16 - rapport Flumilog - essai 15	235

Chapitre

1

Étude du logiciel

Flumilog[©] 2.01

Analyse de la prise
en compte des parois
et de la structure

1. Présentation du logiciel

1.1 - Domaine d'application

La méthode concerne principalement les stockages de grande hauteur (à simple de rez-de-chaussée ou à multi-étages) de matières combustibles solides entrant dans les rubriques ICPE suivantes.

- 1510 : Entrepôt de stockage de plus de 500 tonnes de matières combustibles.
- 1511 : Entrepôt frigorifique (en cours de création).
- 1530¹ : Stockage de bois, cartons, papiers et produits analogues.
- 2662 : Stockage de polymères.
- 2663 : Stockage de produits dont 50 % au moins de la masse totale unitaire est composée de polymères.

Cette méthode permet de calculer l'incendie d'une cellule de stockage et d'étudier la propagation de l'incendie aux cellules voisines conformément à la circulaire du 8 juillet 2009 dans le cadre des études des dangers.

Les distances d'effets des flux thermiques sont calculées en considérant :

1. l'absence totale de moyens de secours et d'extinction ;
2. la propagation de l'incendie et sa puissance au cours du temps ;
3. les protections passives (murs séparatifs coupe-feu pour éviter la propagation de l'incendie).

1.2 - Principe de la méthode

Cette nouvelle méthode est fondée sur la cinétique de l'incendie et de son évolution dans le temps. La méthode permet de modéliser l'incendie depuis l'inflammation jusqu'à l'extinction par épuisement du combustible. Elle prend en compte la structure et les parois de la cellule ainsi que leurs évolutions tout au long de

¹ Potentiellement, FLUMILOG pourra être également utilisé pour la nouvelle rubrique 1532 – stockage de bois sec – créée par le décret du 13 avril 2010.

l'incendie. Les flux thermiques sont calculés à chaque instant en fonction de la progression de l'incendie dans la cellule et de l'état de la couverture et des parois. La méthode permet également de calculer la propagation de l'incendie aux cellules voisines (3 cellules maximum).

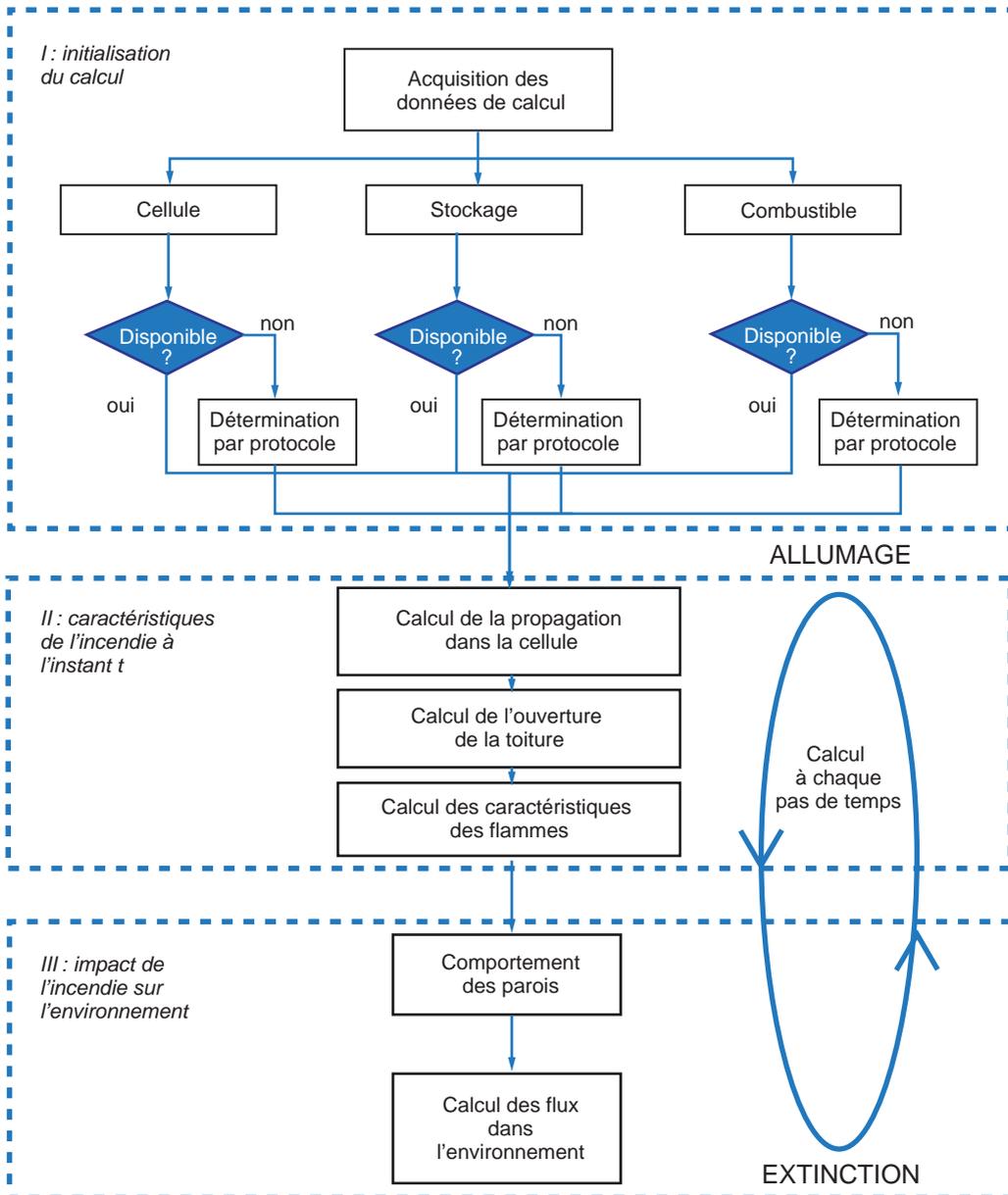


Figure 47: principe de la méthode Flumilog- source INERIS 2010

1.3 - Les données d'entrées

Les données d'entrées sont présentées de façon similaire à l'apparition des données dans le logiciel Flumilog. Elles peuvent être renseignées à travers le mode manuel ou le mode assistant. Lorsque certains paramètres ne sont pas connus, des valeurs par défaut sont proposées par le logiciel.

■ 1.3.1 - Conditions extérieures

Il s'agit de la hauteur de la cible. Par défaut, celle-ci est calée à 1,8 m, mais le logiciel permet une modification aisée de cette valeur.

■ 1.3.2 - Géométrie de la cellule

Ces paramètres concernent les dimensions de la cellule et la nature de la toiture.

• **Dimension des 4 parois (m) :** dimension intérieure de la cellule. Possibilité d'intégrer des géométries complexes (non rectangulaire) avec des coins tronqués en diagonale ou en équerre.

coins

L1	L2
0,0 m	0,0 m

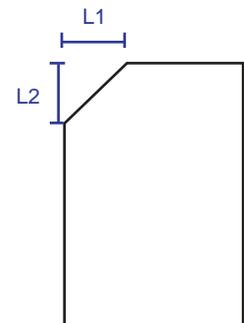


Figure 48 : exemple de coin tronqué en diagonale

• **La hauteur de la cellule (m) :** valeur moyenne sous-face de couverture. Possibilité d'intégrer des hauteurs complexes.

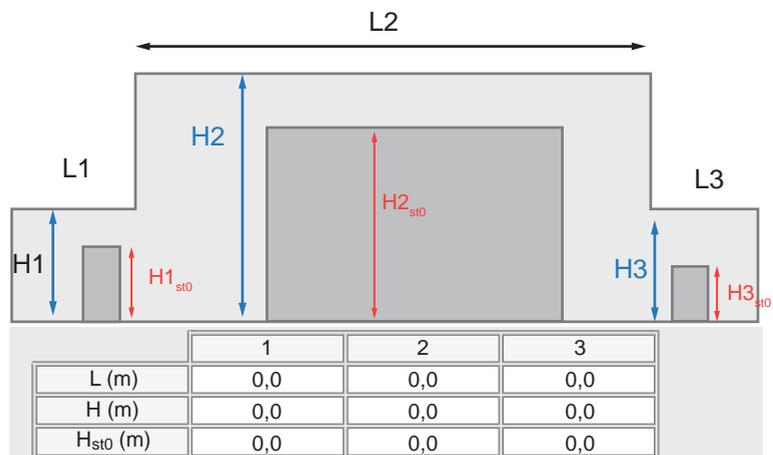


Figure 49 : exemple de hauteur complexe

■ 1.3.3 - Données de toiture

- Résistance au feu des poutres et des pannes en minute.
- Nature de la couverture : le choix de la nature se fait à travers un menu déroulant dont les propositions sont présentées dans la figure ci-dessous.

Matériaux constituant la couverture	Fibrociment
Résistance au feu de la dalle (min)	Fibrociment
Mode de définition des exutoires	Métallique simple peau
% d'exutoire en surface utile (%)	Métallique multicouche (bac acier)
Nombre d'exutoires	Panneaux sandwich-polyurethane
	Panneaux sandwich-laine de roche
	Panneaux béton
	Dalle béton

Figure 50 : choix de la nature de la couverture

Remarque : si le choix se porte sur la dalle béton, il faudra préciser la résistance au feu de la dalle, en minute.

Mode définition des exutoires :

- pourcentage : préciser le pourcentage de désenfumage en surface utile ;
- ou quantité : préciser le nombre d'exutoires et leurs dimensions (longueur « 3 m par défaut » et largeur « 2 m par défaut » en m).

■ 1.3.4 - Parois de la cellule

Pour chaque paroi de la cellule, les paramètres suivants doivent être renseignés. À ce stade, il est de possible diviser la paroi en 4 sous-parois de natures différentes ; il s'agit de parois « multicomposants ».

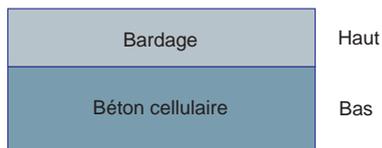


Figure 50 : Exemple d'une paroi « multicomposants »

- Structure support : le choix de la nature se fait à travers un menu déroulant dont les propositions sont présentées dans la figure 51, ci-dessous.

Structure support	Autostable
R(i) : Résistance au feu Structure support (min)	Autostable
Mode définition des portes	Poteau Acier
Surface totale des portes ce quai par paroi (m ²)	Portique Acier
Nombre de portes de quais	Poteau béton
	Portique béton
	Poteau bois
	Portique bois

Figure 51 : choix de la structure support

- Résistance au feu de la structure : exprimée en minute.
- Mode de définition des portes de quais :
 - surface totale (m²) pour chaque paroi,
 - ou quantité : nombre, largeur et hauteur des portes de quais.
- Matériau de la paroi

Matériau	Bardage simple peau
E : Etanchéité aux gaz chauds (min)	Bardage simple peau
I : Critère d'isolation de la paroi (min)	Bardage double peau
	Béton Arme/Cellulaire
	Parpaings/Briques

Figure 52 : Choix du matériau de la paroi

- Degré des caractères R E I de la paroi et degré de résistance au feu des systèmes d'attache aux poteaux Y : exprimés en minute.
- Largeur de la paroi (m) : pour les parois multicomposants uniquement.
- Hauteur de la paroi (m) : pour les parois multicomposants uniquement.

■ 1.3.5 - Prises en compte de merlon

Flumilog permet la prise en compte des effets atténuateurs des merlons. Ce paramètre ne sera pas étudié dans cette étude.

■ 1.3.6 - Mode de stockage

1.3.6.1 - Généralités

- Nombre de niveaux : il correspond au nombre de niveau de rack ou au nombre de palettes empilées pour un stockage en masse.
- Taux d'occupation² : en pourcentage.
- Mode de stockage : rack ou masse³.

1.3.6.2 - Dimensions du stockage

- Longueur du stockage.
- Longueur de la zone de préparation ou du déport avec la paroi considérée.
- Hauteur maximum de stockage.
- Hauteur du canton.
- Écart entre le haut du stockage et le canton.

1.3.6.3 - Stockage en rack

- Choix du sens du rack en fonction de la paroi 1 ou 2.
- Nombre de double rack et/ou de simple rack.
- Largeur d'un double rack et/ou de simple rack.
- Largeur des allées entre les racks.

2 Ce paramètre n'est plus demandé dans la version 2.01.

3 L'option « stockage en masse » n'est pas encore opérationnelle.

■ **1.3.7 - Prise en compte des combustibles présents**

1.3.7.1 - Dimensions de la palette

- Longueur de la palette (m).
- Largeur de la palette (m).
- Hauteur de la palette (support + chargement) (m).

Ce module permet de calculer le volume d'une palette et la capacité maximum de palettes de la cellule.

1.3.7.2 - Composition de la palette

À ce stade il est possible soit de sélectionner une palette type en fonction d'une rubrique ICPE (1510/1511/2662), soit de remplir la composition d'une palette en renseignant la masse de combustible présent (bois, plastiques, cartons...).

1.4 - Prise en compte de la propagation de l'incendie dans la cellule

Le point d'inflammation est considéré, de façon majorante, au centre géométrique du stockage (hors zone de préparation) et au niveau du sol. Ce mode de propagation conduit à la plus grande surface en feu le plus rapidement possible.

La propagation de l'incendie se fait par rayonnement au départ et ensuite par embrasement de la couche chaude quand l'incendie prend de l'ampleur. La couche chaude est constituée de fumées très chaudes qui ne sont pas évacuées par les exutoires. Cette couche chaude peut conduire à un flash over (embrasement généralisé des combustibles au dernier niveau de stockage).

La production de couche chaude peut-être évitée si :

- le nombre d'exutoires de fumées est suffisant ;
- la puissance dégagée par l'incendie est faible et produit une couche peu chaude et peu épaisse.

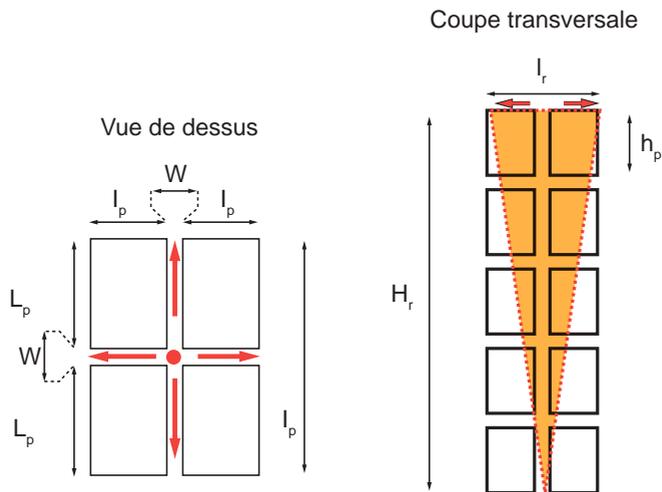


Figure 53 : propagation de l'incendie en largeur dans le rack (INERIS-2010)

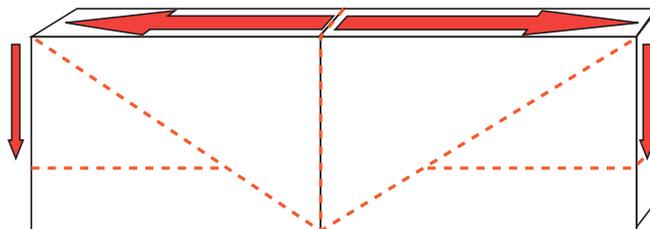


Figure 54 : propagation de l'incendie dans le rack (INERIS -2010)

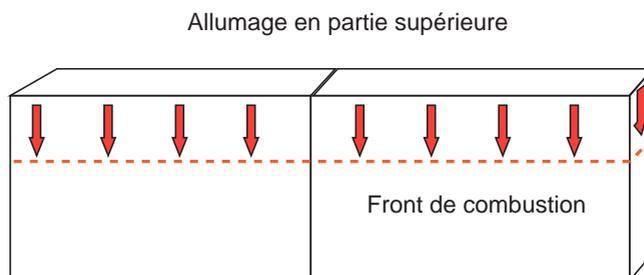


Figure 55 : propagation par couche chaude dans le rack (INERIS-2010)

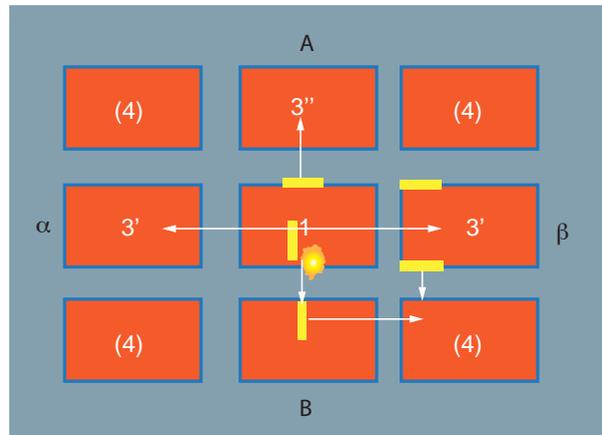


Figure 56 : propagation de l'incendie dans un stockage en masse (INERIS-2010)

1.5 Caractérisation des flammes

Flumilog® se base sur le modèle de la flamme solide qui tient compte :

- de la forme de la flamme ;
- de sa hauteur ;
- de sa position ;
- de son émittance.

■ 1.5.1 - Hauteur de la flamme

La hauteur de flamme est calculée par la corrélation de Zukoski avec une limite à 1,5 fois la hauteur maximale de stockage au-dessus du stockage.

$$H = \text{Hauteur} + \min \left(1.5 \times \text{Hauteur}, \min \left[\left(\frac{Ps'}{223} \right)^2 ; 0,026 (P' s.D)^{2/3} \right] \right)$$

H : hauteur de stockage

P's : puissance surfacique effective (kW/m²)

D : diamètre équivalent (m)

Remarque : la formule est valide si $P's < 14\,130 \sqrt{D}$

■ 1.5.2 - Émission de la flamme

Flumilog estime une émittance moyenne (E_{moy}) de la flamme qui est fonction de la puissance de l'incendie à chaque pas de temps et de la surface de la flamme. L'émittance est calculée par la formule suivante :

$$E_{\text{moy}} = \frac{\sigma_{\text{R}} \cdot P(t)}{S_{\text{flammes}}}$$

σ_{R} : fraction radiative

$P(t)$: pas de temps

S_{flammes} : surface des flammes

Cette émittance moyenne est prise sur la totalité de la flamme (flamme homogène).

Remarque: l'émittance moyenne est moins forte que les puissances émissives pouvant être atteintes en un point donné.

1.6 - Calcul des distances d'effets en fonction du temps

■ 1.6.1 Calcul des flux reçus

Ce calcul est effectué selon le modèle de la flamme solide. Les flux reçus par une cible dépendent de la distance entre la cible et la flamme. Ce flux reçu est calculé par la formule suivante :

$$F = \tau \cdot f \cdot E$$

τ : atténuation atmosphérique = transmittivité de l'air = l'air absorbe une partie du flux émis par la flamme notamment à cause des particules d'eau qu'il contient.

f : facteur de forme = ou facteur de vue représente l'angle entre la source et la cible (depuis la cible). Il représente la distance entre la cible et la flamme.

E : émittance

Selon le rapport INERIS de méthodologie de calcul, l'outil Flumilog® v2.01 permet de calculer à chaque instant le flux reçu en tout point de l'environnement. Au moment de la réalisation de la présente étude, la cinétique n'est pas donnée dans le rapport Flumilog, cependant des données sur la durée de l'incendie sont accessibles dans les fichiers résultats transmis.

■ 1.6.2 - *Seuils réglementaires*

Les distances (si elles existent) correspondent aux flux fixés par la réglementation. Les valeurs de référence sur l'homme pour les installations classées sont les suivantes :

- 3 kW/m², seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine (nommé Z2) ;
- 5 kW/m², seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine (nommé Z1) ;
- 8 kW/m², seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

Les arrêtés d'enregistrement relatifs aux rubriques 1510, 1511, 1530, 2662 et 2663 imposent une implantation de l'entrepôt à une distance minimale des limites du site calculée de façon à maintenir, en cas d'incendie, les effets létaux représentés par les flux de 8 et de 5 kW/m² dans l'enceinte de l'établissement en prenant en compte la configuration la plus défavorable.

