

ETUDE DU COMPORTEMENT AU FEU DE PAROIS ET PLANCHERS CONSTITUES DE STRUCTURES BOIS

CONVENTION Y09-12 – ACTION 33 sous action 1
Levée des freins réglementaires et normatifs
à l'usage du bois dans la construction



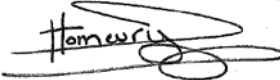
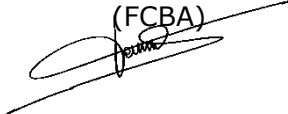
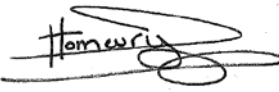
Demandeur de l'étude

DHUP-CODIFAB
Convention Y09-12 – Action 33 sous action 1
92055 Paris La Défense

Référence

26025597-26028282

CSTB-DSSF-rapport d'étude v(1)

Auteur	Vérificateur	Approbateur	Version	Date
Dhionis DHIMA (CSTB)  Jean-Marie GAILLARD (FCBA) 	Stéphane HAMEURY (CSTB)  Serge LE NEVE (FCBA) 	Stéphane HAMEURY 	1.0	28/12/2012



Direction Sécurité, Structures et Feu

Division Expertise Avis Réglementaires et Recherche

☎ : 01.64.68.83.28

☎ : 01.64.68.83.33

@ : secretariatEA2R@cstb.fr

ETUDE DU COMPORTEMENT AU FEU DE PAROIS ET PLANCHERS CONSTITUES DE STRUCTURES BOIS

**CONVENTION Y09-12 – ACTION 33 SOUS ACTION 1
Levée des freins réglementaires et normatifs
à l'usage du bois dans la construction**

Version	Date	Principales modifications effectuées	Partie modifiée
1.0	28/12/2012	Création	/

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

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

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

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

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

SOMMAIRE

1 - OBJET	4
2 - DESCRIPTION SUCCINCTE DES PAROIS VERTICALES ET DES PLANCHERS ETUDIÉS	4
2.1 - PAROIS VERTICALES ETUDIÉES EXPERIMENTALEMENT	4
2.1.1 - <i>Maquettes de parois constituées de structures bois</i>	5
2.1.2 - <i>Parois de grandeur réelle constituées de structures bois</i>	6
2.2 - PLANCHERS ETUDIÉS EXPERIMENTALEMENT	8
2.2.1 - <i>Maquettes de planchers constituées de structures bois</i>	8
2.2.2 - <i>Planchers de grandeur réelle constitués de structures bois</i>	9
3 - RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES.....	12
3.1 - RESULTATS EXPERIMENTAUX DES MAQUETTES DE PAROIS VERTICALES	12
3.2 - RESULTATS EXPERIMENTAUX DES PAROIS VERTICALES DE GRANDEUR REELLE	16
3.3 - ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX DES PAROIS VERTICALES.	19
3.4 - RESULTATS EXPERIMENTAUX DES MAQUETTES DE PLANCHERS	21
3.5 - RESULTATS EXPERIMENTAUX DES PLANCHERS EN GRANDEUR REELLE	21
3.6 - ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX DES PLANCHERS	22
4 - METHODE DE CALCUL DE LA RESISTANCE AU FEU DE PAROIS SEPARATIVES	23
4.1 - DOMAINE D'APPLICATION DE LA METHODE FIT POUR LE DIMENSIONNEMENT DES PAROIS NON PORTEUSES	23
4.2 - DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL FIT POUR LES PAROIS NON PORTEUSES.....	24
4.3 - EXEMPLE DE CALCUL DE LA RESISTANCE AU FEU D'UNE PAROI NON-PORTEUSE SELON FIT	30
5 - METHODE DE CALCUL DE LA RESISTANCE AU FEU DES PAROIS PORTEUSES .	34
5.1 - DETERMINATION DE L'INSTANT DU DEBUT DE LA CARBONISATION DE LA STRUCTURE D'UNE PAROI DONT LE PAREMENT OU L'ECRAN COTE FEU EST COMPOSE DE PLAQUES DE PLATRE	34
5.2 - DETERMINATION DE L'INSTANT DU DEBUT DE LA CARBONISATION DE LA STRUCTURE D'UNE PAROI DONT LE PAREMENT OU L'ECRAN COTE FEU EST COMPOSE DE PANNEAUX BOIS	37
5.3 - DETERMINATION DE L'INSTANT DU DEBUT DE LA CARBONISATION DE LA STRUCTURE D'UNE PAROI DONT LE PAREMENT OU L'ECRAN COTE FEU EST COMPOSE D'UNE COUCHE EN PLAQUES DE PLATRE ET D'UNE COUCHE DE PANNEAUX BOIS.....	38
5.4 - DETERMINATION DE LA RESISTANCE AU FEU DES MONTANTS ET SOLIVES DES PAROIS VERTICALES ET HORIZONTALES.	39
6 - CONCLUSIONS.....	41
7 - DOCUMENTS DE REFERENCE.....	43
ANNEXE 1 – POSITIONNEMENT DES THERMOCOUPLES.....	44

1 - OBJET

L'objet de cette étude est d'étudier le comportement au feu de différentes configurations de parois verticales (murs) et horizontales (planchers) constituées de structures bois et protégées d'écrans en plaques de plâtre ou d'écrans à base de panneaux de bois. Afin d'assurer les durées de résistance au feu de ces éléments de construction, deux variantes sont proposées dans cette étude :

1. La première variante présente les solutions techniques pour lesquelles la durée de résistance au feu requise pour les parois est assurée uniquement par les écrans situés côté feu ;
2. La seconde présente les solutions techniques pour lesquelles la durée de résistance au feu requise des parois est assurée par les écrans exposés et non exposés au feu. La durée de stabilité au feu de la structure des parois est très importante pour cette variante. La méthode de calcul proposée pour la deuxième variante est basée sur le guide "Fire Safety in Timber Buildings"[1].