Pour les régimes d'autorisation et de déclaration, la réglementation prévoit également que ces 3 valeurs références de distances d'effets thermiques déterminent, en partie, l'implantation de bâtiment. Par exemple pour la rubrique 1510.

- L'arrêté du 5 août 2002 relatif aux entrepôts soumis à autorisation n'impose pas le maintien des effets thermiques dans les limites de propriétés. Il prévoit uniquement que les flux thermiques de 5 et 3 kW/m² n'impactent pas les constructions voisines ou les terrains voisins selon leurs affectations. De plus, le maintien des effets létaux (flux de 8 et de 5 kW/m²) dans les limites de propriétés, est généralement demandé par l'inspection des installations classées.
- L'arrêté du 23 décembre 2008 relatif aux entrepôts soumis à déclaration prescrit le maintien de tous les effets létaux (flux de 8 et de 5 kW/m²) dans les limites de propriétés.

2. Cahier des charges

2.1 - Les paramètres étudiés

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé l'influence de neuf paramètres sur la caractérisation de la flamme. Ces paramètres sont essentiellement :

1. la nature de la structure de la toiture ;
2. la nature de la toiture : bac acier multicouche, dalle béton...
3. la nature de la structure support des parois ;
4. la nature des parois : murs coupe-feu séparatifs, écrans thermiques REI 120, bardage double ou simple peau...
5. le pourcentage de désenfumage ;
6. le degré coupe-feu des parois ;
7. le sens des racks pour le mode de stockage en rack, paramètre peu connu et jamais pris en compte dans la modélisation des incendies d'entrepôt ;
8. la nature des combustibles ;
9. la propagation aux cellules voisines.

Nous étudierons la variation de ces paramètres pour une taille de cellule donnée et une hauteur de stockage donnée. En effet, l'influence de la taille des cellules et la hauteur de stockage sont largement connues.

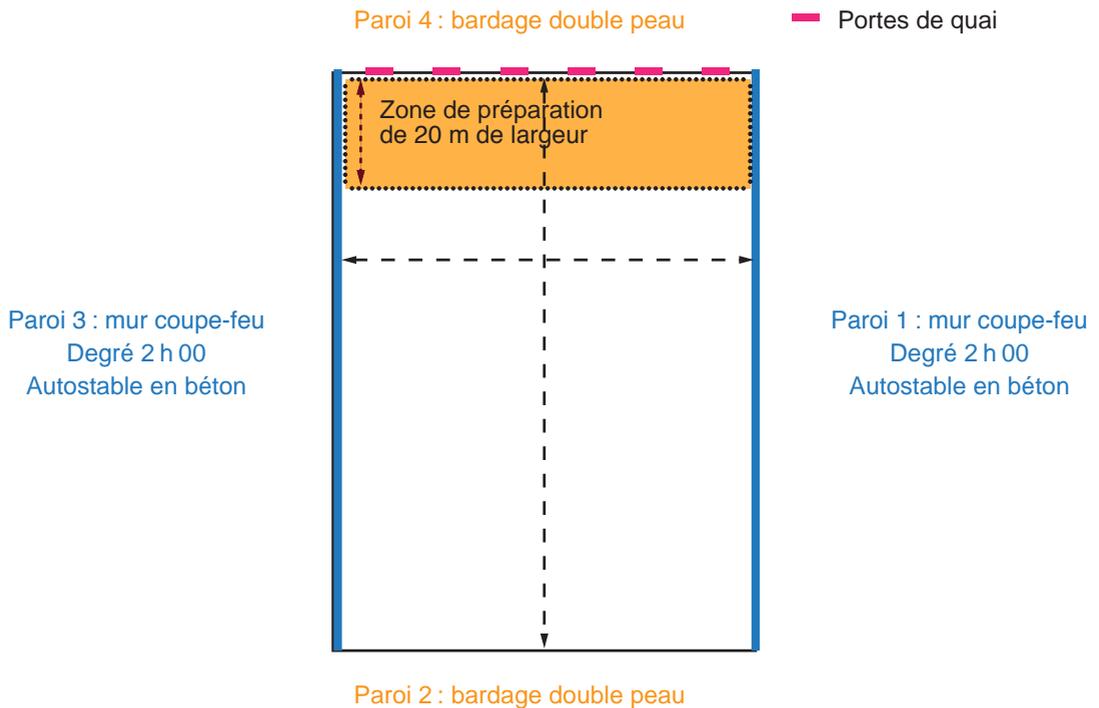
2.2 - Présentation des scénarios étudiés

■ 2.2.1 Cellule de référence

Cellule de 6000 m² au sol, avec une hauteur sous couverture de 12 m. Cette cellule comprend une zone de préparation de 20 m de long. La hauteur maximale de stockage est fixée à 10 m pour un stockage en rack de produits relevant de la rubrique 1510. La toiture est T30/1 (bac acier) avec 2 % de désenfumage. La structure de la cellule est en béton et présente une résistance au feu de 1 h00. La résistance au feu des pannes est de 30 min.

Les parois sont telles que :

- paroi 1 : mur coupe-feu de degré 2 h00 (paroi autostable en béton)
- paroi 2 : façade arrière de la cellule en bardage double peau métallique
- paroi 3 : mur coupe-feu de degré 2 h00 (paroi autostable en béton)
- paroi 4 : façade de quai avec 6 portes de dimension 3×3 m qui sera conservée dans les différents essais.



Cette cellule de référence nous permettra de comparer les variations de paramètres.

■ 2.2.2 - Variation des paramètres

L'étude porte sur 15 essais présentés en ANNEXE 1. Les rapports Flumilog sont fournis en ANNEXE 2 à 16.

Dans la suite de l'étude les murs coupe-feu de degré 2 h00 ou écran thermique REIY120 min sont représentés graphiquement par un trait bleu et les murs coupe-feu de degré 4 h00 ou écran thermique REIY240 min sont représentés graphiquement par un trait rose.

3. Exploitation des résultats

3.1 - Résultats de la cellule de référence

Les résultats graphiques extraits du rapport Flumilog® sont les suivants (essai 1):

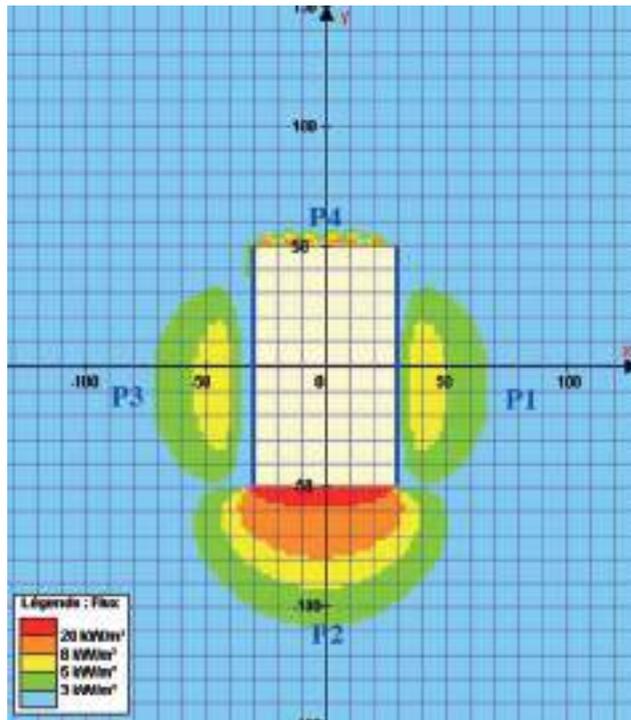


Figure 57: essai 1 (cellule de référence)

Façades rayonnantes	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 1 - P1	na	na	20	35
Paroi 2 - P2	10	30	40	60
Paroi 3 - P3	na	na	20	35
Paroi 4 - quai - P4	< 10	< 10	< 10	< 10

■ 3.1.1 - Remarques

Au vu des résultats et du premier rapport d'étude obtenus, plusieurs remarques importantes d'ordre général sont formulées.

- La version Flumilog v2.01 fournit des distances d'effets significativement plus faibles que la version v1.01.
- Le rapport Flumilog ne fournit pas l'évolution des effets des flux thermiques **au cours du temps**. Cependant, des données cinétiques sont fournies en dehors du rapport; elles se présentent sous la forme d'un tableau indiquant en fonction du temps la puissance du feu, la hauteur de flamme et le pouvoir émissif. À titre d'exemple, le tableau de l'essai 1 est fourni en Annexe 2.
- Les résultats se présentent sous la forme d'un graphique; le rapport ne présente pas de tableau récapitulatif des distances d'effets. L'échelle de graduation du graphe ne permet pas de donner une distance d'effet thermique plus précise qu'à 5 m près.
- On note un décalage entre les résultats des parois P1 et P3, alors que les distances devraient être identiques. On suppose que la représentation graphique est décalée en P3. Ce décalage se retrouve sur tous les essais et était déjà constaté dans la version Flumilog v1.01. Nous considérerons dans la présente étude que les distances d'effets à partir des parois P1 et P3 sont identiques, et nous négligeons donc le décalage graphique de P3.

■ 3.1.2 - Résultats obtenus

- Les distances d'effets sur des parois (P1 et P3) munies de murs coupe-feu de degré 2h00 sont de 20 m pour la Z1 et 35 m pour la Z2; distances d'effets cohérentes avec l'arrêté d'enregistrement 1510 qui impose de **maintenir la Z1 (flux de 5 kW/m²) dans les limites des 20 m**.

Contrairement à la version v 1.01, la méthode Flumilog montre que le mur coupe-feu séparatif est suffisant pour limiter la propagation (absence de flux de 8 kW/m²). Cependant, le scénario de propagation reste à étudier et se justifie par la prise en compte du vent qui peut potentiellement rabattre la flamme en toiture de la cellule voisine.

Au niveau des quais, la présence de la zone de préparation de 20 m permet de limiter considérablement les distances de flux thermiques.

3.2 - Influence de la toiture

3.2.1 - Nature de la toiture

Les essais 2 et 3 étudient l'influence de la nature de la toiture sur les distances d'effets obtenus. Dans ces deux cas, les résistances au feu des poutres et des pannes considérées sont identiques à celle considérées pour la modélisation de la cellule de référence (poutres R60 et pannes R30) ; seule l'influence de la nature de la toiture est étudiée dans ces deux cas.

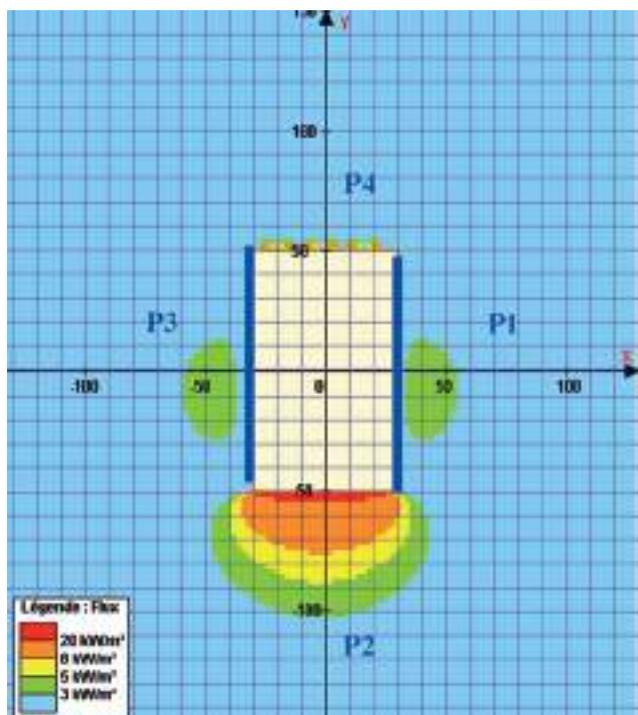


Figure 58: essai 2 (toiture béton)

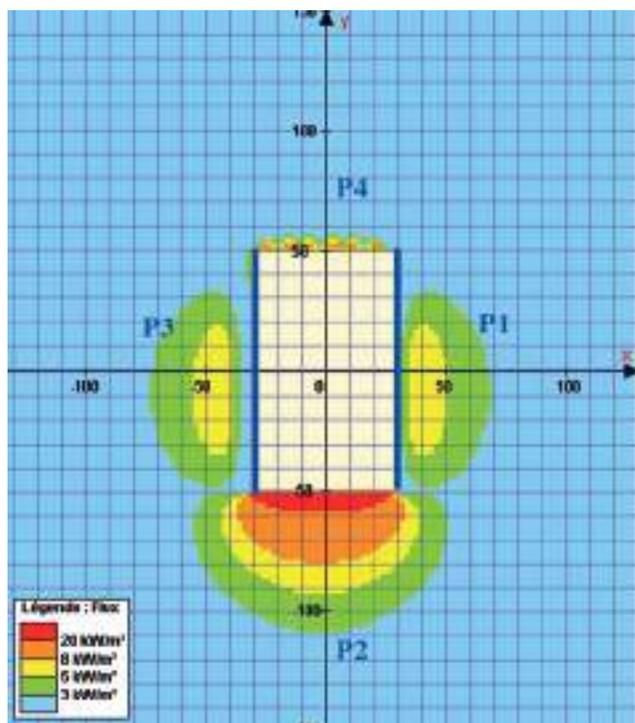


Figure 59: essai 3 (toiture PU)

On constate que :

- les distances obtenues pour une toiture bac acier et une toiture en panneaux sandwich sont identiques ;
- la présence d'une toiture béton permet quant à elle de diminuer significativement les distances d'effets.

Afin de voir l'influence de la nature de la toiture béton par rapport à une toiture métallique multicouche (bac acier), les différences de distances entre l'essai 1 et l'essai 2 sont données ci-après.

Façades rayonnantes	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 1 - P1 - essai 1	na	na	20	35
Paroi 2 - P2 - essai 2	na	na	na	25
Différence d'effet	-	-	20	10

■ 3.2.2 - Pourcentage de désenfumage

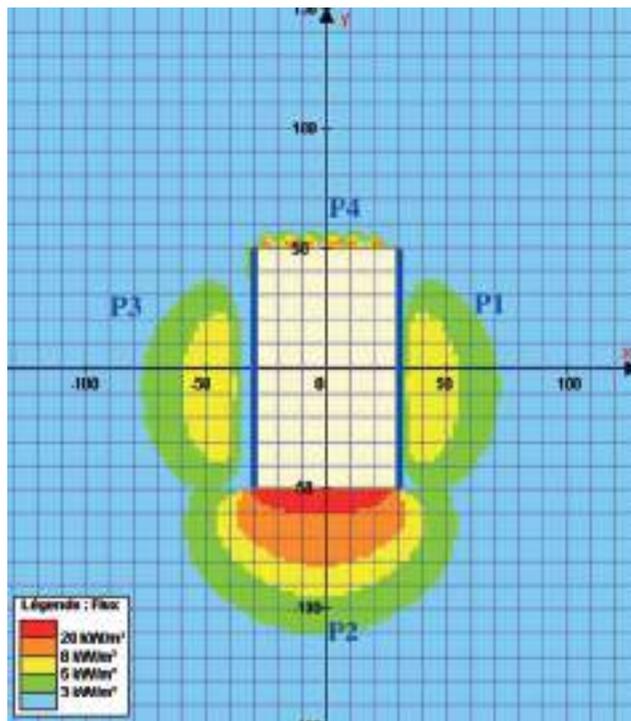


Figure 60: essai 4 (désenfumage 4 %)

L'essai 4 montre que les distances des effets thermiques obtenues sont légèrement plus importantes pour la modélisation d'une cellule intégrant une toiture réalisée avec 4 % de désenfumage.

3.3 - Influence d'un écran thermique

Afin d'étudier la prise en compte des écrans thermiques dans l'application Flumilog, la paroi 2 de l'essai 5 est munie d'une paroi en béton armé / cellulaire. Les caractères R, E, I et Y sont indiqués résistants 120 minutes. Les résultats graphiques sont les suivants.

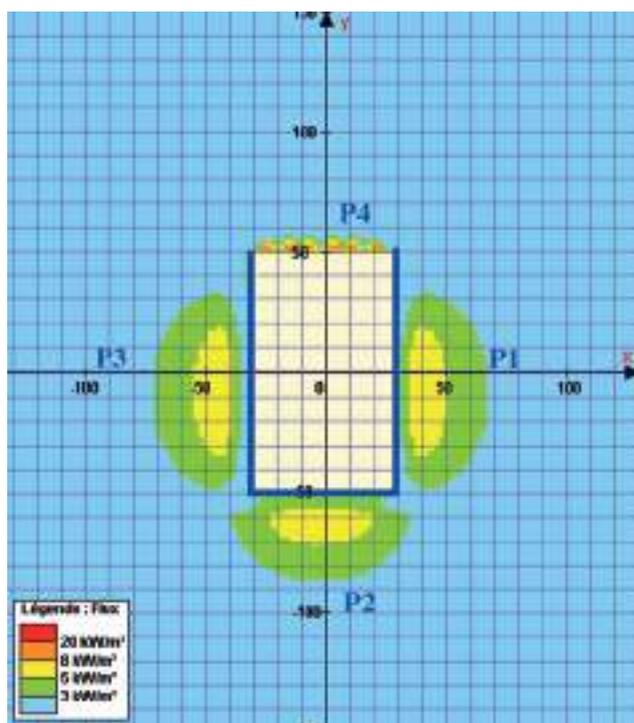


Figure 61 : essai 5 (écran thermique en P3)

Façades rayonnantes	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 1 - P1	na	na	20	35
Paroi 2 - P2	na	na	20	35
Paroi 3 - P3	na	na	20	35
Paroi 4 - quai - P4	< 10	< 10	< 10	< 10

Afin de voir l'influence de l'écran thermique sur la paroi 2, les différences de distances entre l'essai 1 et l'essai 5 sont données ci-après.

Façades rayonnantes	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 2 - P2 - essai 1	na	na	20	35
Paroi 2 - P2 - essai 5	na	na	na	25
Différence d'effet	< 10	< 10	< 10	< 10

On constate que les distances d'effets sont diminuées en moyenne de 25 m. Nous notons que cette diminution des distances d'effet est faible au regard des calculs effectués jusqu'à présent avec d'autres modèles de calculs.

Avec la version v 2.01 de Flumilog, la mise en place d'un écran thermique (paroi autostable en béton) toute hauteur de degré 2 h 00 en façade permet de maintenir les effets létaux dans un périmètre de 20 m.

3.4 - Influence de la résistance au feu de la structure de la toiture

Les essais 6 et 7 étudient l'effet de la résistance au feu de la structure de la toiture.

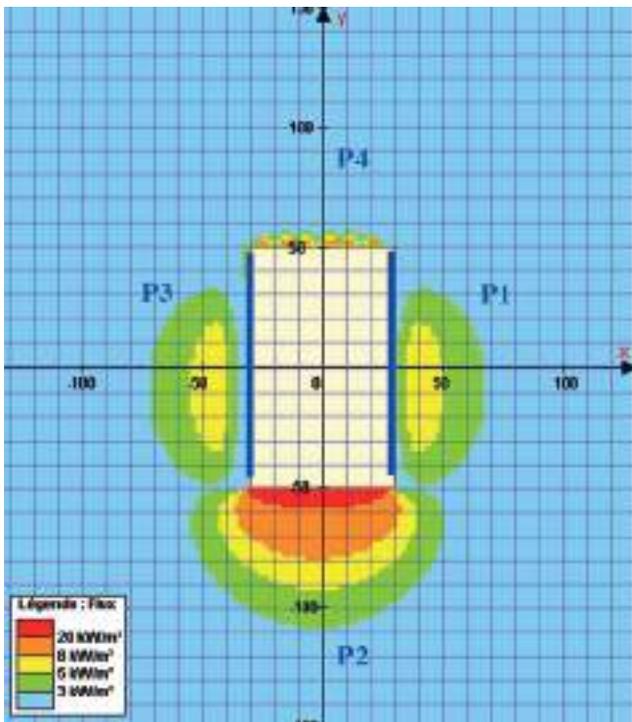


Figure 62 : essai 6 (structure R 30 min)

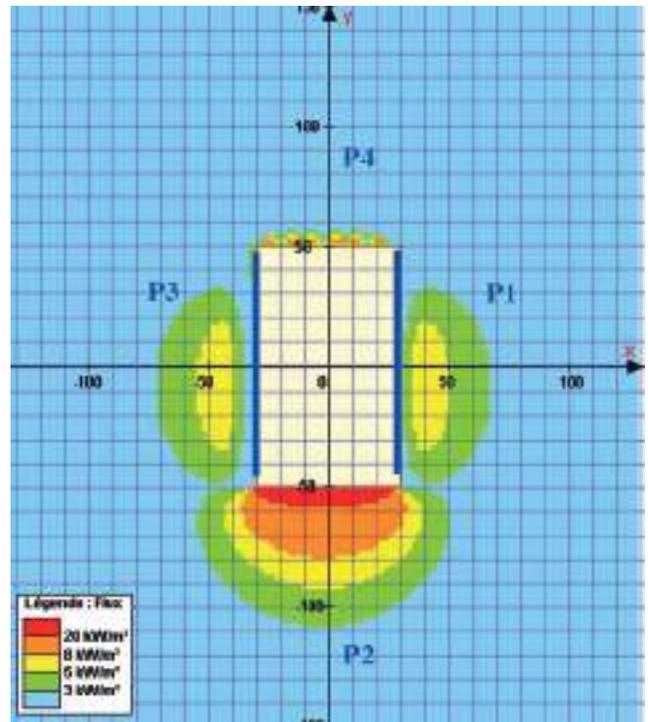


Figure 63 : essai 7 (structure R 15 min)

La diminution de la résistance au feu de la structure de la toiture provoque une augmentation des distances d'effets. L'impact est constaté principalement entre une structure résistant 30 mn et une structure résistant 15 mn.

3.5 - Influence combinée de la structure et de la nature des parois

Les essais 8 et 9 permettent d'évaluer les distances d'effets thermiques pour une cellule qui serait de structure acier plutôt que béton. La totalité de la structure résiste au feu 15 min.

Les parois sont toutes en bardage double peau pour l'essai 8 et elles sont toutes en bardage simple peau pour l'essai 9.

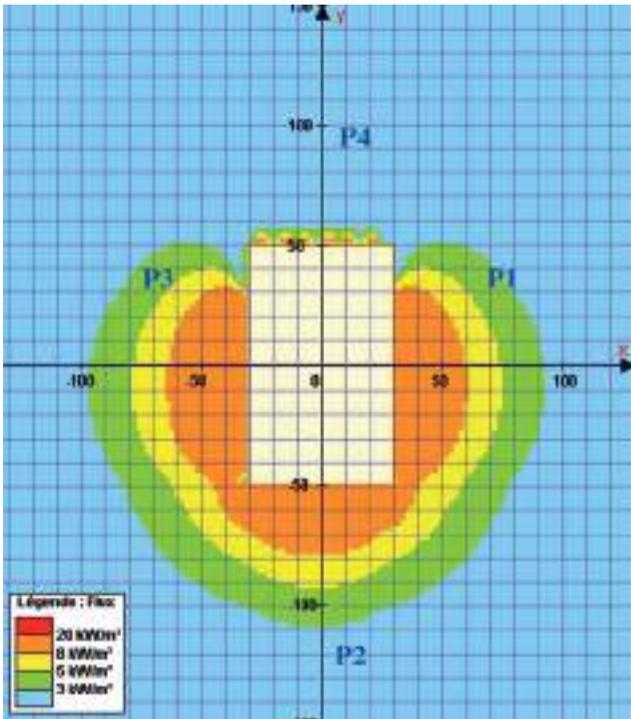


Figure 64 : essai 8
(structure acier et bardage double peau)

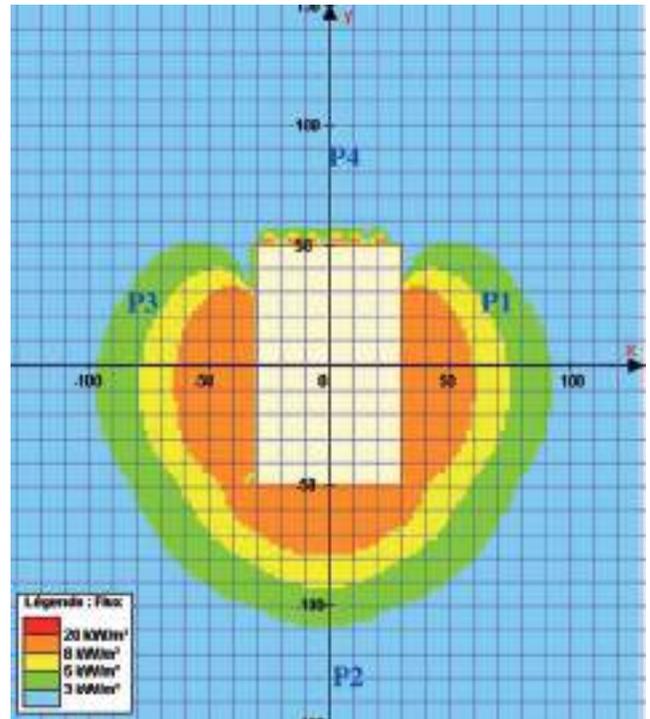


Figure 65 : essai 9
(structure acier et bardage simple peau)

Les résultats sont identiques pour une cellule en acier de résistance au feu 15 mn constituée de parois en bardage simple peau ou double peau pour lesquelles les paramètres REI_T sont également fixés à 15 mn. La différence entre le bardage simple peau et double peau n'est pas significative s'ils ont la même résistance au feu.

Façades rayonnantes	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 1 - P1	na	30	45	60
Paroi 2 - P2	na	< 30	40	60
Paroi 3 - P3	na	30	45	60
Paroi 4 - quai - P4	< 10	< 10	< 10	< 10

L'influence globale de la résistance au feu de la structure de la cellule est significative. Les zones impactées sont beaucoup plus importantes dans le cas d'une cellule à dominante acier au lieu de béton.

3.6 - Influence des matières stockées

■ 3.6.1 - Stockage de produits relevant de la rubrique 2663

L'essai 9 permet d'étudier l'influence des matières stockées.

L'application Flumilog ne permet pas d'utiliser l'option « rubrique type » pour modéliser un stockage de produits relevant de la rubrique 2663. Il faut donc renseigner la composition de la palette choisie, la durée de combustion et la puissance dégagée pour modéliser ce type de produits.

La composition de la palette type a été choisie telle que :

Composition	Masse en kg
Palette Bois	20
Bois	100
Carton	30
Polyéthylène	150
PVC	20
Polystyrène	50
Polyuréthane	50
Acier	50
TOTAL	470 kg

La durée de combustion de la palette et la puissance dégagée retenues sont celles conseillées par l'INERIS soit respectivement 45 min et 1 875 kW.

■ 3.6.2 - Stockage de produits 2663 sans prise en compte d'écran thermique

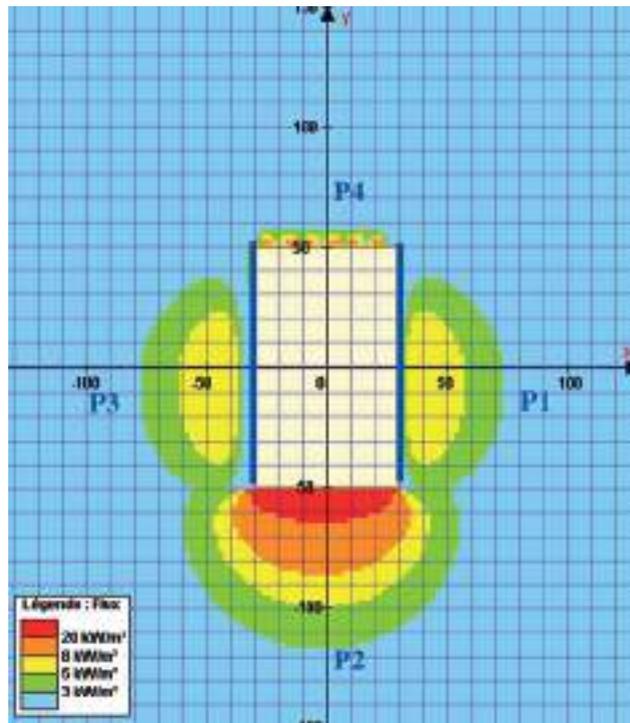


Figure 66: essai 10 (stockage de produits 2663)

CAS 1510	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 1 - P1	na	na	20	35
Paroi 2 - P2	< 10	30	45	60
Paroi 3 - P3	na	na	20	35
Paroi 4 - quai - P4	< 10	< 10	< 10	< 10

CAS 2663	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 1 - P1	na	na	25	45
Paroi 2 - P2	15	35	50	65
Paroi 3 - P3	na	na	25	45
Paroi 4 - quai - P4	< 10	< 10	< 10	< 10

Les distances augmentent en moyenne d'environ 10 m pour un stockage de produits 2663 par rapport à un stockage de produits 1510.

■ 3.6.3 - Stockage de produits 2663 avec prise en compte d'un écran thermique

L'essai 11 modélise les effets d'une cellule remplie de produits 2663 avec un écran thermique REI 120 en paroi 2 (façade arrière).

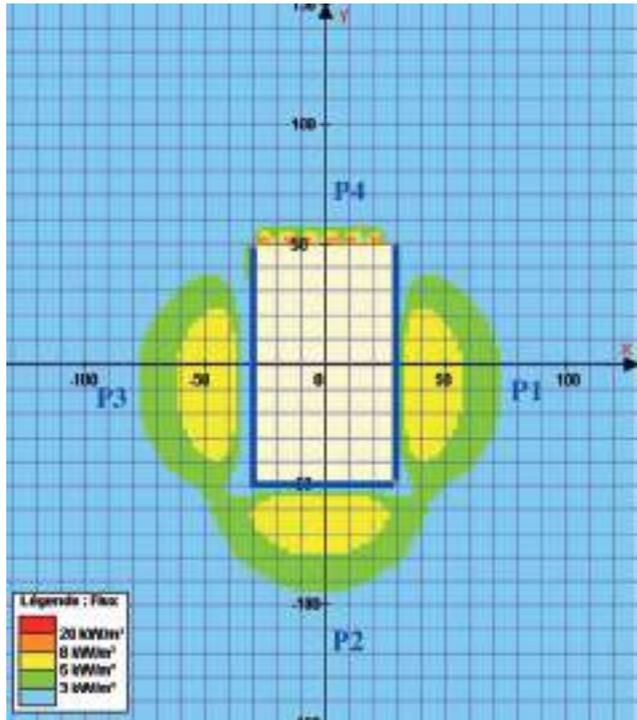


Figure 67 : essai 11 (stockage de 2663 + ECT en P2)

Façades rayonnantes	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 2 - P2 - sans écran REI	15	35	50	65
Paroi 2 - P2 - avec écran REI	na	na	30	45
Différence d'effet	-	-	20	20

La mise en place d'un écran thermique REI 120 sur toute la hauteur de la façade permet de réduire la distance d'effets de 20 mètres environ sur tous les flux considérés.

3.7 - Influence du degré coupe-feu

L'essai 12 permet d'étudier l'influence du degré des murs coupe-feu sur les flux thermiques. Nous avons donc intégré dans les paramètres de modélisation des murs coupe-feu en paroi 1 et 3 de degré 4h00 et un écran thermique REIY 240 en paroi 2 (façade arrière).

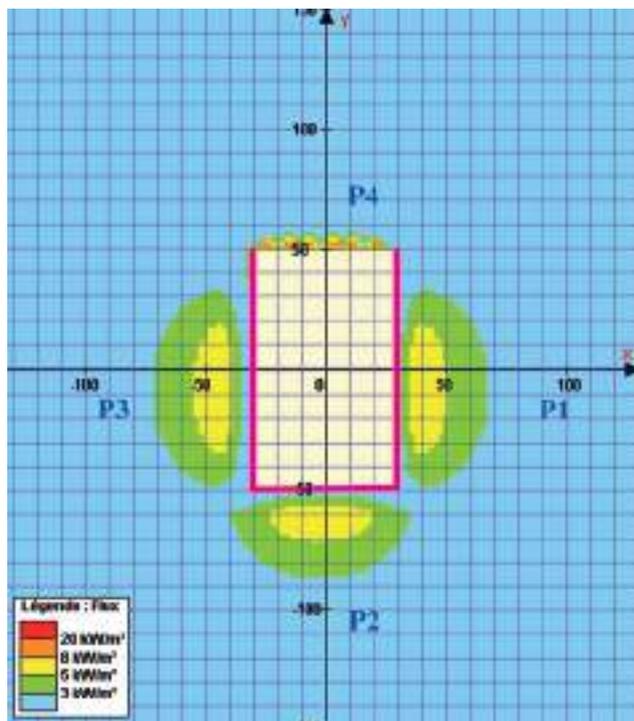


Figure 68: essai 12

Façades rayonnantes	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 1 - P1	na	na	20	35
Paroi 2 - P2	na	na	20	35
Paroi 3 - P3	na	na	20	35
Paroi 4 - quai - P4	< 10	< 10	< 10	< 10

Les distances d'effets maximum obtenues avec des parois REIY 240 sont identiques aux distances obtenues avec des parois REIY120. Cela s'explique par le fait que la puissance du feu pour la cellule type choisie est à son maximum à environ 100 mn d'incendie. Dans ce cas, il n'y a donc pas d'influence du degré coupe-feu entre REIY120 et REIY240 sur les distances d'effets pour la cellule type choisie.

3.8 - Influence du mode de stockage

■ 3.8.1 - Stockage en masse

L'étude du stockage en masse ne peut être réalisée car au vu des résultats, il semble évident que la fonction « stockage en masse » ne fonctionne pas dans l'outil Flumilog.

■ 3.8.2 - Sens des racks

L'essai 13 permet d'étudier l'influence du sens des racks sur les flux thermiques calculés.

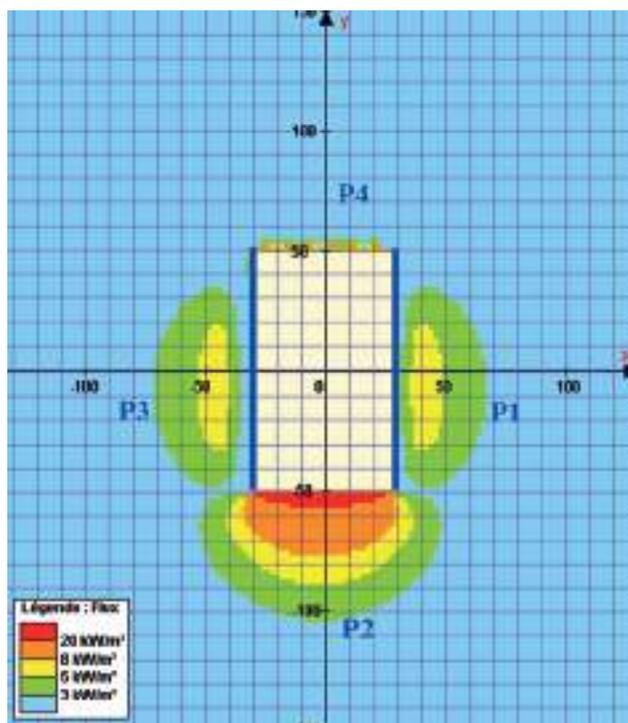


Figure 69: essai 13 (sens des racks inversé)

Façades rayonnantes	Distances mesurées à partir de la façade (m)			
	20 kW/m ²	8 kW/m ²	5 kW/m ² - Z1	3 kW/m ² - Z2
Paroi 1 - P1	na	na	20	35
Paroi 2 - P2	< 10	25	40	55
Paroi 3 - P3	na	na	20	35
Paroi 4 - quai - P4	< 10	< 10	< 10	< 10

L'inversion du sens des racks n'augmente pas significativement les distances des flux obtenues par rapport à une cellule classique dont les racks sont disposés dans le sens de la longueur.

3.9 - Cas de l'incendie sur trois cellules

L'étude du cas de l'incendie propagé aux cellules voisines est désormais très largement demandée par l'inspection des installations classées. Nous avons donc modélisé l'incendie sur 3 cellules en simultané selon 2 essais :

- un cas sans écran thermique en paroi 2 : essai 14
- puis le même cas en intégrant des écrans thermiques REI 120 le long des 3 cellules en paroi 2 : essai 15

Dans les 2 cas, la configuration des trois cellules est la suivante.

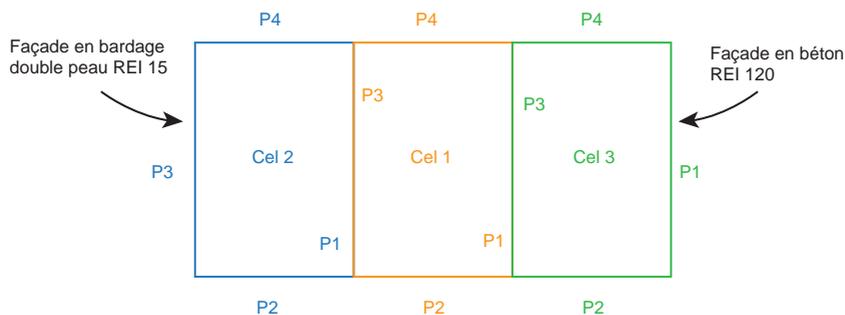


Figure 70: configuration des 3 cellules en feu

À noter que les cellules 2 et 3 sont séparées de la cellule 1 par des murs séparatifs coupe-feu 2h00.

Les résultats sont présentés ci-après.

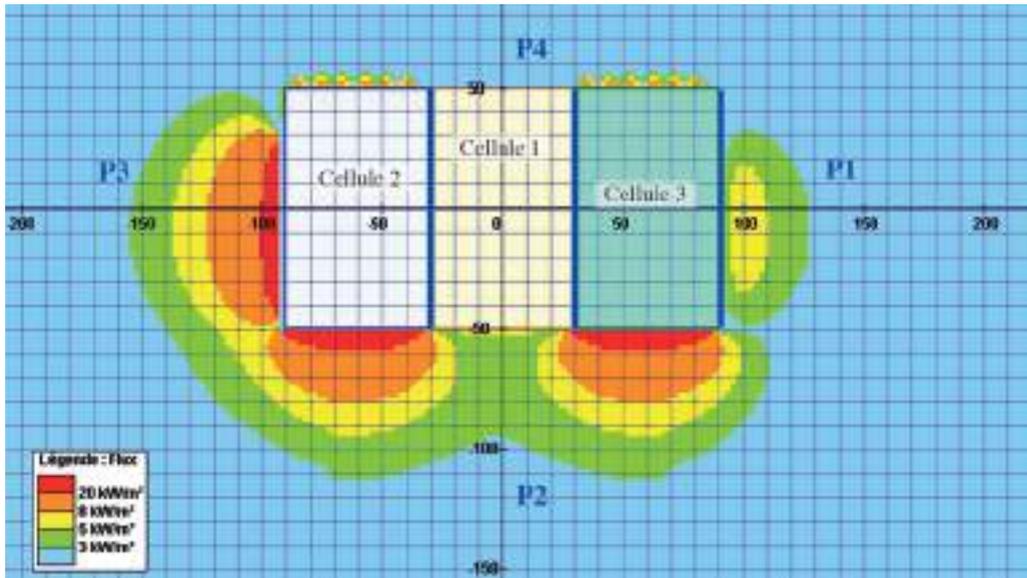


Figure 71 : essai 14 (incendie de 3 cellules sans ECT en P2)

La représentation graphique des résultats semble cohérente ; on observe bien des zones d'effet plus faibles au niveau de la cellule 1 initiatrice de l'incendie. Les distances en paroi 1 de la cellule 3 et en paroi 3 de la cellule 2 sont équivalentes à une modélisation d'incendie d'une seule cellule.