2 - DESCRIPTION SUCCINCTE DES PAROIS VERTICALES ET DES PLANCHERS ETUDIES

2.1 - Parois verticales étudiées expérimentalement

Le comportement au feu de parois constituées de structures bois protégées de parements en plaques de plâtre ou en panneaux bois, à l'intérieur desquels sont insérés différents types d'isolants, a été étudié expérimentalement à l'aide de 12 essais de résistance au feu. Ces essais sont décrits en détail dans les rapports d'essais n° RS11-053/A à RS11-053/L [2].

Les deux premiers essais ont permis de définir la résistance au feu d'un total de huit maquettes, quatre maquettes ayant été testées simultanément pour chacun des deux essais. A chaque essai, les quatre maquettes ne diffèrent que par le type d'isolant inséré entre les deux parements. L'objectif de ces deux premiers essais a été d'identifier l'isolant qui conduit à la plus courte durée de résistance au feu des maquettes. L'isolant anisi retenu est ensuite mis en œuvre pour les essais de résistance au feu de parois grandeur réelle. Pour la suite de l'étude, on suit donc l'hypothèse que, pour toutes les parois testées, les durées de résistance au feu déterminées avec l'isolant retenu (laine de verre dans notre cas) sont valables pour tous les autres types d'isolants préalablement testés dans les huit maquettes. Cette hypothèse, qui se place du côté de la sécurité, a permis d'optimiser le nombre d'essais de parois.

2.1.1 - Maquettes de parois constituées de structures bois

Les deux essais de maquettes réalisés sont constitués chacun de quatre maquettes de dimensions 1,20 m par 1,20 m. Leurs compositions sont quasiment identiques. La différence entre ces deux essais réside dans les types d'isolants et les types de parements côté feu qui constituent les éprouvettes. Pour le premier essai, le parement côté feu des quatre éprouvettes est constitué de deux couches de plaques de plâtre BA13 standard (type A). La figure 2.1.1 représente une coupe horizontale type des maquettes (M1 à M4) du premier essai de maquettes.

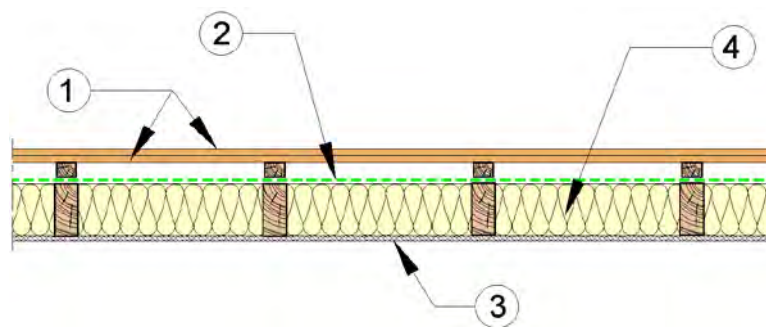


Figure 2.1.1 : Coupe horizontale type des éprouvettes du premier essai.

La composition des éprouvettes du premier essai de maquettes est :

1. 2 x BA13 type A (parement côté feu),
2. pare vapeur,
3. panneau bois type OSB (2 x 9 mm),
4. isolant,
5. montant 100 x 36 (mm), essence Epicéa de masse volumique 450 kg/m³.

Chaque éprouvette a un type d'isolant différent (voir rapport d'essais n° RS11-053/A). Ces isolants sont :

- ✓ laine de verre (kraft sur une face) d'épaisseur 100 mm et de masse volumique 15 kg/m³,
- ✓ ouate de cellulose d'épaisseur 100 mm et de masse volumique 48 kg/m³,
- ✓ fibre de bois d'épaisseur 100 mm et de masse volumique 50 kg/m³,
- ✓ chanvre d'épaisseur 100 mm et de masse volumique 30 kg/m³,

La figure 2.1.2 représente une coupe horizontale type des maquettes (M5 à M 8) du deuxième essai de maquettes.

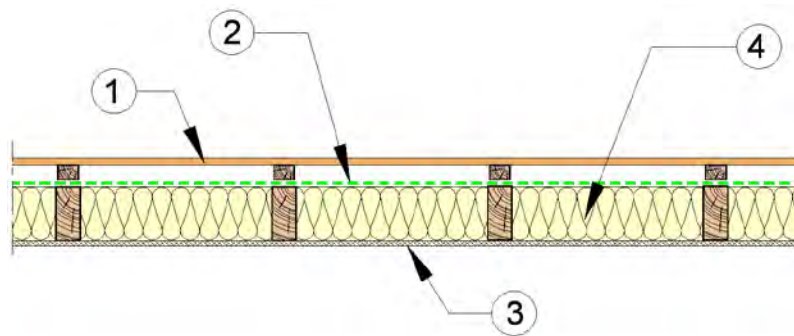


Figure 2.1.2: Coupe horizontale type des éprouvettes du deuxième essai.

La composition des éprouvettes du deuxième essai de maquettes est :

1. 1 x BA15 type F,
2. pare vapeur,
3. panneau bois type OSB (2 x 9 mm),
4. isolant,
5. montant 100 x 36 (mm), essence Epicéa de masse volumique 450 kg/m³.

Pour le deuxième essai de maquettes, le parement côté feu des quatre éprouvettes est constitué d'une couche de plaques de plâtre BA15 spécial feu (type F). Pour ces maquettes les quatre types d'isolants suivants ont été testés (voir rapport d'essais n° RS11-053/B) :

- ✓ laine de verre (kraft sur une face) d'épaisseur 100 mm et de masse volumique 15 kg/m³,
- ✓ ouate de cellulose d'épaisseur 100 mm et de masse volumique 48 kg/m³,
- ✓ fibre de bois d'épaisseur 100 mm et de masse volumique 50 kg/m³,
- ✓ laine de mouton d'épaisseur 100 mm et de masse volumique 13 kg/m³.

2.1.2 - Parois de grandeur réelle constituées de structures bois

Afin de déterminer la durée de résistance au feu de différents types de parois, 10 essais de résistance au feu ont été effectués. Les parois testées étaient de dimensions 3 m x 3 m. La figure 2.1.3 représente une coupe horizontale type de ces parois. Les montants de section 100 x 45 (mm) sont espacés de 600 mm. Pour toutes les éprouvettes de parois, les parements côté feu ont été fixés sur des tasseaux de section 38 x 27 mm. Ces tasseaux sont positionnés verticalement et sont fixés sur les champs des montants, du côté du parement côté feu.