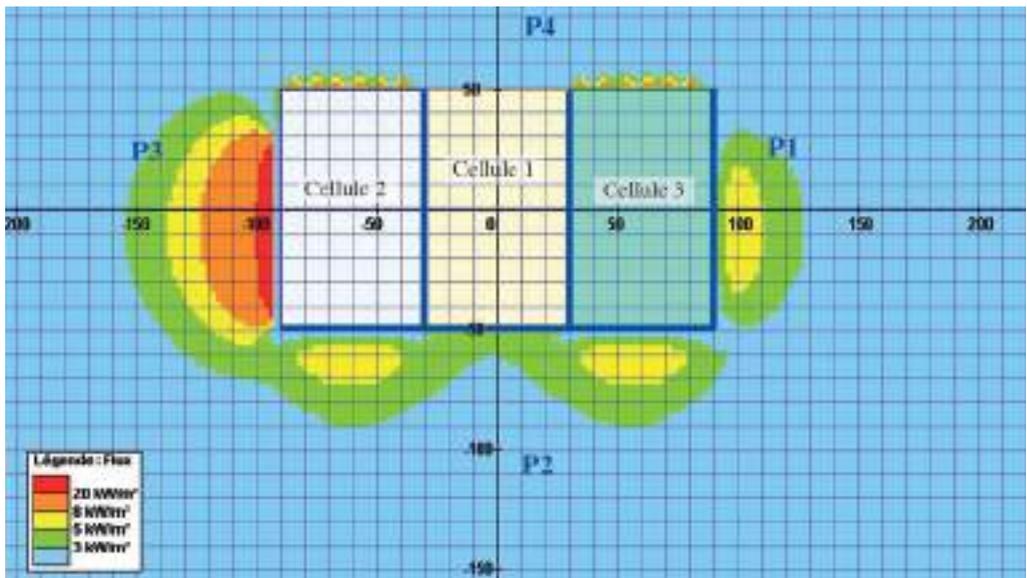


Figure 72 : essai 15 (incendie de 3 cellules avec ECT en P2)

La prise en compte de l'écran thermique tout le long de la paroi P2 est nettement observée.

<i>Incendie de 3 cellules</i>	<i>Distances mesurées à partir de la façade (m)</i>			
<i>Façades rayonnantes</i>	<i>20 kW/m²</i>	<i>8 kW/m²</i>	<i>5 kW/m² - Z1</i>	<i>3 kW/m² - Z2</i>
<i>Paroi 2 - P2 - sans écran REI</i>	< 10	30	45	65
<i>Paroi 2 - P2 - sans écran REI</i>	na	na	25	40
<i>Différence d'effet</i>	<i>10</i>	<i>30</i>	<i>20</i>	<i>25</i>

La mise en place de l'écran thermique permet de réduire les zones d'effets des flux thermiques d'environ 10 m à 30 m.

De même que pour l'incendie d'une cellule, les résultats obtenus sont cohérents avec les prescriptions de l'arrêté d'enregistrement 1510. Vu la précision des résultats, on peut considérer que la version v2.01 de Flumilog permet de maintenir le flux de 5 kW/m² dans les limites des 20 m dans le cas du scénario de l'incendie de 3 cellules avec mise en place d'un écran thermique.

4. Conclusion

À ce jour, l'utilisation de Flumilog v2.01 (du 13/07/2010) permet de modéliser des flux thermiques à un temps t , considéré comme majorant pour les cas de l'incendie d'une cellule ou de trois cellules en simultané.

Une analyse critique de l'outil Flumilog est donnée.

- L'évolution de la cinétique du phénomène d'incendie est fournie dans les fichiers résultats mais n'est pas intégrée au rapport Flumilog. Les données fournies permettent d'appréhender la durée totale de l'incendie ainsi que la durée des phases suivantes :
 - phase de croissance ;
 - phase de puissance maximum ;
 - phase de décroissance.
- La mise en place d'écrans thermiques ou murs coupe-feu REI 120 permet de maintenir les effets létaux dans un périmètre de 20 m à partir des façades.
- L'application doit encore être complétée par :
 - la modélisation des stockages en masse ;
 - la modélisation des stockages de produits de la rubrique 2663 à partir de la fonction rubrique type.



Chapitre

2

Étude du logiciel

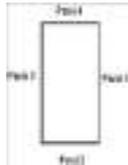
Flumilog[©] 2.01

Annexes

Annexe 1

Scenarios de simulation

ANNEXE 1



Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7
Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2/P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2/P4 bardage dp Rack 1510 Toiture Dalle béton	Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2/P4 bardage dp Rack 1510 Toiture PU	Structure 1h00 Désenfumage 4 % P1/P3 MCF2H00 P2/P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2 ECT REI 120 P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Structure 30 min Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2/P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Structure 2% Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2/P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1

CONDITIONS EXTERIEURES

GEOMETRIE DE LA CELLULE

		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7
Hauteur de la cible	m	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Cellule								
Largeur parois 1 et 3	m	100	100	100	100	100	100	100
Largeur parois 2 et 4	m	60	60	60	60	60	60	60
Hauteur de la cellule (sous couverture)	m	12	12	12	12	12	12	12
Géométrie complexe (coin en équerre ou diagonale)								
Longueur 1	m	0	0	0	0	0	0	0
Longueur 2	m	0	0	0	0	0	0	0
SI Hauteur complexe								
Hauteur ss couverture 1	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur de stockage 1	m	0	0	0	0	0	0	0
Longueur 1	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur ss couverture 2	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur de stockage 2	m	0	0	0	0	0	0	0
Longueur 2	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur ss couverture 3	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur de stockage 3	m	0	0	0	0	0	0	0
Longueur 3	m	0	0	0	0	0	0	0

Toiture

Résistance au feu des poutres	min	60	60	60	60	60	30	15
Résistance au feu des pannes	min	30	30	30	30	30	30	15
Matériau de la toiture		Multicouches bac acier	Dalle béton	Panneaux sandwich PU	Multicouches bac acier	Multicouches bac acier	Multicouches bac acier	Multicouches bac acier
Si dalle béton préciser la résistance	min	60						
Pourcentage d'exutoire ou quantité d'exutoire	%	2	2	2	4	2	2	2
Nombre	::	::	::	::	::	::	::	::
Longueur	m	2	2	2	2	2	2	2
Largeur	m	3	3	3	3	3	3	3

PAROIS DE LA CELLULE

Paroi 1

		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7
Structure support		Autostable						
Résistance au feu de la structure support	min	120	120	120	120	120	120	120
Surface totale des portes de quais pour 1 paroi	m2	0	0	0	0	0	0	0
Nombre de portes de quai		0	0	0	0	0	0	0
Largeur	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur	m	0	0	0	0	0	0	0
Matériau de la paroi		Béton armé / cellulaire						
Critère R	min	120	120	120	120	120	120	120
Critère E	min	120	120	120	120	120	120	120
Critères Y (Résistance des fixations)	min	120	120	120	120	120	120	120
Largeur	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur	m	0	0	0	0	0	0	0

Paroi 3

Structure support		Autostable						
Résistance au feu de la structure support	min	120	120	120	120	120	120	120
Surface totale des portes de quais pour 1 paroi	m2	0	0	0	0	0	0	0
Nombre de portes de quai		0	0	0	0	0	0	0
Largeur	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur	m	0	0	0	0	0	0	0
Matériau de la paroi		Béton armé / cellulaire						
Critère R	min	120	120	120	120	120	120	120
Critère E	min	120	120	120	120	120	120	120
Critères Y (Résistance des fixations)	min	120	120	120	120	120	120	120
Largeur	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur	m	0	0	0	0	0	0	0

Paroi 2

Structure support		Poteau béton	Poteau béton	Poteau béton				
Résistance au feu de la structure support	min	60	60	60	60	120	60	60
Surface totale des portes de quais pour 1 paroi	m2	0	0	0	0	0	0	0
Nombre de portes de quai		0	0	0	0	0	0	0
Largeur	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur	m	0	0	0	0	0	0	0
Matériau de la paroi		Bardage double peau	Bardage double peau	Bardage double peau	Bardage double peau	Béton armé / cellulaire	Bardage double peau	Bardage double peau
Critère R	min	15	15	15	15	120	15	15
Critère E	min	15	15	15	15	120	15	15
Critères Y (Résistance des fixations)	min	15	15	15	15	120	15	15
Largeur	m	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur	m	0	0	0	0	0	0	0

Essai 8 Structure 15 min Désenfumage 2% P1/P3 /P2/P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Essai 9 Structure 15 min Désenfumage 2% P1/P3 P2/P4 bardage sp Rack 1510 Toiture T30/1	Essai 10 Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2/P4 bardage dp Rack 2663 Toiture T30/1	Essai 11 Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2 ECT REI 120 P4 bardage dp Rack 2663 Toiture T30/1	Essai 12 Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF4H00 P2 ECT REI 240 P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Essai 13 Sens des racks	Essai 14 Structure 1h00 Désenfumage 2% P2 et P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Essai 15 Structure 1h00 Désenfumage 2% P2 ECT REI 120 P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1
--	---	--	---	---	-----------------------------------	--	--

1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

100	100	100	100	100	100	100	100
60	60	60	60	60	60	60	60
12	12	12	12	12	12	12	12

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

15	15	60	60	60	60	60	60
15	15	30	30	30	30	30	30
Multicouches bac acier							
2	2	2	2	2	2	3	3
::	::	::	::	::	::	::	::
::	::	::	::	::	::	::	::
2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3

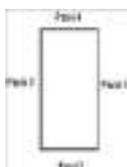
3 cellules **3 cellules**

Poteau acier	Poteau acier	Autostable	Autostable	Autostable	Autostable	Cellule 2	Cellule 1	Cellule 3	Cellule 2	Cellule 1	Cellule 3
15	15	120	120	240	120	120	120	Poteau béton	120	120	Poteau béton
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bardage double peau	Bardage simple peau	Béton armé / cellulaire									
15	15	120	120	240	120	120	120	120	120	120	120
15	15	120	120	240	120	120	120	120	120	120	120
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Poteau acier	Poteau acier	Autostable	Autostable	Autostable	Autostable	Poteau béton	Autostable	Autostable	Poteau béton	Autostable	Autostable
15	15	120	120	240	120	60	120	120	120	120	120
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bardage double peau	Bardage simple peau	Béton armé / cellulaire	Bardage double peau	Béton armé / cellulaire	Béton armé / cellulaire	Bardage double peau	Béton armé / cellulaire	Béton armé / cellulaire			
15	15	120	120	240	120	15	120	120	15	120	120
15	15	120	120	240	120	15	120	120	15	120	120
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Poteau acier	Poteau acier	Poteau béton	Poteau béton	Poteau béton	Poteau béton	Poteau béton	Autostable
15	15	60	120	240	60	60	60
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
Bardage double peau	Bardage simple peau	Bardage double peau	Béton armé / cellulaire	Béton armé / cellulaire	Bardage double peau	Bardage double peau	Béton armé / cellulaire
15	15	15	120	240	15	15	120
15	15	15	120	240	15	15	120
15	15	15	120	240	15	15	120
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

ANNEXE 1



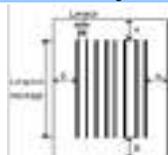
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7
Structure 1h00	Structure 1h00	Structure 1h00	Structure 1h00	Structure 1h00	Structure 1h00	Structure 30 min	Structure 15 min
Désenfumage 2%	Désenfumage 2%	Désenfumage 2%	Désenfumage 2%	Désenfumage 4 %	Désenfumage 2%	Désenfumage 2%	Désenfumage 2%
P1/P3 MCF2H00	P1/P3 MCF2H00	P1/P3 MCF2H00	P1/P3 MCF2H00	P1/P3 MCF2H00	P1/P3 MCF2H00	P1/P3 MCF2H00	P1/P3 MCF2H00
P2/P4 bardage dp	P2/P4 bardage dp	P2/P4 bardage dp	P2/P4 bardage dp	P2/P4 bardage dp	P2 ECT REI 120	P2/P4 bardage dp	P2/P4 bardage dp
Rack 1510	Rack 1510	Rack 1510	Rack 1510	Rack 1510	P4 bardage dp	Rack 1510	Rack 1510
Toiture T30/1	Toiture Dalle béton	Toiture Dalle béton	Toiture PU	Toiture T30/1	Toiture T30/1	Toiture T30/1	Toiture T30/1

Paroi 4			Poteau béton						
Structure support			Poteau béton						
Résistance au feu de la structure support	min	60	60	60	60	60	60	60	60
Surface totale des portes de quais pour 1 paroi	m2	0	0	0	0	0	0	0	0
Nombre de portes de qual		6	6	6	6	6	6	6	6
Largeur	m	3	3	3	3	3	3	3	3
Hauteur	m	3	3	3	3	3	3	3	3
Matériau de la paroi		Bardage double peau							
Critère R	min	15	15	15	15	15	15	15	15
Critère E	min	15	15	15	15	15	15	15	15
Critères Y (Résistance des fixations)	min	15	15	15	15	15	15	15	15
Largeur	m	0	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur	m	0	0	0	0	0	0	0	0

MODE DE STOCKAGE

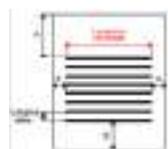
Nombre de niveau de stockage	5	5	5	5	5	5	5
Mode de stockage	rack						

Dimension du stockage en rack



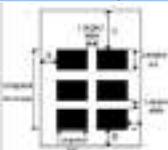
Longueur de stockage	m	77	77	77	77	77	77
Longueur de préparation ou déport (A)	m	20	20	20	20	20	20
Longueur de préparation ou déport (B)	m	3	3	3	3	3	3
Longueur de préparation ou déport (β)	m	1	1	1	1	1	1
Longueur de préparation ou déport (α)	m	1	1	1	1	1	1
Hauteur max de stockage	m	10	10	10	10	10	10
Hauteur du canton	m	1	1	1	1	1	1
Ecart entre haut du stockage et canton		1	1	1	1	1	1

Stockage en rack



Sens du rack (paroi 1 ou 2)		Paroi 1					
Nombre de rack double		12	12	12	12	12	12
Largeur d'un double rack	m	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Nombre de rack simple		2	2	2	2	2	2
Largeur d'un simple rack	m	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
Largeur des allées entre les racks	m	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3

Dimension du stockage en masse



Longueur de stockage	m						
Longueur de préparation ou déport (A)	m						
Longueur de préparation ou déport (B)	m	100	100	100	100	100	100
Longueur de préparation ou déport (β)	m						
Longueur de préparation ou déport (α)	m						
Hauteur du canton	m						

Stockage en masse

Nombre d'îlots	
Longueur des îlots	m
Largeur des îlots	m
Hauteur des îlots	m
Largeur des allées entre îlots	m

Palettes stockées

Dimension palette

Longueur palette	m	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Largeur palette	m	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Hauteur palette	m	1	1	1	1	1	1

Composition de la palette

Rubrique		1510	1510	1510	1510	1510	1510
Ou palette expérimentale		::	::	::	::	::	::
Composition	kg	::	::	::	::	::	::
Durée de combustion de la palette	min	45	45	45	45	45	45
Puissance dégagée par la palette	Kw	1525	1525	1525	1525	1525	1525

Essai 8 Structure 15 min Désenfumage 2% P1/P3 /P2/P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Essai 9 Structure 15 min Désenfumage 2% P1/P3 P2/P4 bardage sp Rack 1510 Toiture T30/1	Essai 10 Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2/P4 bardage dp Rack 2663 Toiture T30/1	Essai 11 Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF2H00 P2 ECT REI 120 P4 bardage dp Rack 2663 Toiture T30/1	Essai 12 Structure 1h00 Désenfumage 2% P1/P3 MCF4H00 P2 ECT REI 240 P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Essai 13 Sens des racks	Essai 14 Structure 1h00 Désenfumage 2% P2 et P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1	Essai 15 Structure 1h00 Désenfumage 2% P2 ECT REI 120 P4 bardage dp Rack 1510 Toiture T30/1
---	--	---	--	--	----------------------------	---	---

Poteau acier	Poteau acier	Poteau béton					
15	60	60	60	60	60	60	60
0	0	0	0	0	0	0	0
6	6	6	6	6	6	6	6
3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3
Bardage double peau	Bardage simple peau	Bardage double peau					
15	15	15	15	15	15	15	15
15	15	15	15	15	15	15	15
15	15	15	15	15	15	15	15
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

5	5	5	5	5	5	5	5
rack							

77	77	77	77	58	77	77
20	20	20	20	24	20	20
3	3	3	3	1	3	3
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
10	10	10	10	10	10	10
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1

Paroi 1	Paroi 1	Paroi 1	Paroi 1	Paroi 2	Paroi 1	Paroi 1
12	12	12	12	14	12	12
2,2	2,2	2,2	2,2	2,22	2,2	2,2
2	2	2	2	2	2	2
1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
2,3	2,3	2,3	2,3	1,7	2,3	2,3

75
24
100
100
100
100
1
100
1
1
1

9
25
20
8
2

1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
1	1	1	1	1	1	1	1

1510	1510	2663	2663	1510	1510	1510	1510
::	::	::	::	::	::	::	::
::	::	::	::	::	::	::	::
45	45	45	45	45	45	45	45
1525	1525	1875	1875	1525	1525	1525	1525

Annexe 2

Rapport Flumilog – essai 1

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_1_1
Cellule :	Essai_1
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:24:50
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

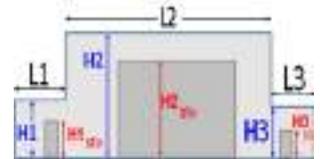
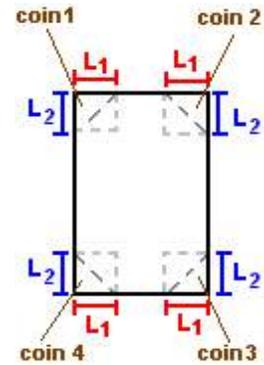
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

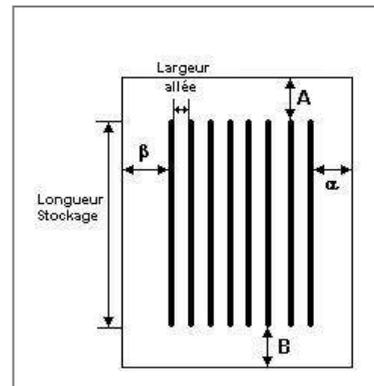
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallicque multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage	12512	palettes
Nombre de niveaux	5	
Mode de stockage	Rack	

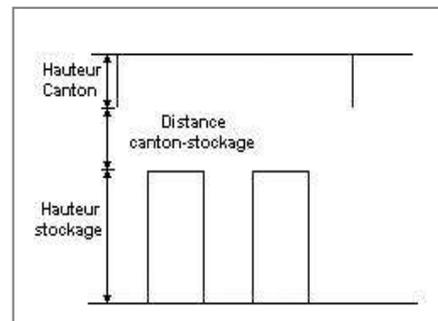
Dimensions

Longueur de stockage	77,0	m
Longueur de préparation A	20,0	m
Longueur de préparation B	3,0	m
Déport latéral α	1,0	m
Déport latéral β	1,0	m
Hauteur maximum de stockage	10,0	m
Hauteur du canton	1,0	m
Ecart entre le haut du stockage et le canton	1,0	m



Stockage en rack

Sens du stockage	dans le sens de la paroi 1	
Nombre de double racks	12	m
Largeur d'un double rack	2,2	m
Nombre de racks simples	2	m
Largeur d'un rack simple	1,0	m
Largeur des allées entre les racks	2,3	m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette :	1,2	m	Poids total de la palette :	Par défaut
Largeur de la palette :	0,8	m		
Hauteur de la palette :	1,0	m		
Volume de la palette :	1,0	m ³		
Nom de la palette :	Palette type 1510			

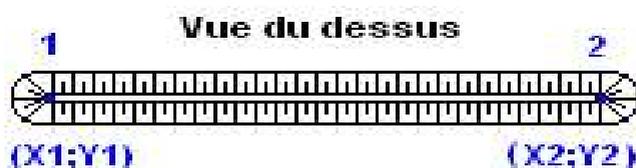
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette :	45,0	min
Puissance dégagée par la palette :	1830,0	kW

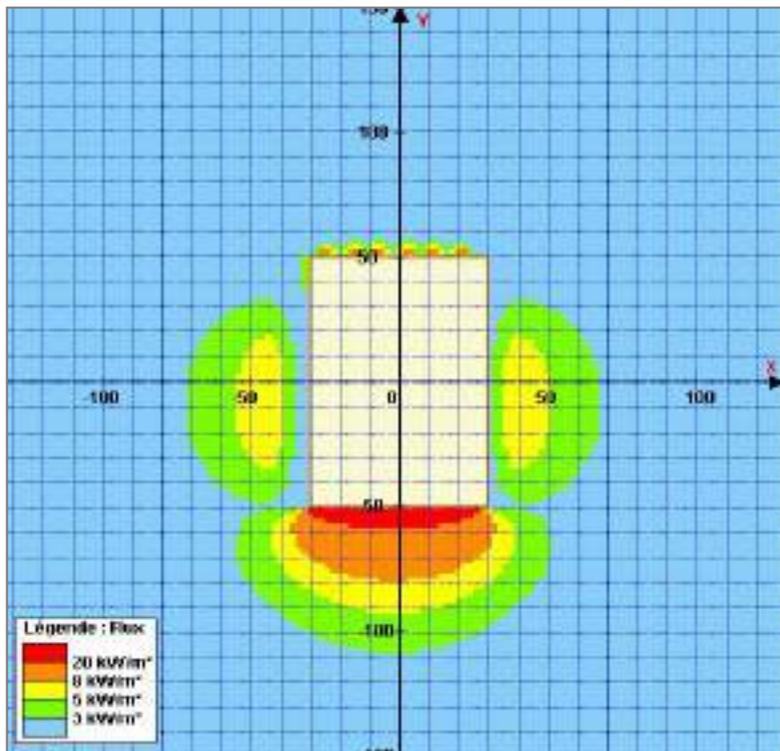
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum

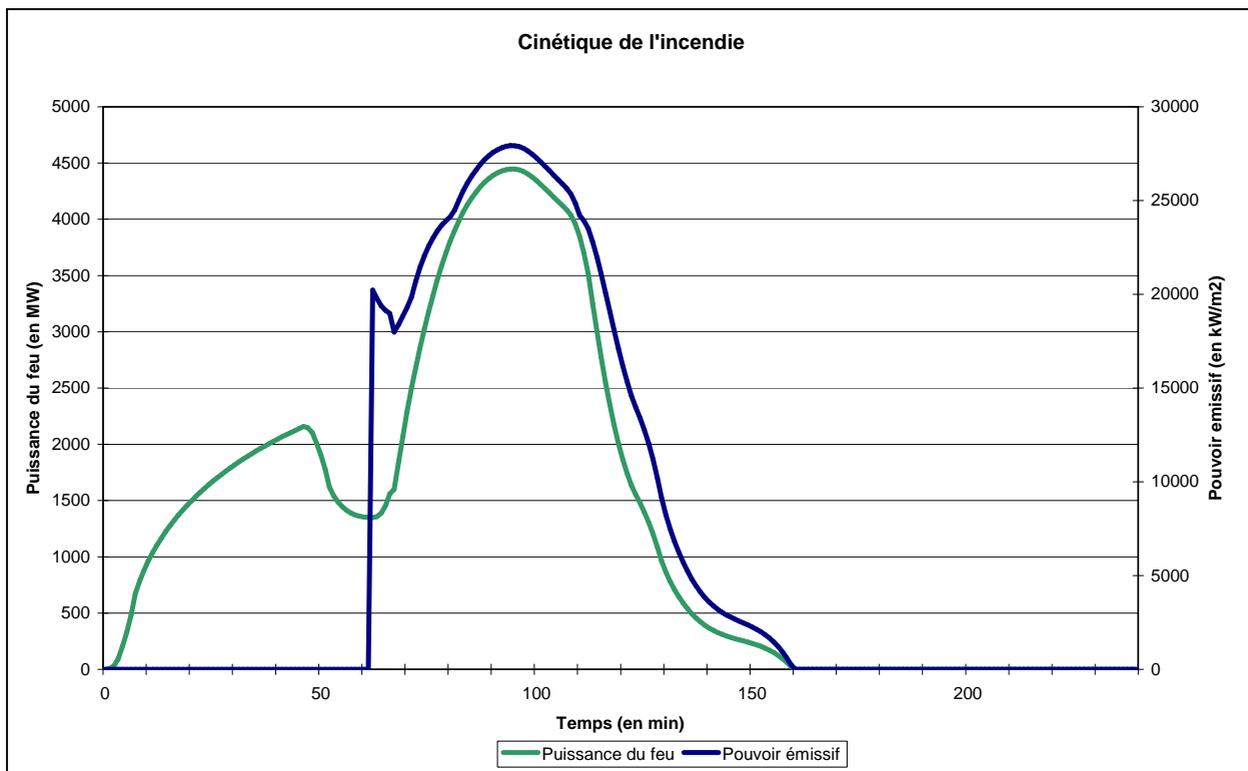


Echelle :

une graduation
représente 10 m

temps [min]	Puissance du feu [MW]	Pouvoir émissif [kW/m ²]	Hauteur de flamme [m]
62,0167	1350,18	20226	13,3295
63,0167	1357,06	19781	13,2441
64,0167	1388,08	19384,5	13,2191
65,0167	1456,68	19137,9	13,298
66,0167	1558,9	18977,7	13,4592
67,0167	1600,22	17983,4	13,3063
68,0167	1838,35	18387,9	13,9133
69,0167	2070,43	18848,4	14,6046
70,0167	2290,88	19293,7	15,3879
71,0167	2498,98	19841,5	16,2962
72,0167	2684,69	20705,4	17,2668
73,0167	2856,46	21423,5	18,2264
74,0167	3024,09	22051,7	19,2203
75,0167	3181,51	22579,1	20,2051
76,0167	3326,67	23014	21,1576
77,0167	3462,53	23378,4	22,0876
78,0167	3587,38	23678,5	22,975
79,0167	3701,18	23924,3	23,8112
80,0167	3804,47	24125,6	24,5929
81,0167	3899,24	24484,7	25
82,0167	3985,62	25027	25
83,0167	4062,62	25510,5	25
84,0167	4130,86	25939,1	25
85,0167	4190,51	26313,7	25
86,0167	4242,89	26642,5	25
87,0167	4290,18	26939,5	25
88,0167	4330,39	27192	25
89,0167	4364,19	27404,2	25
90,0167	4391,7	27576,9	25
91,0167	4413,37	27713,1	25
92,0167	4430,1	27818,1	25
93,0167	4441,99	27892,8	25
94,0167	4447,74	27928,9	25
95,0167	4446,91	27923,6	25
96,0167	4439,43	27876,7	25
97,0167	4424,9	27785,5	25
98,0167	4402,42	27644,3	25
99,0167	4374,75	27470,6	25
100,017	4343,13	27272	25
101,017	4308,97	27057,5	25
102,017	4272,18	26826,5	25
103,017	4234,43	26589,4	25
104,017	4196,88	26353,6	25
105,017	4159,98	26122	25
106,017	4122,31	25885,4	25
107,017	4084,22	25646,2	25
108,017	4035,59	25340,8	25
109,017	3958,56	24857,1	25
110,017	3846,39	24201,5	24,9162
111,017	3699,88	23921,7	23,8016
112,017	3515,66	23510,1	22,4614
113,017	3251,84	22795,8	20,6613
114,017	3003,29	21977,5	19,0938
115,017	2773,35	21085,6	17,7546
116,017	2547,76	20077,4	16,5444

temps [min]	Puissance du feu [MW]	Pouvoir émissif [kW/m2]	Hauteur de flamme [m]
117,017	2348,5	19072,8	15,5608
118,017	2171,43	18088,4	14,7538
119,017	2008,62	17106,3	14,0677
120,017	1864,25	16173,9	13,504
121,017	1740,43	15328,6	13,054
122,017	1637,15	14592	12,7023
123,017	1552,72	13968,8	12,4307
124,017	1477,82	13400,5	12,2019
125,017	1397,92	12778,8	11,9702
126,017	1307,19	12053,7	11,7228
127,017	1204,53	11209,9	11,4628
128,017	1085,01	10197,7	11,1869
129,017	964,517	9147,18	10,9379
130,017	862,458	8235,47	10,7499
131,017	778,091	7467,94	10,6104
132,017	707,943	6821	10,5053
133,017	645,015	6234,42	10,4195
134,017	588,842	5706,23	10,3496
135,017	538,962	5233,87	10,2929
136,017	494,91	4814,3	10,2469
137,017	456,224	4444,11	10,2099
138,017	422,439	4119,6	10,1799
139,017	393,093	3836,88	10,1558
140,017	367,721	3591,84	10,1363
141,017	345,861	3380,3	10,1206
142,017	327,048	3197,96	10,1078
143,017	310,82	3040,46	10,0974
144,017	296,712	2903,4	10,0888
145,017	284,262	2782,33	10,0815
146,017	273,005	2672,78	10,0751
147,017	262,479	2570,27	10,0695
148,017	252,219	2470,3	10,0641
149,017	241,763	2368,35	10,0589
150,017	230,646	2259,9	10,0536
151,017	218,406	2140,41	10,0481
152,017	204,578	2005,34	10,0422
153,017	188,7	1850,14	10,0359
154,017	170,308	1670,22	10,0292
155,017	148,937	1461,02	10,0224
156,017	124,126	1217,94	10,0155
157,017	95,4098	936,397	10,0092
158,017	62,3255	611,813	10,0039
159,017	24,4094	239,643	10,0006



Annexe 3

Rapport Flumilog – essai 2

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_2_1
Cellule :	Essai_2
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:24:28
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

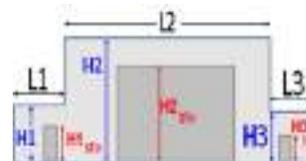
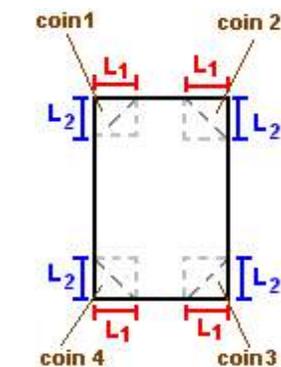
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

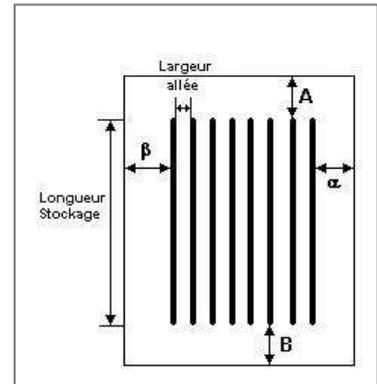
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	Dalle beton
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0
Résistance au feu de la dalle (min)	60

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **6737** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

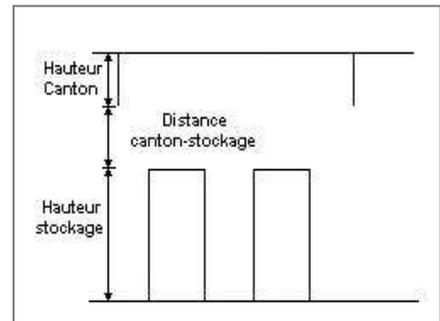
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

NC	NC	NC	NC
0,0	0,0	0,0	0,0

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

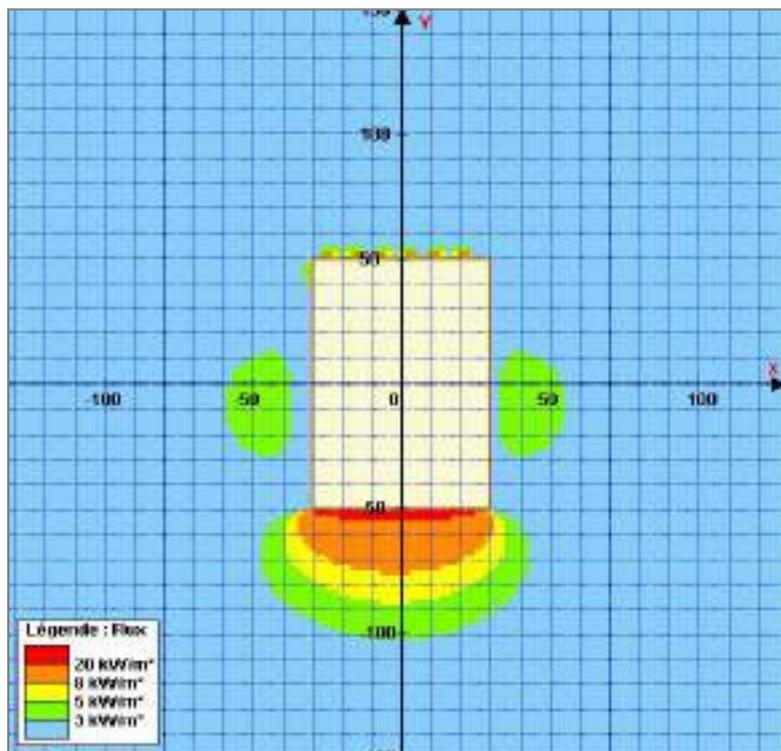
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 4

Rapport flumilog – essai 3

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safège
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_3_1
Cellule :	Essai_3
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:24:40
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

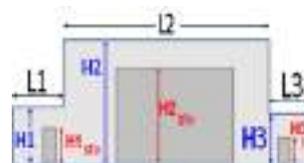
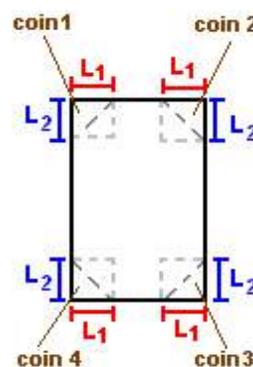
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

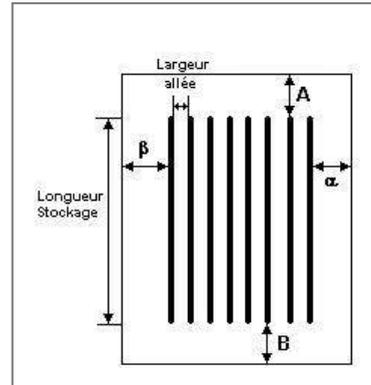
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	Panneaux sandwich - polyurethane
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage	12512	palettes
Nombre de niveaux	5	
Mode de stockage	Rack	

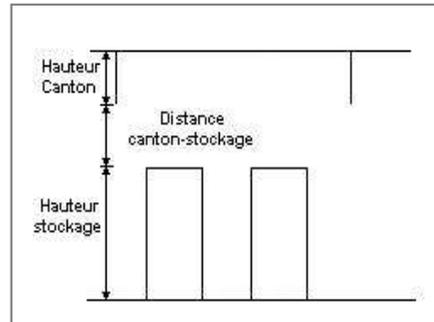
Dimensions

Longueur de stockage	77,0	m
Longueur de préparation A	20,0	m
Longueur de préparation B	3,0	m
Déport latéral α	1,0	m
Déport latéral β	1,0	m
Hauteur maximum de stockage	10,0	m
Hauteur du canton	1,0	m
Ecart entre le haut du stockage et le canton	1,0	m



Stockage en rack

Sens du stockage	dans le sens de la paroi 1	
Nombre de double racks	12	m
Largeur d'un double rack	2,2	m
Nombre de racks simples	2	m
Largeur d'un rack simple	1,0	m
Largeur des allées entre les racks	2,3	m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette :	1,2	m	Poids total de la palette : Par défaut
Largeur de la palette :	0,8	m	
Hauteur de la palette :	1,0	m	
Volume de la palette :	1,0	m ³	
Nom de la palette :	Palette type 1510		

Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette :	45,0	min
Puissance dégagée par la palette :	1830,0	kW

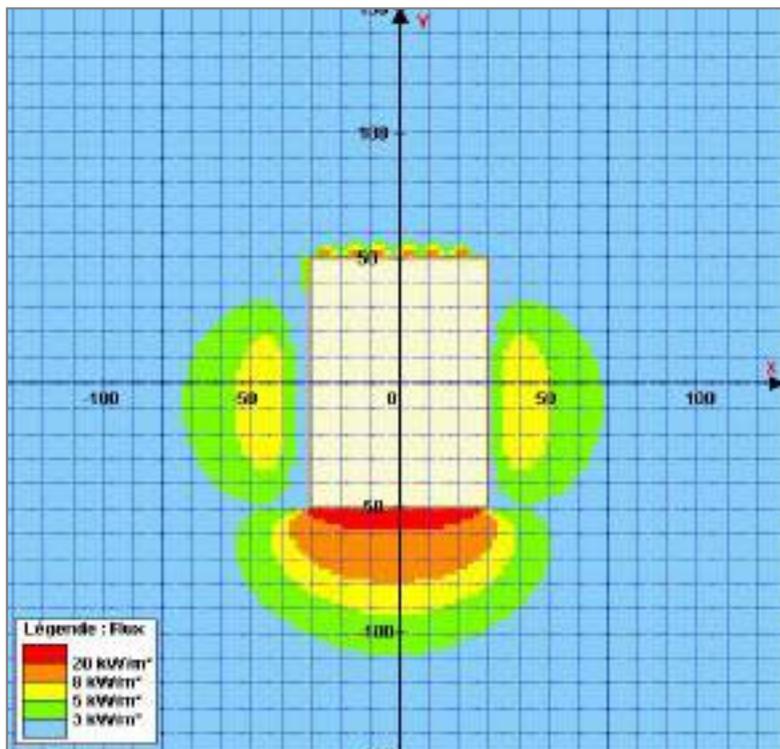
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :

une graduation
représente 10 m

Annexe 5

Rapport flumilog – essai 4

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_4_1
Cellule :	Essai_4
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:25:02
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

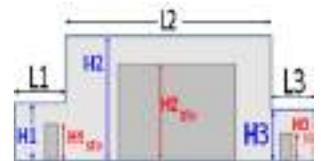
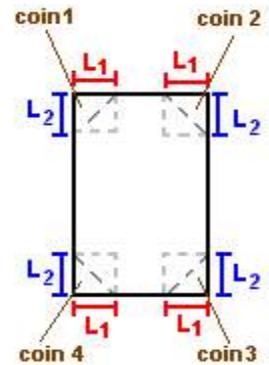
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

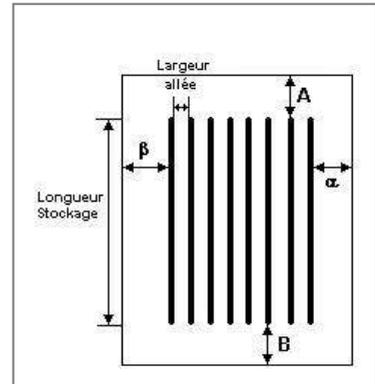
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallic multicouches
Nombre d'exutoires	40
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **6737** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

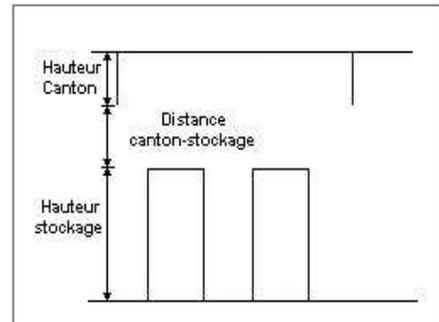
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

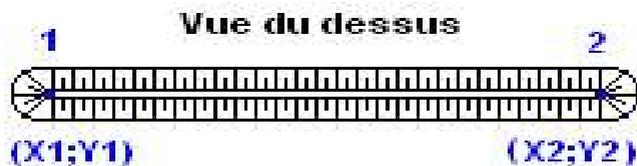
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