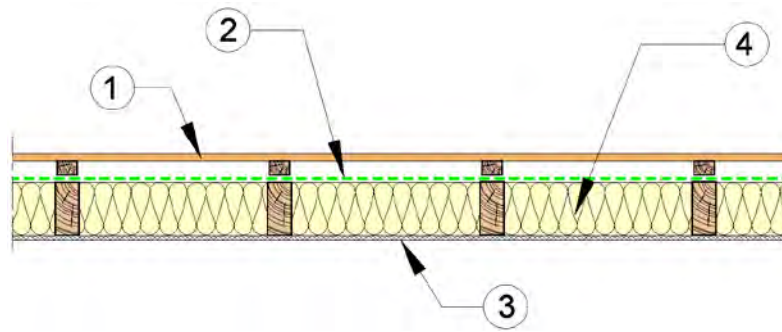


Figure 2.1.3 : Coupe horizontale des parois testées au feu.

La composition des éprouvettes du premier essai de maquettes est :

1. parement exposé feu,
2. pare vapeur,
3. parement non opposé au feu,
4. isolant laine de verre,
5. montant.

Dans le tableau 2.1.1 sont données les compositions des parements des parois de taille réelle testées au feu, afin de définir leur durée de résistance au feu.

Les parements en bois côté feu ont été choisis avec deux couches afin d'identifier de manière exacte la vitesse de carbonisation des deux couches. En effet, les thermocouples placés à l'interface entre les deux couches et sur la face côté cavité de la deuxième couche évitent toute erreur de mesure de température relative aux positionnements de ces capteurs.

Nr. d'essai	Parement exposé au feu	Parement non exposé au feu	Pas des fixations des différentes couches des parements côté feu (mm)	
			1 ^{ère}	2 ^{ème}
RS11-053/C	1 BA13A	2 OSB (2*9 mm)	300	
RS11-053/D	2 BA13A	2 OSB (2*9 mm)	750	300
RS11-053/E	2 BA13A	2 OSB (2*9 mm)	600	300
RS11-053/F	1 BA18D	2 OSB (2*9 mm)	300	
RS11-053/G	2 OSB (12+12)	2 OSB (2*9 mm)	600	300
RS11-053/H	1 BA13A + 1 OSB (1*9 mm)	1 MDF(1*15 mm)	600 (OSB)	300
RS11-053/I	Bardage épicea 18 mm + 1 OSB (1*12 mm)	2 BA13A	400 (OSB)	146
RS11-053/J	2 BA13F	Moitié 2 OSB (2*9) + moitié 2 contreplaqué (2*9 mm)	600	615
RS11-053/K	1 BA13A + 1 BA18D	1 OSB (1*9 mm)	600	300
RS11-053/L	2 BA15F	1 OSB (1*9 mm)	600	300

Tableau 2.1.1 : Composition des parements des parois testées au feu.

2.2 - Planchers étudiés expérimentalement

Le comportement au feu de planchers constitués de structures bois a été étudié expérimentalement à l'aide de 12 essais de résistance au feu. La structure en bois de ces planchers est protégée d'écrans en plaques de plâtre ou en panneaux bois sur lesquels (sur la structure de l'écran ou dans le plénum créé par le plancher et l'écran) sont insérés différents types d'isolants. Les 12 essais sont décrits en détail dans les rapports d'essais n° RS12-001 [3] et RS12-098 à RS12-108 [4]. (Voir tableau 2.2.1). Un 13^{ème} essai a permis d'étudier le comportement au feu d'un plancher constitué uniquement de CLT (voir figure 2.2.5).

Le rapport d'essais RS12-001 décrit un essai de quatre maquettes testées simultanément. La différence entre ces quatre maquettes réside dans le type d'isolant inséré dans le plénum du plancher. Comme pour les parois, l'objectif de cet essai de maquettes a été d'identifier l'isolant qui conduit à la plus courte durée de résistance au feu des maquettes de plancher. Ensuite, cet isolant a été retenu pour toutes les éprouvettes de planchers de grandeur réelle testées au feu. Donc, pour la suite de l'étude, on suit l'hypothèse que, pour tous les planchers testés, les durées de résistance au feu déterminées avec l'isolant retenu (laine de verre) sont valables pour tous les autres types d'isolants. Cette hypothèse, qui se place du côté de la sécurité, a permis d'optimiser le nombre d'essais de planchers.

2.2.1 - Maquettes de planchers constituées de structures bois

Les dimensions des quatre maquettes de planchers sont 1,85 x 1,30 (m). La seule différence entre ces quatre maquettes réside dans le type d'isolant inséré dans le plénum. La figure 2.2.1 représente une coupe verticale type des maquettes de planchers.

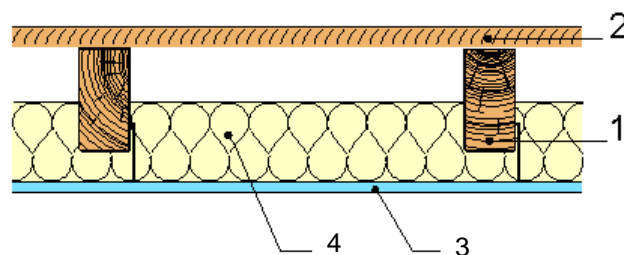


Figure 2.2.1: Coupe verticale d'une éprouvette de maquette de plancher.

Les quatre maquettes ont été constituées :

1. de solives de section 175 x 63 mm, espacées de 600 mm,
2. d'un revêtement constitué de panneaux OSB d'épaisseur 15 mm,
3. d'un écran constitué d'une seule couche de plaques de plâtre BA15 de type F,
4. d'un isolant.

L'écran est fixé sur une ossature métallique en acier, elle-même fixée sur les solives. Cette ossature sert également de support pour l'isolant dans le plénum. Les fourrures sont espacées de 600 mm. Les fixations des écrans sur les fourrures sont espacées de 250 mm. Chaque éprouvette a un type d'isolant différent (voir rapport d'essais n° RS12-001). Ces isolants sont :

- ✓ A - laine de verre (kraft sur une face) d'épaisseur 100 mm,
- ✓ B - fibre de bois d'épaisseur 100 mm,
- ✓ C - laine de roche d'épaisseur 100mm,
- ✓ D - ouate de cellulose d'épaisseur 100 mm.