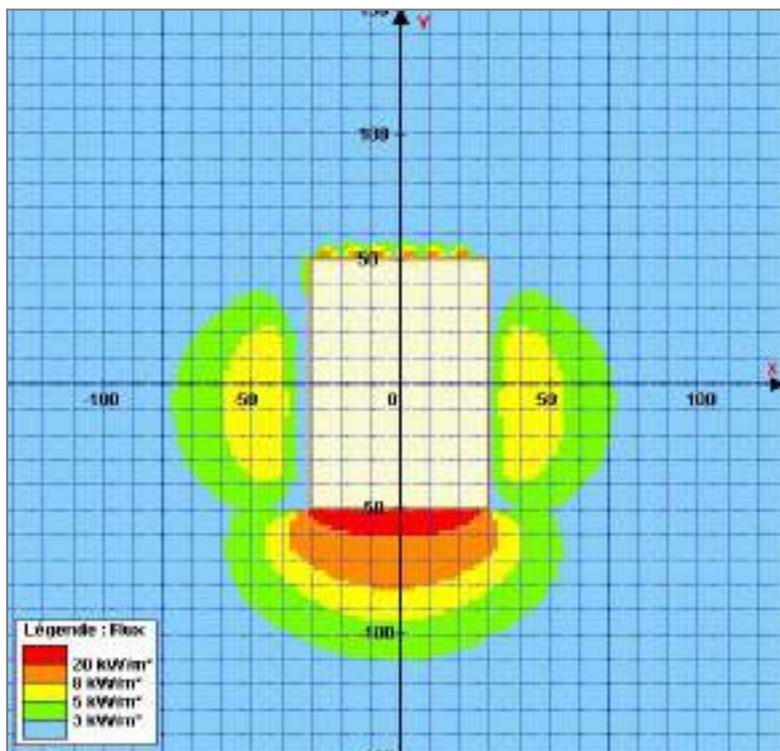
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 6

Rapport flumilog – essai 5

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_5_1
Cellule :	Essai_5
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:25:13
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

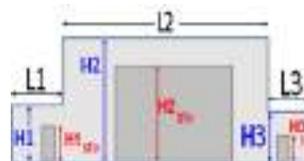
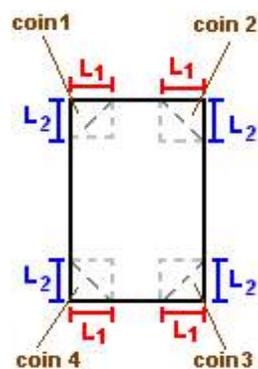
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale				
Longueur maximum de la cellule(m)		100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)		60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)		12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0	
		L2 (m)	0,0	
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0	
		L2 (m)	0,0	
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0	
		L2 (m)	0,0	
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0	
		L2 (m)	0,0	
Hauteur complexe				
	1	2	3	
L (m)	0,0	0,0	0,0	
H (m)	0,0	0,0	0,0	
H sto (m)	0,0	0,0	0,0	



Toiture

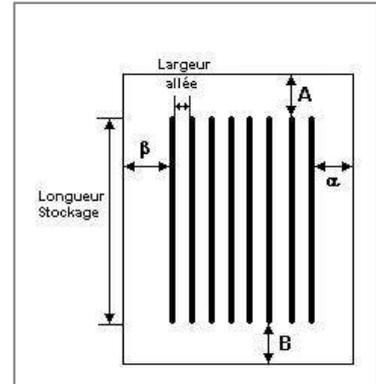
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metalique multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage	12512	palettes
Nombre de niveaux	5	
Mode de stockage	Rack	

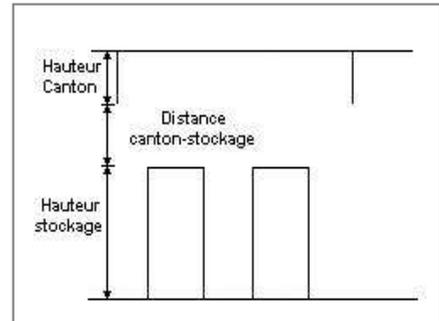
Dimensions

Longueur de stockage	77,0	m
Longueur de préparation A	20,0	m
Longueur de préparation B	3,0	m
Déport latéral α	1,0	m
Déport latéral β	1,0	m
Hauteur maximum de stockage	10,0	m
Hauteur du canton	1,0	m
Ecart entre le haut du stockage et le canton	1,0	m



Stockage en rack

Sens du stockage	dans le sens de la paroi 1
Nombre de double racks	12 m
Largeur d'un double rack	2,2 m
Nombre de racks simples	2 m
Largeur d'un rack simple	1,0 m
Largeur des allées entre les racks	2,3 m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette :	1,2 m	Poids total de la palette :	Par défaut
Largeur de la palette :	0,8 m		
Hauteur de la palette :	1,0 m		
Volume de la palette :	1,0 m ³		
Nom de la palette :	Palette type 1510		

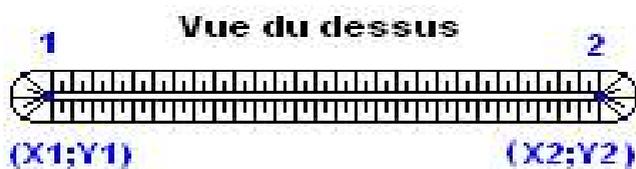
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette :	45,0	min
Puissance dégagée par la palette :	1830,0	kW

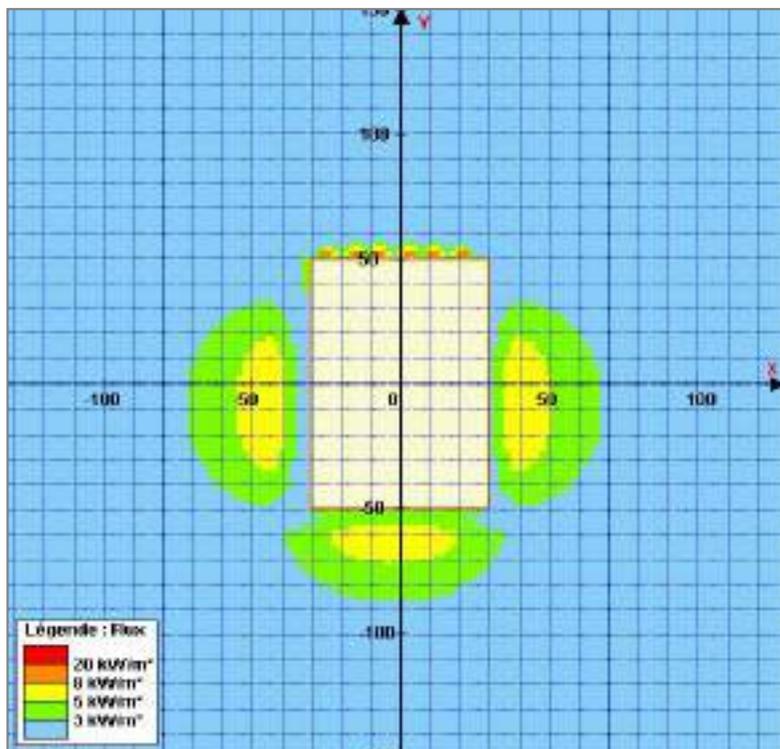
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 7

Rapport flumilog – essai 6

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_6_2
Cellule :	Essai_6
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:29:01
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

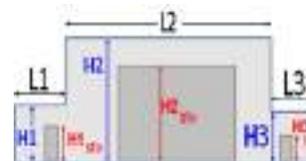
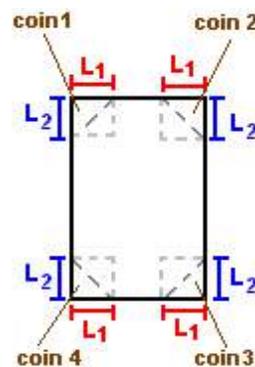
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

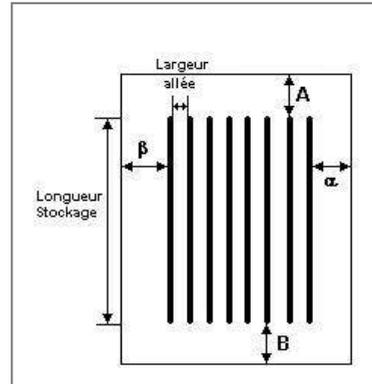
Résistance au feu des poutres (min)	30
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallique multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **12512** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

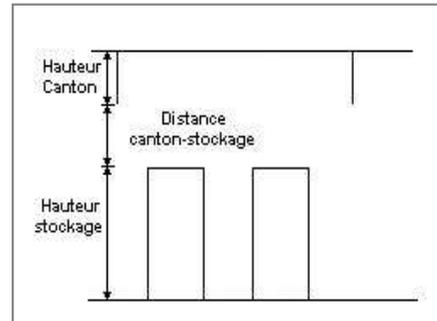
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

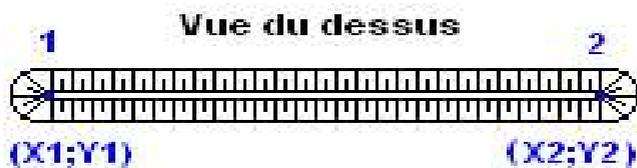
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

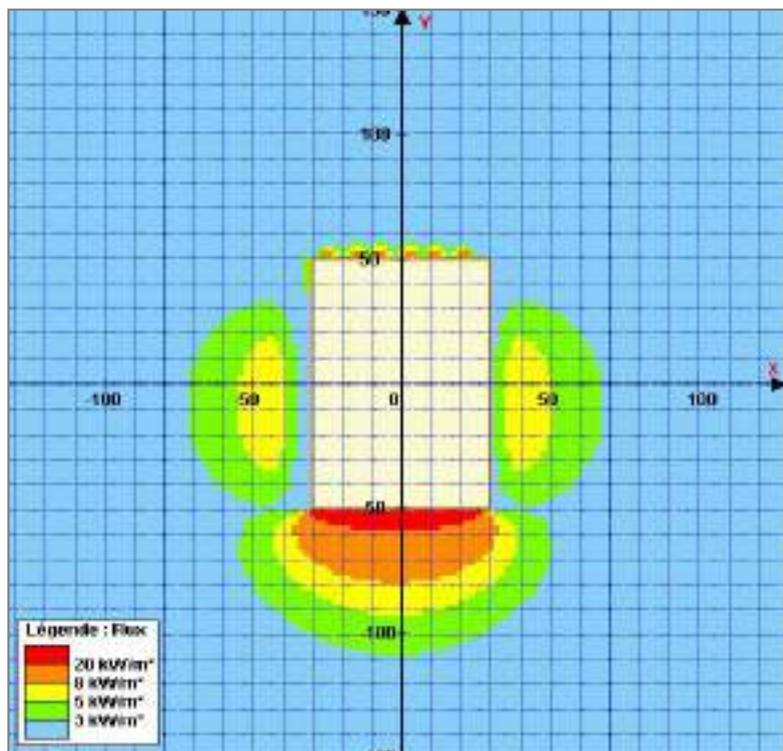
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 8

Rapport flumilog – essai 7

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_7_1
Cellule :	Essai_7
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:26:18
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

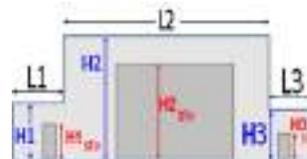
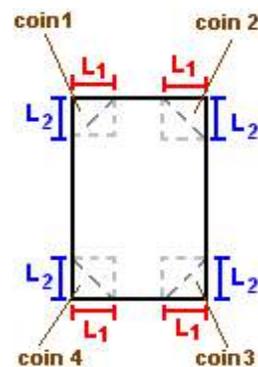
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

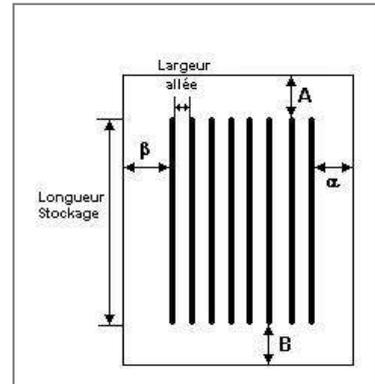
Résistance au feu des poutres (min)	15
Résistance au feu des pannes (min)	15
Matériaux constituant la couverture	metallicque multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **6737** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

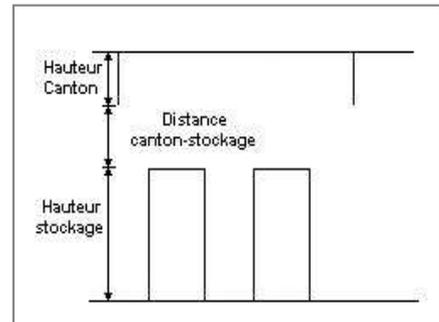
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

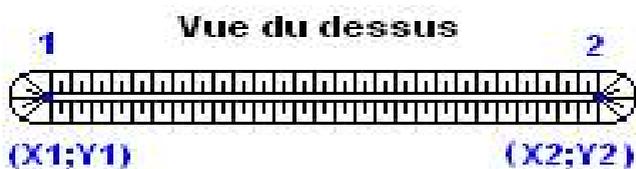
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

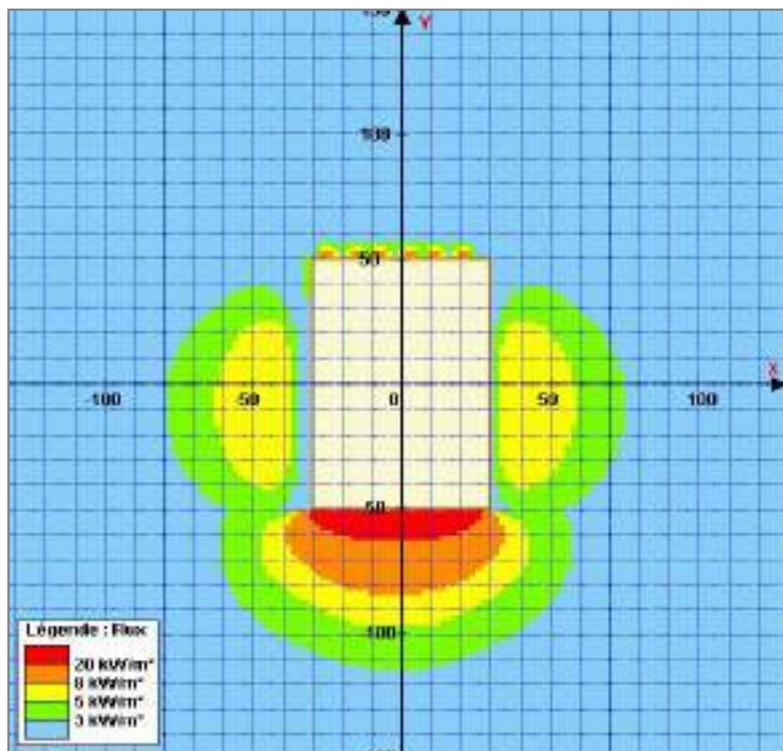
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 9

Rapport flumilog – essai 8

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_8_1
Cellule :	Essai_8
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:26:36
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

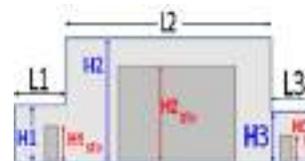
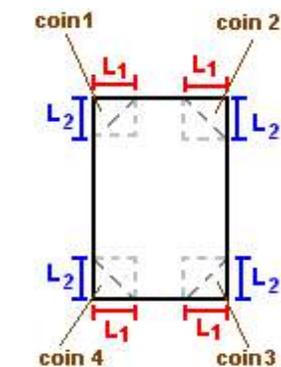
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

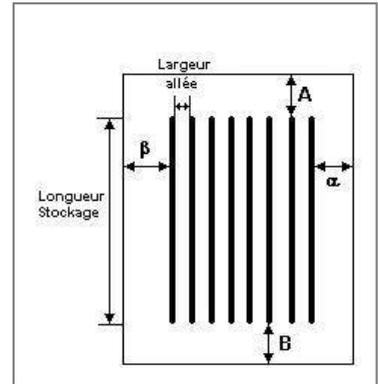
Résistance au feu des poutres (min)	15
Résistance au feu des pannes (min)	15
Matériaux constituant la couverture	metallicque multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **12512** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

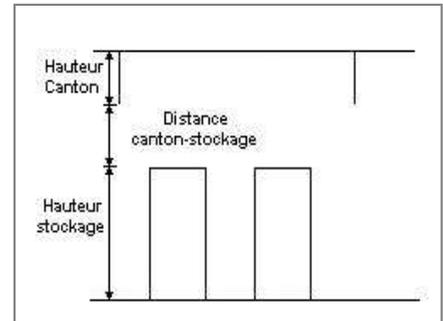
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

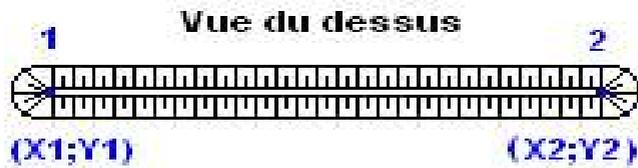
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

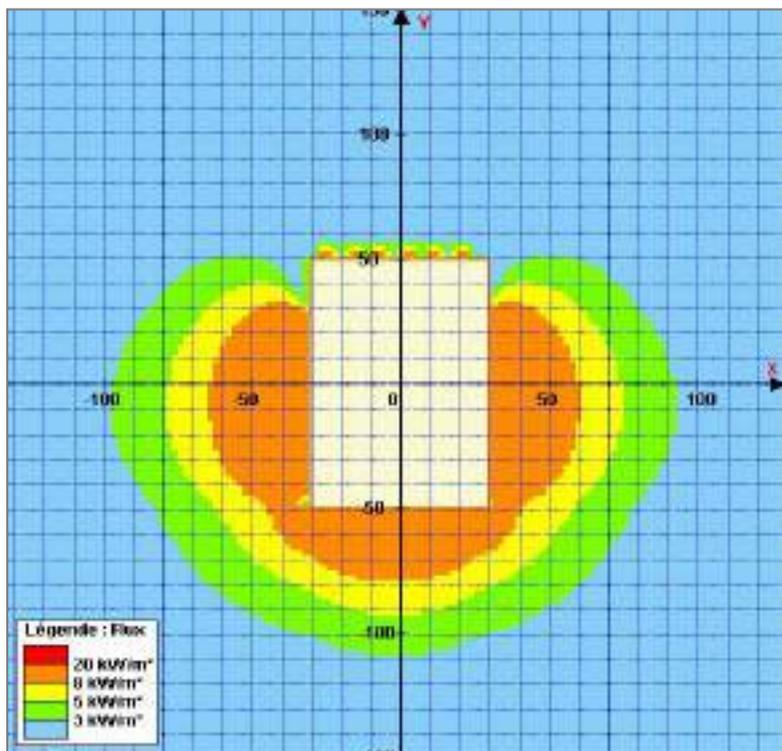
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 10

Rapport flumilog – essai 9

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_9_1
Cellule :	Essai_9
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:26:47
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

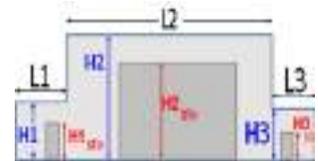
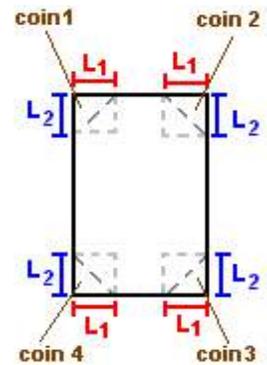
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

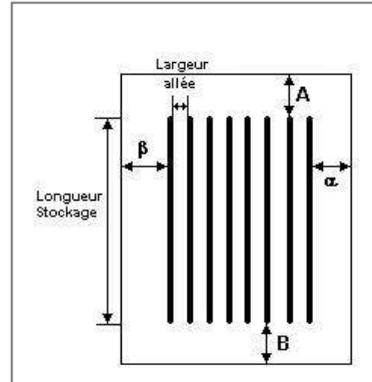
Résistance au feu des poutres (min)	15
Résistance au feu des pannes (min)	15
Matériaux constituant la couverture	metallique multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **12512** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

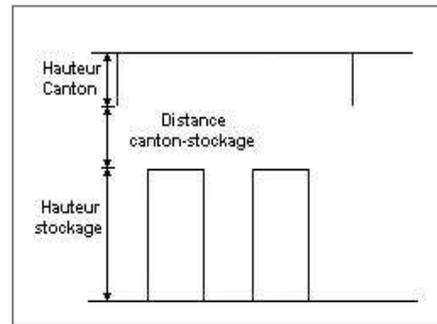
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

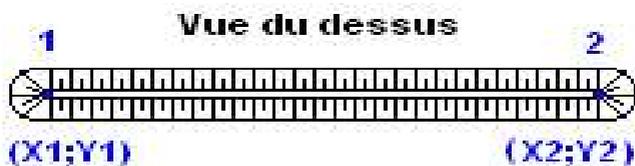
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

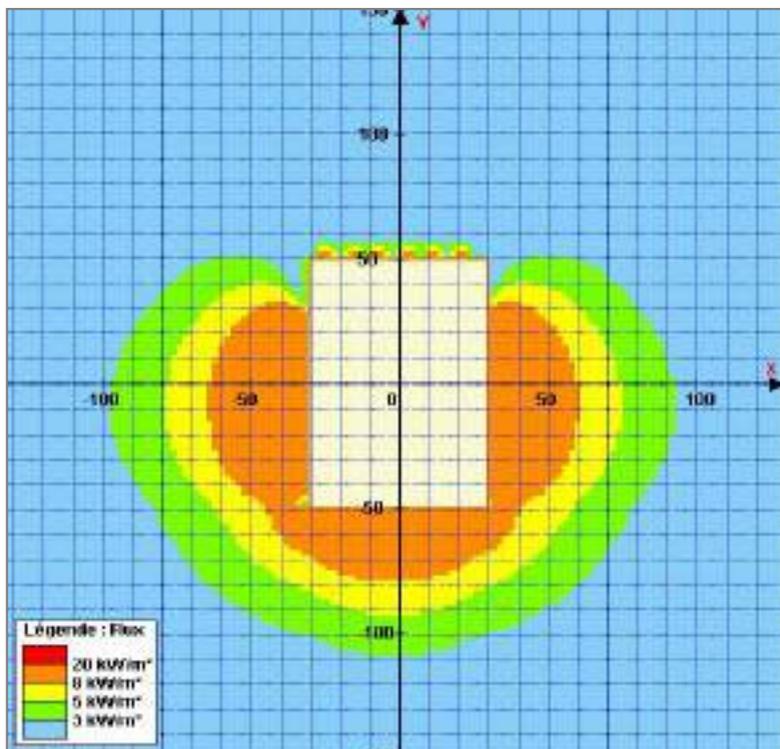
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 11

Rapport flumilog – essai 10

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_10_1
Cellule :	Essai_10
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:26:59
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

I. DONNEES D'ENTREE :

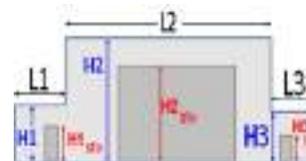
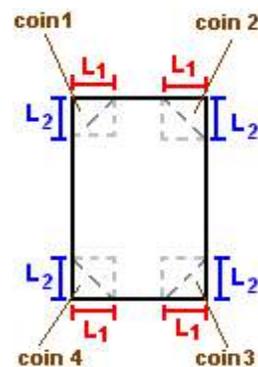
Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0

Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

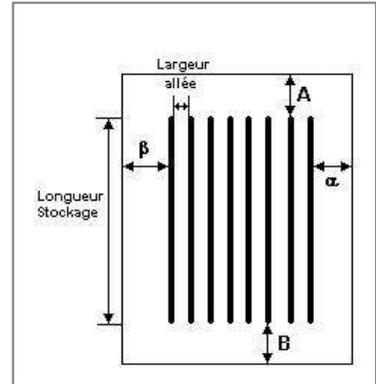
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallicque multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **12512** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

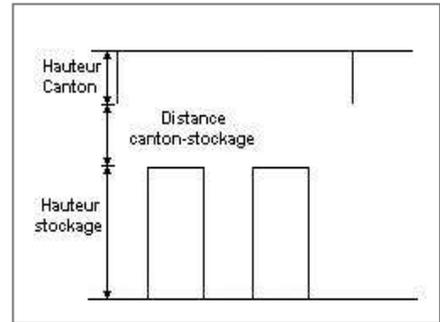
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **450,0** kg
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **2663**

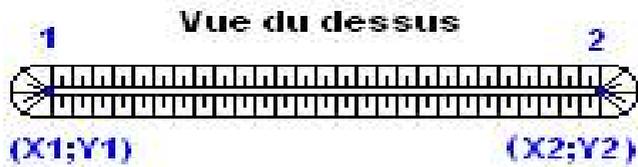
Composition de la Palette (Masse en kg)

Bois	PE	Carton	PVC	PS	Palette Bois	PU
100,0	150,0	30,0	20,0	50,0	20,0	50,0
Acier	NC	NC	NC	NC	NC	NC
50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1875,0** kW

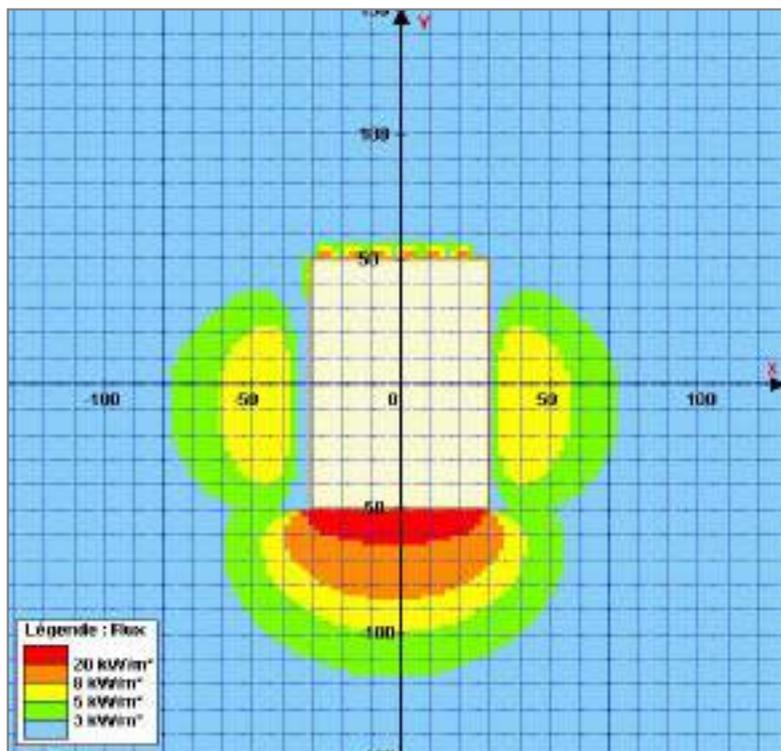
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 12

Rapport flumilog – essai 11

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_11_1
Cellule :	Essai_11
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:27:09
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

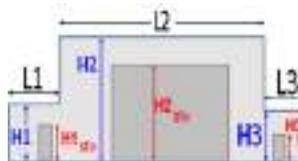
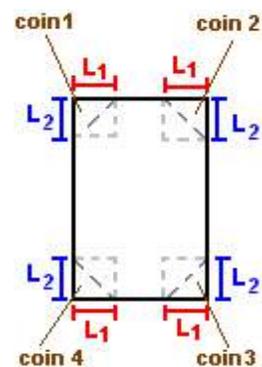
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale				
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0			
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0			
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0			
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0	
		L2 (m)	0,0	
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0	
		L2 (m)	0,0	
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0	
		L2 (m)	0,0	
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0	
		L2 (m)	0,0	
Hauteur complexe				
	1	2	3	
L (m)	0,0	0,0	0,0	
H (m)	0,0	0,0	0,0	
H sto (m)	0,0	0,0	0,0	



Toiture

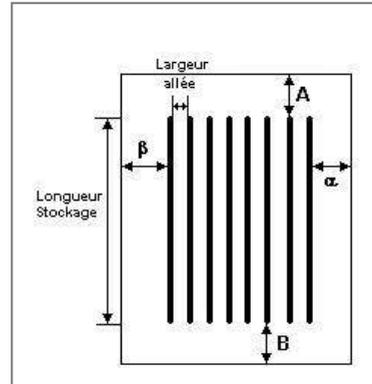
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metalique multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **12512** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

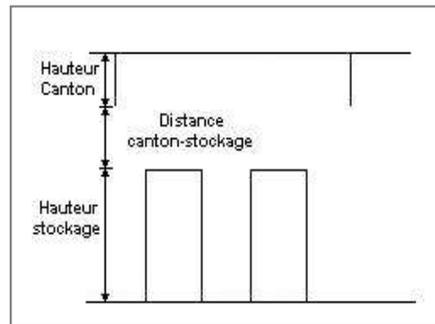
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **450,0** kg
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **2663**

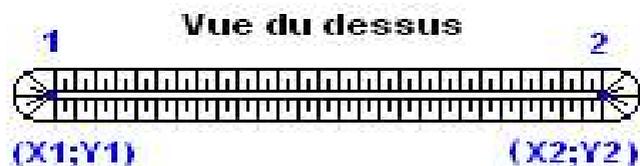
Composition de la Palette (Masse en kg)

Bois	PE	Carton	PVC	PS	Palette Bois	PU
100,0	150,0	30,0	20,0	50,0	20,0	50,0
Acier	NC	NC	NC	NC	NC	NC
50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1875,0** kW

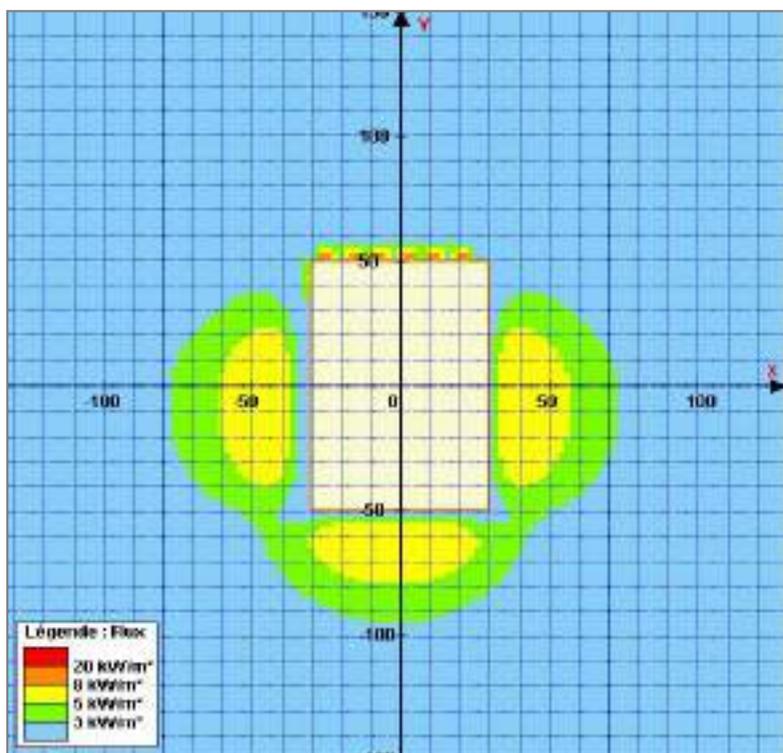
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 13

Rapport flumilog – essai 12

FLUMilog

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safège
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_12_1
Cellule :	Essai_12
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 18:38:56
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

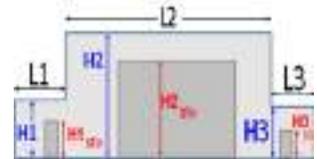
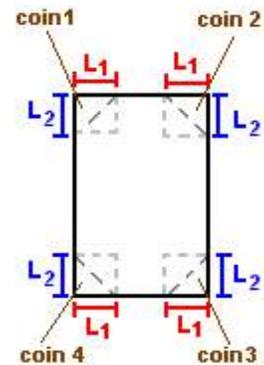
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

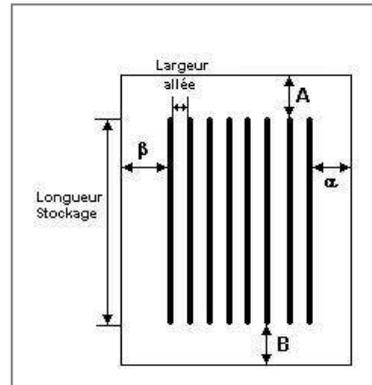
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallicque multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **12512** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

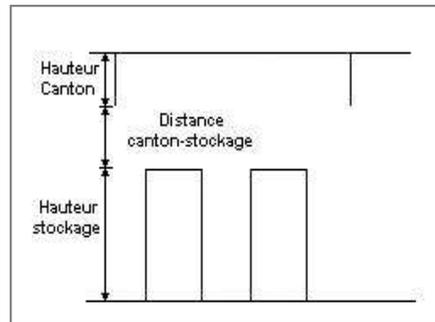
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

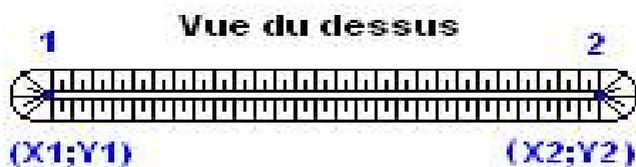
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

NC	NC	NC	NC
0,0	0,0	0,0	0,0

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

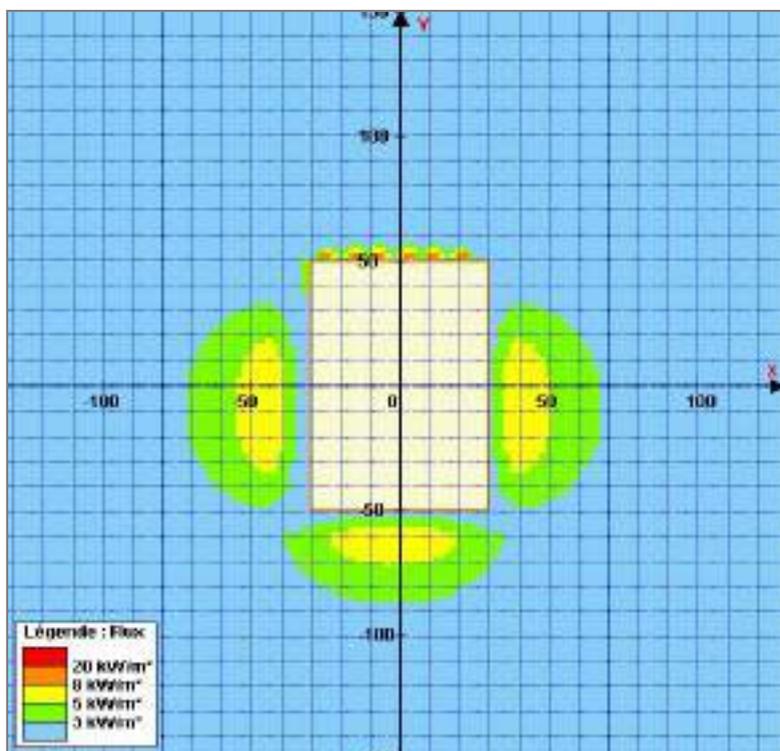
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 14

Rapport flumilog – essai 13

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safege
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_13_1
Cellule :	Essai_13
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:27:34
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

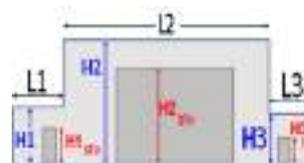
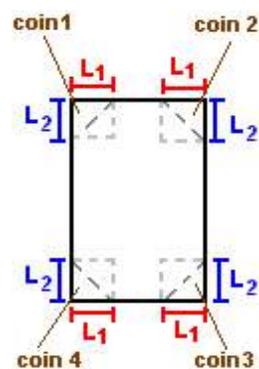
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

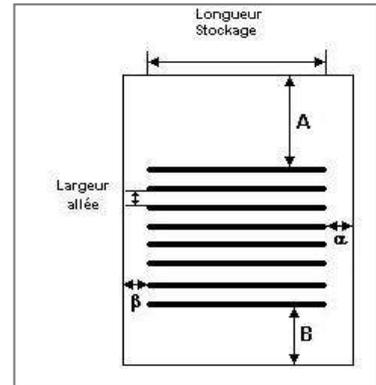
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallic multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage	11962	palettes
Nombre de niveaux	5	
Mode de stockage	Rack	

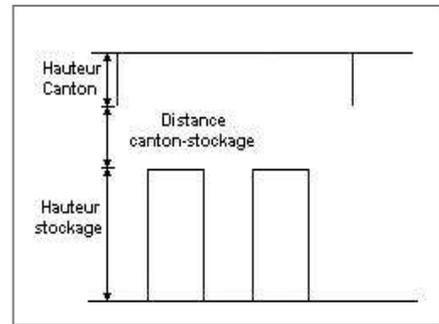
Dimensions

Longueur de stockage	58,0	m
Déport latéral A	20,0	m
Déport latéral B	5,0	m
Longueur de préparation α	1,0	m
Longueur de préparation β	1,0	m
Hauteur maximum de stockage	10,0	m
Hauteur du canton	1,0	m
Ecart entre le haut du stockage et le canton	1,0	m



Stockage en rack

Sens du stockage	dans le sens de la paroi 2	
Nombre de double racks	16	m
Largeur d'un double rack	2,2	m
Nombre de racks simples	1	m
Largeur d'un rack simple	1,0	m
Largeur des allées entre les racks	2,4	m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette :	1,2	m	Poids total de la palette :	Par défaut
Largeur de la palette :	0,8	m		
Hauteur de la palette :	1,0	m		
Volume de la palette :	1,0	m ³		
Nom de la palette :	Palette type 1510			

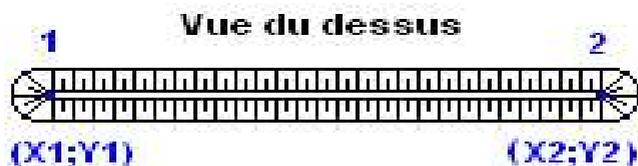
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette :	45,0	min
Puissance dégagée par la palette :	1830,0	kW

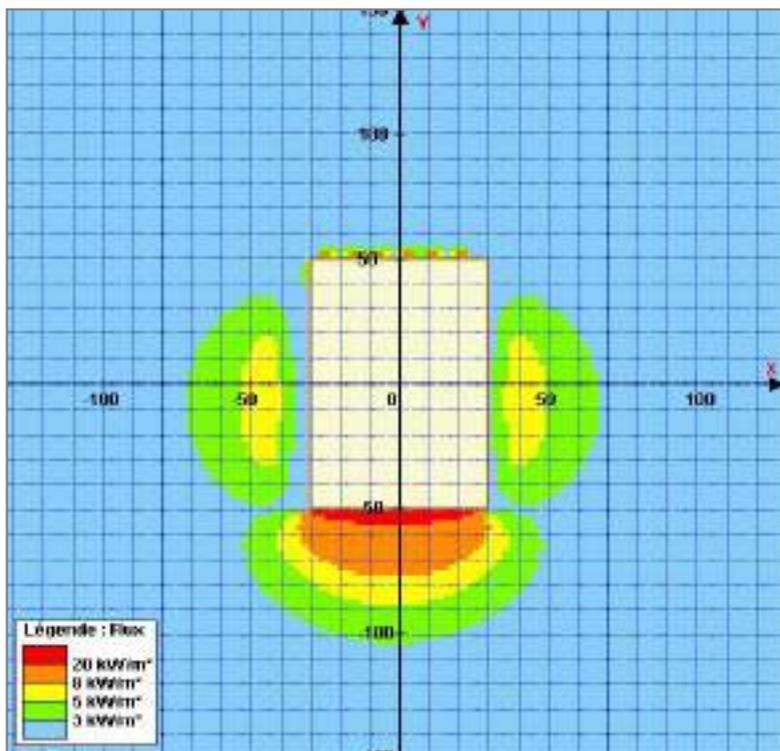
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 15

Rapport flumilog – essai 14

FLUMilog

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safège
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_14_1
Cellule :	Essai_14
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:27:54
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