La masse volumique des isolants est la même que celle des isolants utilisés pour les parois. La masse volumique de la laine de roche est de 26 kg/m³.

2.2.2 - Planchers de grandeur réelle constitués de structures bois

Afin de déterminer la durée de résistance au feu de différents types de planchers, 12 essais de résistance au feu ont été effectués. Les planchers testés étaient de dimensions 4,60 x 2,97 (m). Si l'on prend en compte les configurations des douze éprouvettes testées, les planchers peuvent être insérés dans les quatre types représentés par les coupes montrées sur les figures 2.2.2 à 2.2.5.

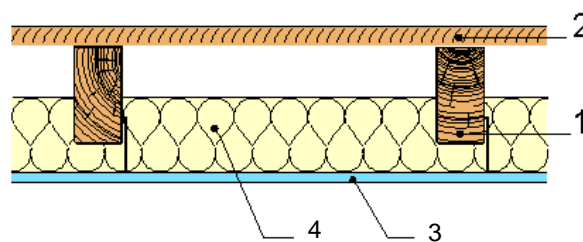


Figure 2.2.2: Coupe verticale de plancher testé (type 1 : 9 configurations).

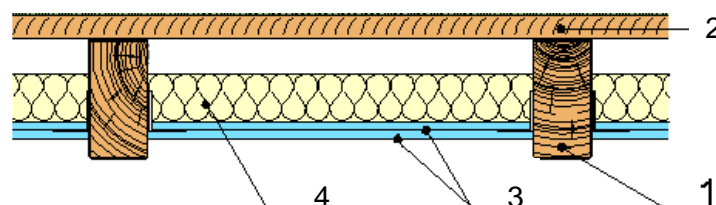


Figure 2.2.3 : Coupe verticale de plancher testé (type 2 : 1 configuration).

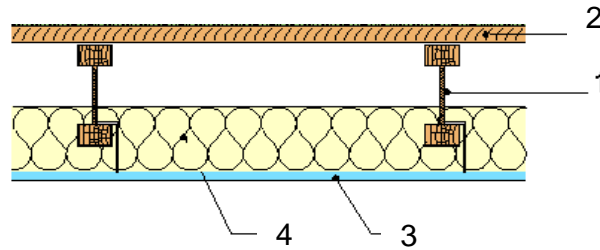


Figure 2.2.4 : Coupe verticale de plancher testé (type 3 : 1 configuration).

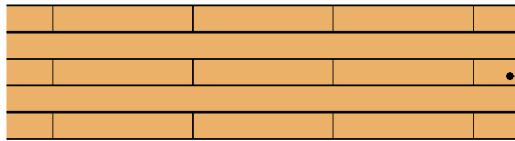


Figure 2.2.5 : Coupe verticale de plancher testé (type 4 : 1 configuration).

Les éprouvettes (planchers) des configurations type 1 et 2 sont constituées :

1. de solives de section 175 x 63 mm, espacées de 600 mm,
2. d'un revêtement en panneaux OSB d'épaisseur 15 mm,
3. d'une ossature métallique en acier, fixée sur les solives et support à la fois de l'écran protecteur et de l'isolant placé dans le plénum,
4. d'un isolant de type laine de verre.

L'éprouvette de type 3 est constituée quasiment des mêmes éléments, mais les solives sont de type "I". Les dimensions de ces solives sont : hauteur totale 240 mm, la largeur et l'épaisseur des semelles sont respectivement 60 et 45 mm et l'épaisseur de l'âme est de 6 mm.

Les écrans horizontaux des éprouvettes de types 1 à 3 sont fixés sur des structures en acier. Ces structures sont composées de fourrures STIL F530 espacées de 600 mm. Les fourrures sont fixées sur les solives des planchers à l'aide de suspentes (types 1 et 3) ou de cornières (type 2). Les détails sur les fixations de la structure porteuse des écrans de protection sont donnés dans les rapports de résistance au feu de référence. Pour les éprouvette de type 2, l'ossature métallique support permet que l'écran soit inséré entre les solives (voir figure 2.2.3).

Le tableau 2.2.1 donne les compositions des écrans de protection des planchers et les pas de fixation de ces écrans. Il faut rappeler que les fourrures des ossatures, sur lesquelles sont fixés les écrans, sont espacées de 600.

Nr. d'essai	Composition de l'écran	Pas des fixations des différentes couches des écrans (mm)		
		1ère	2ème	3ème
RS12-098	1 BA13A	250		
RS12-099	2 BA13A	600	250	
RS12-100	1 BA15F	250		
RS12-101	1 BA18D	250		
RS12-102	1*25 mm contreplaqué (1/2 ignifugé + 1/2 non-ignifugé)	250		
RS12-103	1*22 mm contreplaqué (non-ignifugé)	250		
RS12-104	2 BA15 F	600	250	
RS12-105	1 BA25	250		
RS12-106	1 BA13 + 1 BA18	600	250	
RS12-107	3 BA15F	600	600	250
RS12-108	2 BA18D	600	250	

Tableau 2.2.1 : Composition des écrans des planchers testés au feu.

Le plancher de type 4 est un plancher composé de planches croisées (CLT) de 9 couches, non protégées, d'épaisseur 195 (voir figure 2.2.6). Les épaisseurs des couches successives, en mm, sont : 17+33+17+17+27+17+17+33+17.

Les couches d'épaisseur 17 situées entre les couches d'épaisseurs 33 et 27 sont positionnées comme si elles formaient une seule couche (dans la même direction). Ce plancher est chargé mécaniquement avec une charge équivalente de l'ordre de 450 daN/m² (pour les détails voir rapport de référence RS13-068).



Tableau 2.2.2 : Plancher CLT d'épaisseur 195 testé au feu.

3 - RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES

3.1 - Résultats expérimentaux des maquettes de parois verticales

Dans le tableau 3.1.1 sont résumés les paramètres les plus importants qui déterminent la durée de résistance au feu des maquettes testées, ainsi que les durées de résistance au feu déterminées expérimentalement pour ces maquettes.

Ces résultats montrent que, quel que soit le parement côté feu, les parois équipées d'un isolant du type laine de verre ont les durées de résistance au feu les plus courtes.

Par conséquent, pour tous les essais de parois grandeur réelle (3m x 3m), il a été décidé d'utiliser comme isolant la laine de verre.

Sur les figures 3.1.1 et 3.1.2 sont présentées respectivement les températures mesurées sur la face côté isolant du parement côté feu des maquettes M1 à M4 et M5 à M8.

Pour un parement constitué de 2 couches de plaques de plâtre standard BA13, la figure 3.1.1 montre que la combustion du bois situé dans le dos du parement côté feu entre deux montants peut commencer à partir de la 36^{ème} minute après le démarrage du feu.

Pour un parement constitué d'une couche de plaques de plâtre spécial feu BA15, la figure 3.1.2 montre que la combustion du bois situé dans le dos du parement côté feu entre deux montants peut commencer à partir de la 24^{ème} minute après le démarrage du feu.

Parement exposé au feu	Parement non exposé au feu	Type d'isolant	Chute 1 ^{ère} couche du parement côté feu (min)	Chute 2 ^{ème} couche du parement côté feu (min)	Instant du début de la combustion des montants (min)	Durée réelle de résistance au feu	Classement
2 BA13A	20SB (2*9 mm)	Laine de verre	41	41	38	EI49	EI30
		Ouate de cellulose	29,5	pas de chute	39	EI50	EI30
		Fibres de bois	24	44	36	EI50	EI30
		Chanvre	28	45,5	37	EI50	EI30
1 BA15F		Laine de verre	65	-	24	EI65	EI60
		Ouate de cellulose	77	-	25	EI77	EI60
		Fibres de bois	73	-	30	EI73	EI60
		Laine de mouton	72	-	27	EI78	EI60

Tableau 3.1.1 : Durées de résistance au feu des maquettes des parois testées.

Sur les figures 3.1.3 et 3.1.4 sont présentées respectivement les températures mesurées à l'interface montant-parement côté feu des maquettes M1 à M4 et M5 à M8. Les températures mesurées à ces niveaux sont légèrement différentes de celles montrées sur les figures 3.1.1 et 3.1.2. Cette différence pourrait venir, soit de l'influence de l'humidité du bois des montants en contact avec le parement, soit de l'influence des joints des plaques de plâtre situés au niveau des montants.

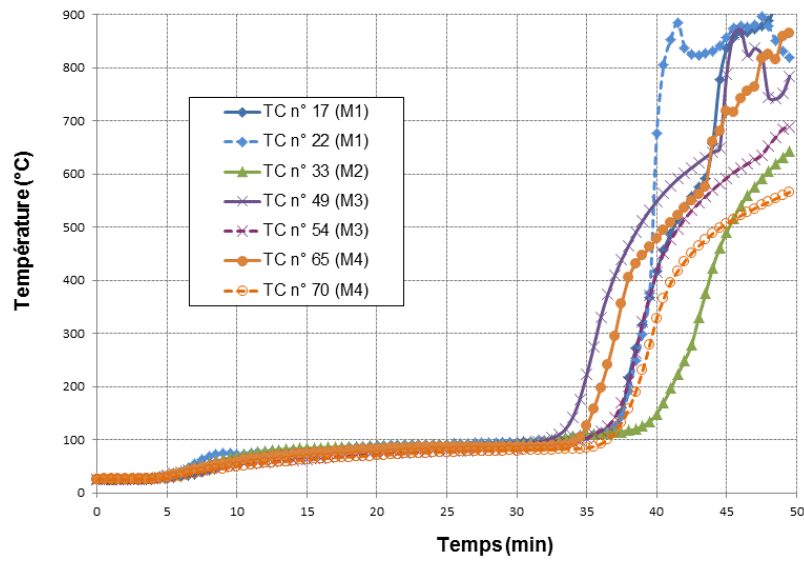


Figure 3.1.1 : Températures mesurées sur la face côté isolant du parement côté feu (M1 à M4).

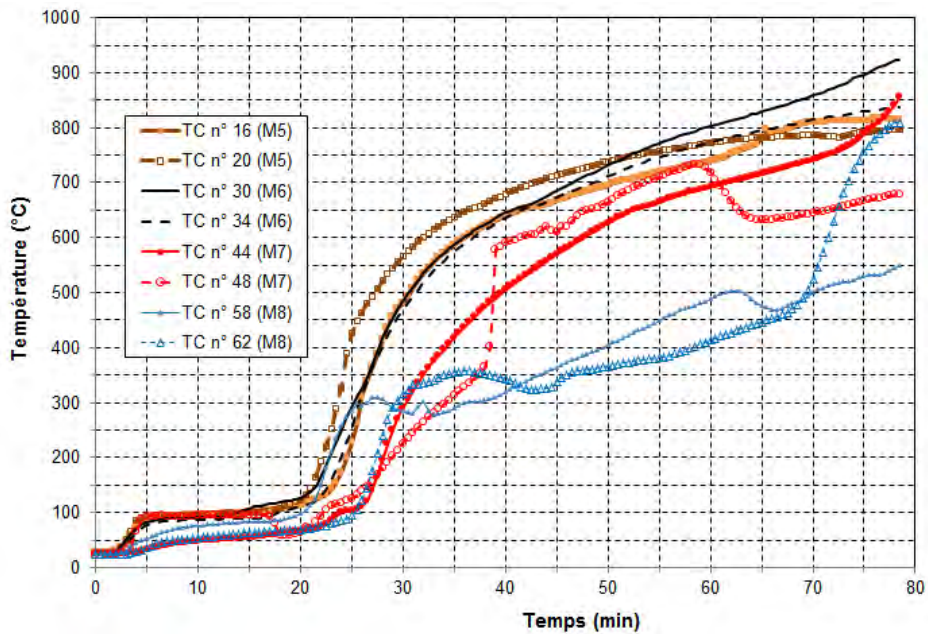


Figure 3.1.2 : Températures mesurées sur la face côté isolant du parement côté feu (M5 à M8).

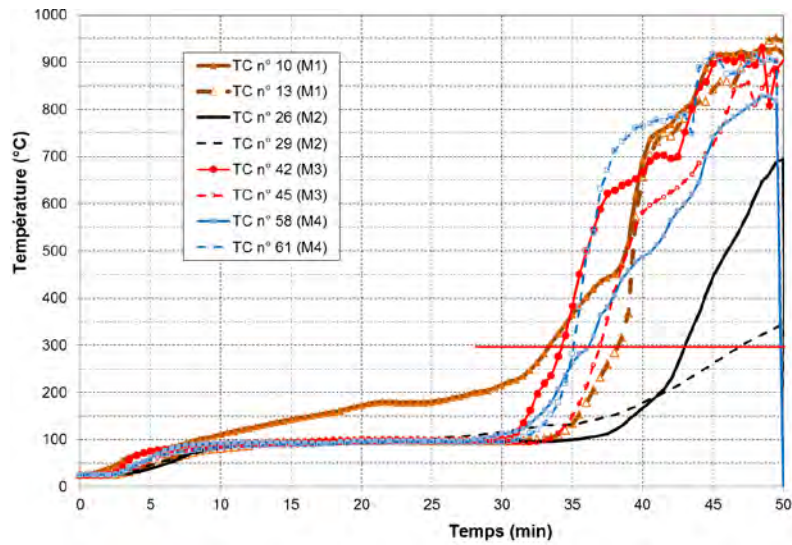


Figure 3.1.3 : Températures mesurées à l'interface montant-parement côté feu (M1 à M4).

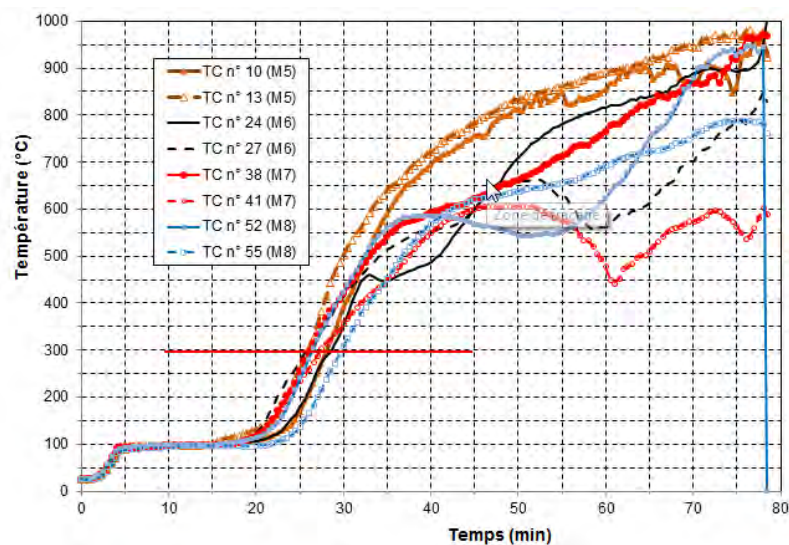


Figure 3.1.4 : Températures mesurées à l'interface montant-parement côté feu (M5 à M8).

Sur les figures 3.1.5 et 3.1.6 sont présentées respectivement les températures mesurées au centre des montants des maquettes M1 à M4 et M5 à M8.

Pour les parois dont le parement côté feu est constitué de deux plaques de plâtre BA13, la figure 3.1.5 montre que leurs montants ne sont pas complètement brûlés au moment où les parois perdent leur durée de résistance au feu.

En revanche, la figure 3.1.6 montre que pour les parois dont le parement côté feu est constitué d'une couche de plaques de plâtre spécial feu BA15, les montants sont quasiment brûlés lorsque les parois perdent leur durée de résistance au feu.

Les températures mesurées au centre de plusieurs sections de montants sont bien supérieures à 300 °C. La figure 3.1.4 met en évidence que la combustion commence entre la 25^{ème} et 30^{ème} minutes et dure jusqu'à la fin de l'essai (entre 65 et 78 min)

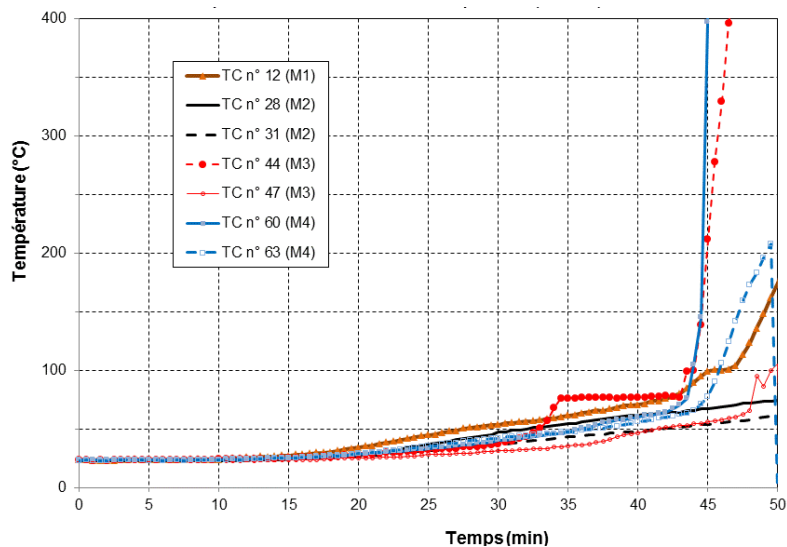


Figure 3.1.5 : Températures mesurées au centre des montants (M1 à M4).

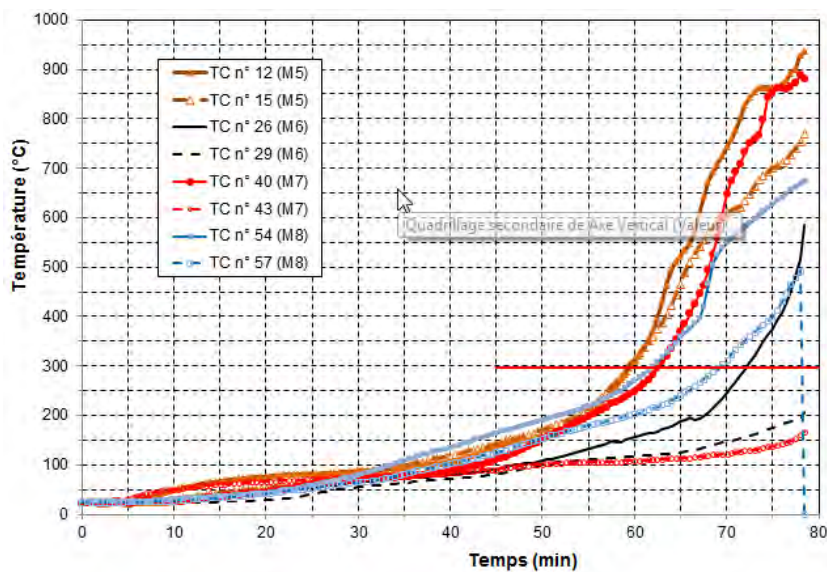


Figure 3.1.6 : Températures mesurées au centre des montants (M5 à M8).

3.2 - Résultats expérimentaux des parois verticales de grandeur réelle

Dans le tableau 3.2.1 sont résumés les paramètres les plus importants qui déterminent la durée de résistance au feu des parois testées en grandeur réelle, ainsi que leurs durées de résistance au feu déterminées expérimentalement.

Les classements donnés dans ce tableau sont valables pour les 5 types d'isolants objets de cette étude.

Ces résultats montrent qu'une paroi constituée d'une structure en bois a une durée de résistance au feu REI15 si elle est protégée d'une couche de plaques de plâtre standard (type A) et une durée de résistance au feu REI30 si elle est protégée d'un parement constitué de deux couches de plaques de plâtre standard (voir procès-verbal RS11-053/D) ou sans boîtier électrique (RS11-053/E) ou d'une plaque BA18 D.

Les résultats présentés dans le tableau 3.2.1 montrent que les durées de résistance au feu des plaques spécial feu (type F) sont plus longues que celles des plaques standards, mais les types de plaques testés montrent une tenue mécanique relativement faible par rapport aux plaques de plâtre de type F utilisées en France par les trois sociétés les plus connues, Lafarge, Knauf et BPB Placo.

Des durées de résistance au feu supérieures que celles données dans le tableau 3.2.1 peuvent être utilisées, mais doivent être issues de résultats expérimentaux et justifiées par un procès-verbal de classement délivré par un organisme agréé en résistance au feu.

Nr. d'essai	Parement exposé au feu	Parement non exposé au feu	Chute 1 ^{ère} couche du parement côté feu (min)	Chute 2 ^{ème} couche du parement côté feu (min)	Instant du début de la combustion des montants (min)	Durée réelle de résistance au feu (EI)	Classement
RS11-053/C	1 BA13A	2 OSB (2*9mm)	18	-	14,5	29	REI15
RS11-053/D	2 BA13A	2 OSB (2*9mm)	28,5	non	38	43	REI30
RS11-053/E	2 BA13A	2 OSB (2*9mm)	30	42,5	38	45	REI30
RS11-053/F	1 BA18D	2 OSB (2*9mm)	41	-	39	48	REI30
RS11-053/G	2 OSB(12+12)	2 OSB (2*9 mm)	11,3	17,2	14	34,5	EI30, R15
RS11-053/H	1 BA13A + 1 OSB (1*9 mm)	1 MDF (1*15 mm)	22,3	28	25	36	EI30, R15
RS11-053/I	Bardage épicea 18 mm + 1 OSB (1*12 mm)	2 BA13A	21	29,5	26	71	EI60, R15
RS11-053/J	2 BA13F	Moitié 2 OSB (2*9 mm) + moitié 2 contreplaqué (2*9 mm)	59,7	65	46,5	68	EI60, R30
RS11-053/K	1 BA13A + 1 BA18D	1 OSB (1*9 mm)	27,5	non	47,5	51	EI60, R30
RS11-053/L	2 BA15F	1 OSB (1*9 mm)	81	non	64	84	REI60

Tableau 3.2.1 : Durées de résistance au feu des parois testées.

A titre indicatif, ci-après sont présentés quelques résultats significatifs concernant le début de la combustion des montants et leur vitesse de combustion.

Sur la figure 3.2.1 sont présentées les températures mesurées sur l'axe du tasseau et du montant d'une paroi en bois protégée d'un parement constitué d'une couche de plaques de plâtre de type A. Le parement est fixé sur le tasseau qui est lui-même fixé sur le montant (voir rapport n° RS-11-053/C et l'annexe 1 positions des thermocouples). Le TC n° 16 se situe à l'interface entre le parement côté feu et le tasseau bois. On remarque sur cette figure qu'après la 22^{ème} minute du début de l'essai, les montants sont quasiment complètement brûlés. Il est important de noter que la vitesse de combustion des montants (après la chute du parement côté feu) est de l'ordre de 2,8 mm/min.

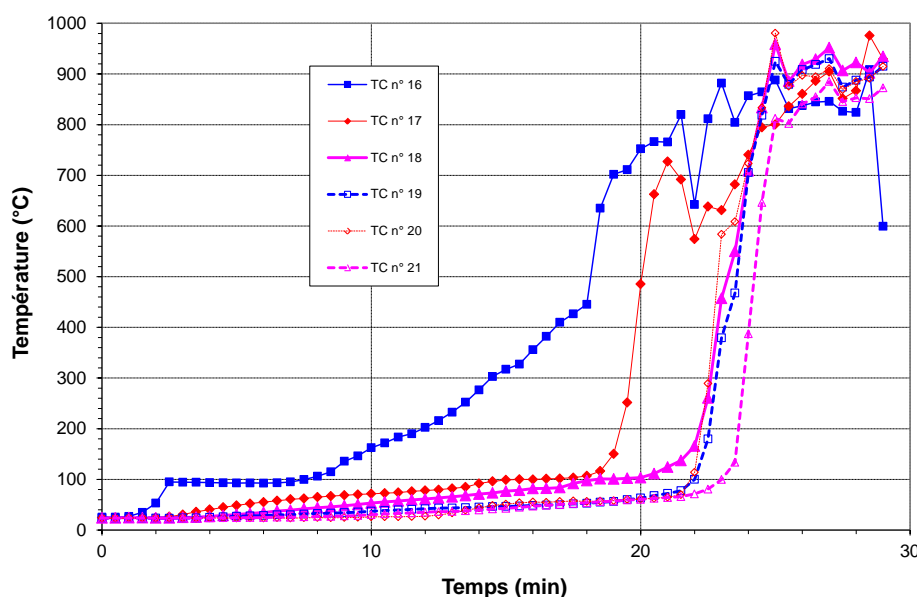


Figure 3.2.1 : Températures mesurées sur l'axe d'un tasseau et d'un montant bois (essai RS11-053/C).

Sur la figure 3.2.2 sont présentées les températures mesurées à l'interface des deux couches de plaques de plâtre du parement côté feu et celles mesurées sur l'axe du tasseau et du montant d'une paroi protégée par le parement constitué de deux couches de plaques de plâtre de type A. Le parement est fixé sur le tasseau qui est lui-même fixé sur le montant. Le TC n° 17 se situe à l'interface entre les deux couches de plaques de plâtre et le TC n° 18 se situe à l'interface entre le parement côté feu et le tasseau bois. Les autres TC se situent dans le montant bois de la paroi (voir rapport n° RS-11-053/E). On remarque sur cette figure que le tasseau bois commence à brûler à la 39^{ème} minute. La vitesse de combustion des montants est du même ordre de grandeur (3 mm/min) que dans le cas précédent.

Les figures 3.2.3 et 3.2.4 (voir rapport n° RS-11-053/I) représentent quelques températures mesurées à des positions similaires à celles des deux figures précédentes. Ces résultats de mesures conduisent aux vitesses de combustion suivantes :

- ✓ le bardage côté feu brûle à une vitesse moyenne de 0,8 mm/min,
- ✓ l'OSB qui suit le bardage côté feu brûle à une vitesse moyenne de 2 mm/min,
- ✓ les montants brûlent à une vitesse de l'ordre de 2,6 mm/min.

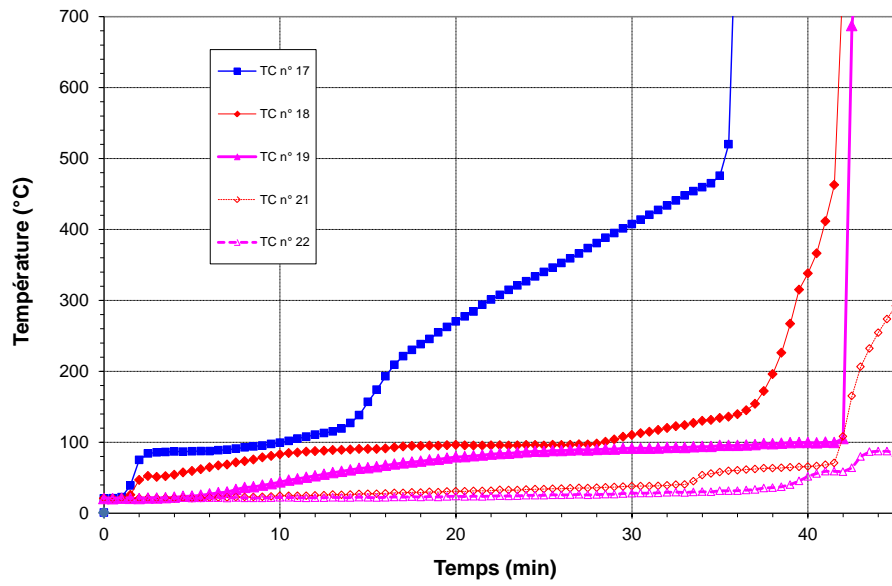


Figure 3.2.2 : Températures mesurées sur l'axe d'un tasseau et d'un montant bois (essai RS11-053/E).

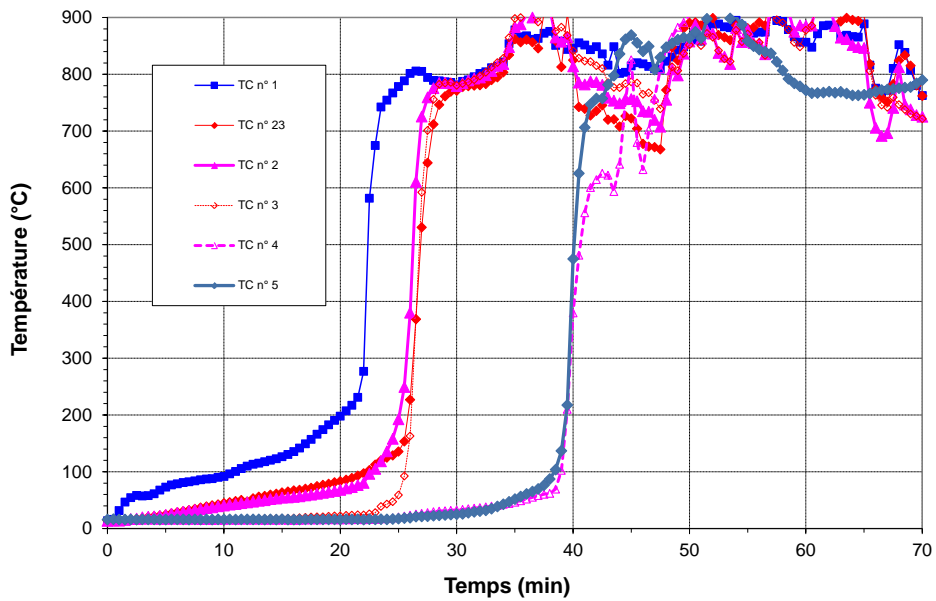


Figure 3.2.3 : Températures mesurées sur l'axe d'un tasseau et d'un montant bois (essai RS11-053/I).