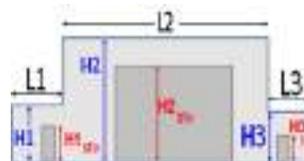
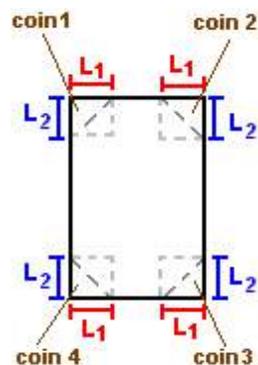
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

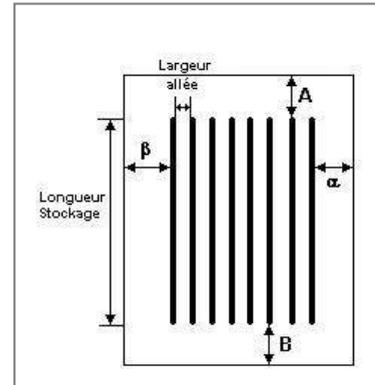
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metalique multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage	12512	palettes
Nombre de niveaux	5	
Mode de stockage	Rack	

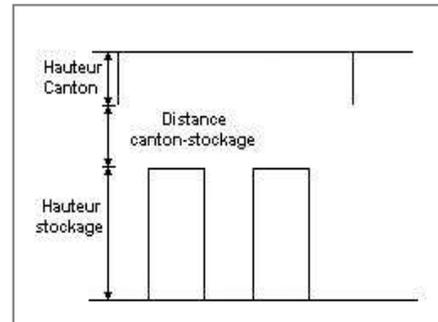
Dimensions

Longueur de stockage	77,0	m
Longueur de préparation A	20,0	m
Longueur de préparation B	3,0	m
Déport latéral α	1,0	m
Déport latéral β	1,0	m
Hauteur maximum de stockage	10,0	m
Hauteur du canton	1,0	m
Ecart entre le haut du stockage et le canton	1,0	m



Stockage en rack

Sens du stockage	dans le sens de la paroi 1	
Nombre de double racks	12	m
Largeur d'un double rack	2,2	m
Nombre de racks simples	2	m
Largeur d'un rack simple	1,0	m
Largeur des allées entre les racks	2,3	m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette :	1,2	m	Poids total de la palette :	Par défaut
Largeur de la palette :	0,8	m		
Hauteur de la palette :	1,0	m		
Volume de la palette :	1,0	m ³		
Nom de la palette :	Palette type 1510			

Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

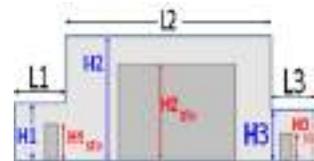
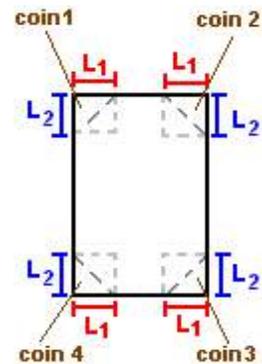
NC	NC	NC	NC
0,0	0,0	0,0	0,0

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette :	45,0	min
Puissance dégagée par la palette :	1830,0	kW

Géométrie Cellule 2

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

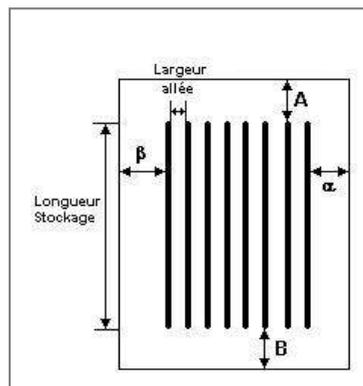
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallique multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°2

Capacité maximale de stockage	6150	palettes
Nombre de niveaux	5	
Mode de stockage	Rack	

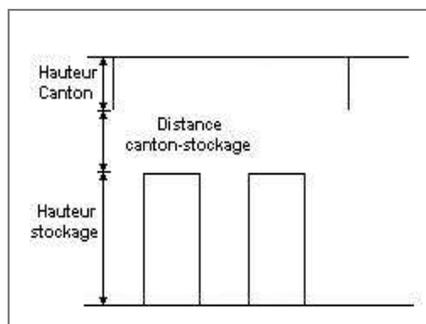
Dimensions

Longueur de stockage	77,0	m
Longueur de préparation A	20,0	m
Longueur de préparation B	3,0	m
Déport latéral α	1,0	m
Déport latéral β	1,0	m
Hauteur maximum de stockage	10,0	m
Hauteur du canton	1,0	m
Ecart entre le haut du stockage et le canton	1,0	m



Stockage en rack

Sens du stockage	dans le sens de la paroi 1	
Nombre de double racks	12	m
Largeur d'un double rack	2,2	m
Nombre de racks simples	2	m
Largeur d'un rack simple	1,0	m
Largeur des allées entre les racks	2,3	m



Palette type de la cellule n°2

Dimensions Palette

Longueur de la palette :	1,2	m	Poids total de la palette :	Par défaut
Largeur de la palette :	0,8	m		
Hauteur de la palette :	1,0	m		
Volume de la palette :	1,0	m ³		
Nom de la palette :	Palette type 1510			

Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

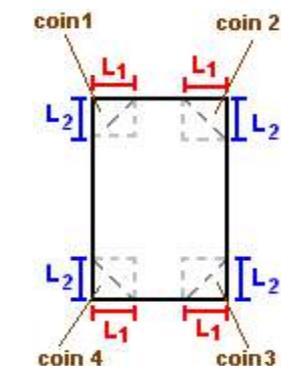
NC	NC	NC	NC
0,0	0,0	0,0	0,0

Données supplémentaires

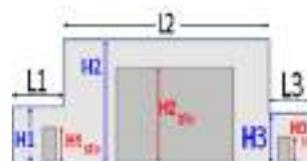
Durée de combustion de la palette :	45,0	min
Puissance dégagée par la palette :	1830,0	kW

Géométrie Cellule 3

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0



Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

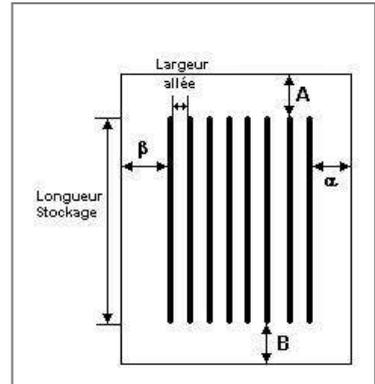
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallicque multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°3

Capacité maximale de stockage **6150** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

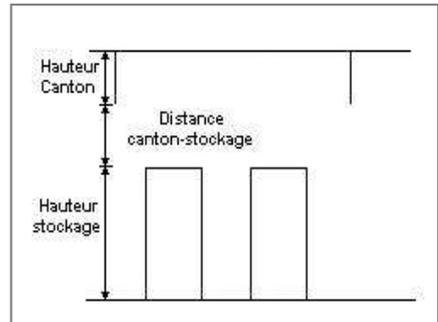
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°3

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

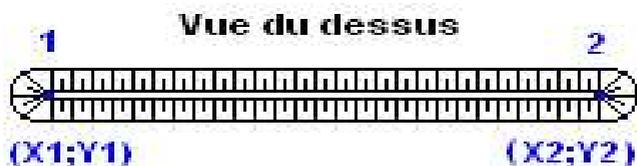
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

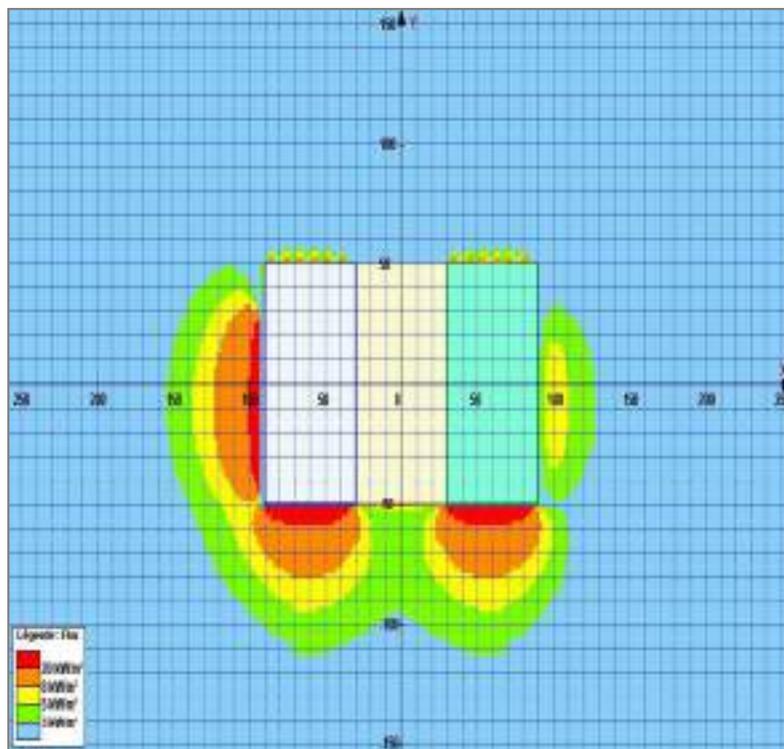
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

Annexe 16

Rapport flumilog – essai 15

FLUM*ilog*

Interface Graphique v. 2.01

Outil de calcul V2.02

Flux Thermiques

Détermination des distances d'effets

Utilisateur :	julie mertz
Société :	safège
Nom du Projet :	Cimebeton_Essai_15_1
Cellule :	Essai_14
Commentaire :	
Date de création du fichier de données d'entrée :	02/08/2010 à 13:28:10
Date de création du fichier de résultats :	2/8/10

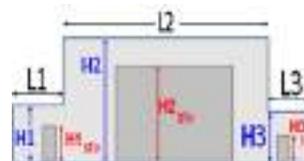
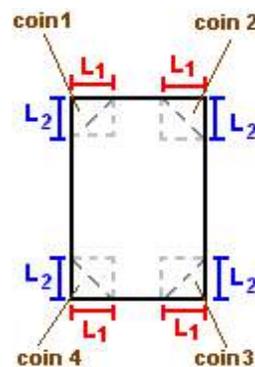
I. DONNEES D'ENTREE :

Donnée Cible

Hauteur de la cible : 1,8 m

Géométrie Cellule 1

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

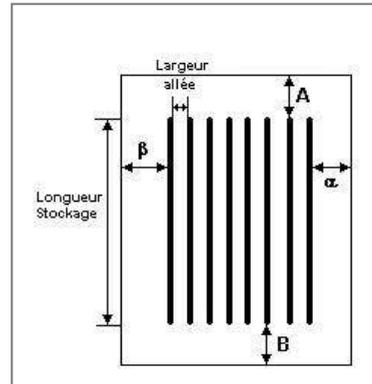
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallicque multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°1

Capacité maximale de stockage **12512** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

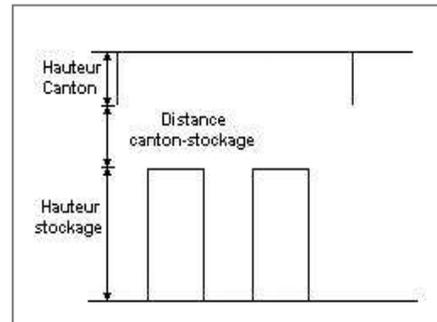
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°1

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

Composition de la Palette (Masse en kg)

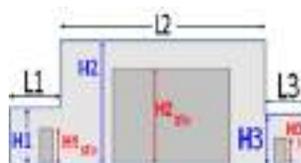
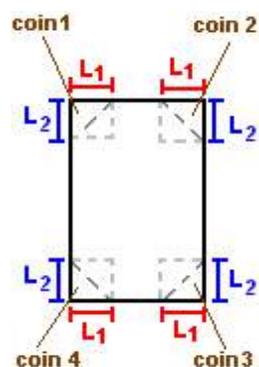
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

Géométrie Cellule 2

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

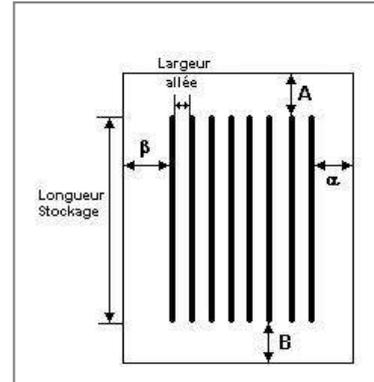
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallicque multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°2

Capacité maximale de stockage	6150	palettes
Nombre de niveaux	5	
Mode de stockage	Rack	

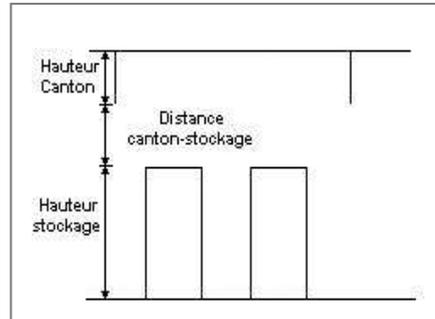
Dimensions

Longueur de stockage	77,0	m
Longueur de préparation A	20,0	m
Longueur de préparation B	3,0	m
Déport latéral α	1,0	m
Déport latéral β	1,0	m
Hauteur maximum de stockage	10,0	m
Hauteur du canton	1,0	m
Ecart entre le haut du stockage et le canton	1,0	m



Stockage en rack

Sens du stockage	dans le sens de la paroi 1	
Nombre de double racks	12	m
Largeur d'un double rack	2,2	m
Nombre de racks simples	2	m
Largeur d'un rack simple	1,0	m
Largeur des allées entre les racks	2,3	m



Palette type de la cellule n°2

Dimensions Palette

Longueur de la palette :	1,2	m	Poids total de la palette :	Par défaut
Largeur de la palette :	0,8	m		
Hauteur de la palette :	1,0	m		
Volume de la palette :	1,0	m ³		
Nom de la palette :	Palette type 1510			

Composition de la Palette (Masse en kg)

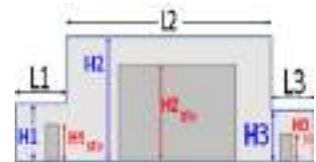
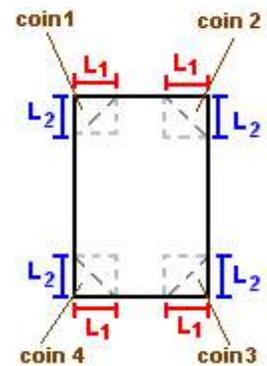
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette :	45,0	min
Puissance dégagée par la palette :	1830,0	kW

Géométrie Cellule 3

Cellule normale			
Longueur maximum de la cellule(m)	100,0		
Largeur maximum de la cellule (m)	60,0		
Hauteur maximum de la cellule (m)	12,0		
Coin 1	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 2	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 3	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Coin 4	non tronqué	L1 (m)	0,0
		L2 (m)	0,0
Hauteur complexe			
	1	2	3
L (m)	0,0	0,0	0,0
H (m)	0,0	0,0	0,0
H sto (m)	0,0	0,0	0,0



Toiture

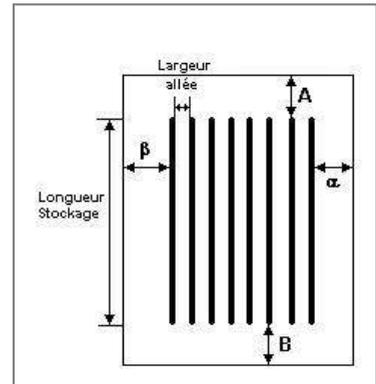
Résistance au feu des poutres (min)	60
Résistance au feu des pannes (min)	30
Matériaux constituant la couverture	metallic multicouches
Nombre d'exutoires	20
Longueur des exutoires (m)	3,0
Largeur des exutoires (m)	2,0

Stockage de la cellule n°3

Capacité maximale de stockage **6150** palettes
 Nombre de niveaux **5**
 Mode de stockage **Rack**

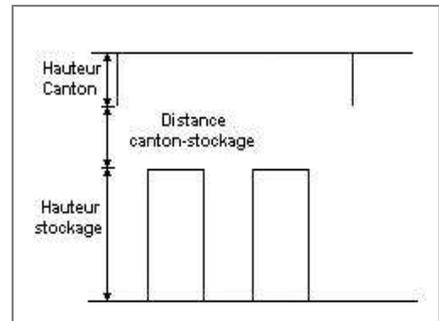
Dimensions

Longueur de stockage **77,0** m
 Longueur de préparation A **20,0** m
 Longueur de préparation B **3,0** m
 Déport latéral α **1,0** m
 Déport latéral β **1,0** m
 Hauteur maximum de stockage **10,0** m
 Hauteur du canton **1,0** m
 Ecart entre le haut du stockage et le canton **1,0** m



Stockage en rack

Sens du stockage **dans le sens de la paroi 1**
 Nombre de double racks **12** m
 Largeur d'un double rack **2,2** m
 Nombre de racks simples **2** m
 Largeur d'un rack simple **1,0** m
 Largeur des allées entre les racks **2,3** m



Palette type de la cellule n°3

Dimensions Palette

Longueur de la palette : **1,2** m Poids total de la palette : **Par défaut**
 Largeur de la palette : **0,8** m
 Hauteur de la palette : **1,0** m
 Volume de la palette : **1,0** m³
 Nom de la palette : **Palette type 1510**

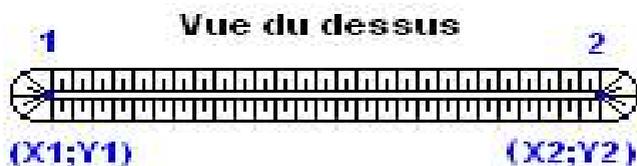
Composition de la Palette (Masse en kg)

NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC						
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NC	NC	NC	NC			
0,0	0,0	0,0	0,0			

Données supplémentaires

Durée de combustion de la palette : **45,0** min
 Puissance dégagée par la palette : **1830,0** kW

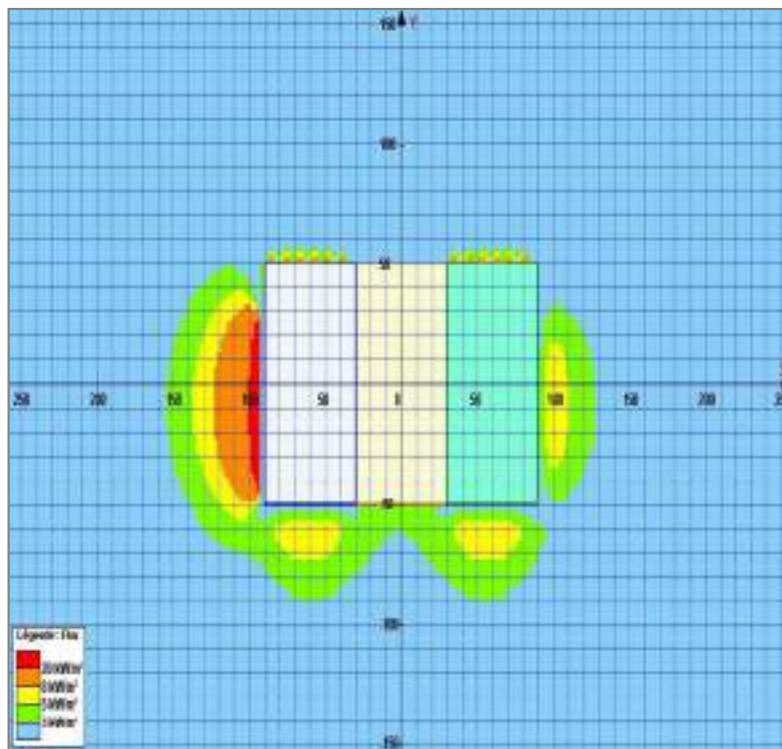
Merlons



Merlon n°	Hauteur (m)	Coordonnées du premier point		Coordonnées du deuxième point	
		X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

II. RESULTATS :

Distance d'effets des flux maximum



Echelle :
une graduation
représente 10 m

**Illustrations
et couverture**

David Lozach

Mise en page et réalisation

Amprincipe Paris

RCS Paris B 389 103 805

Impression

I M E

Baume-les-Dames

Édition août 2011



CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr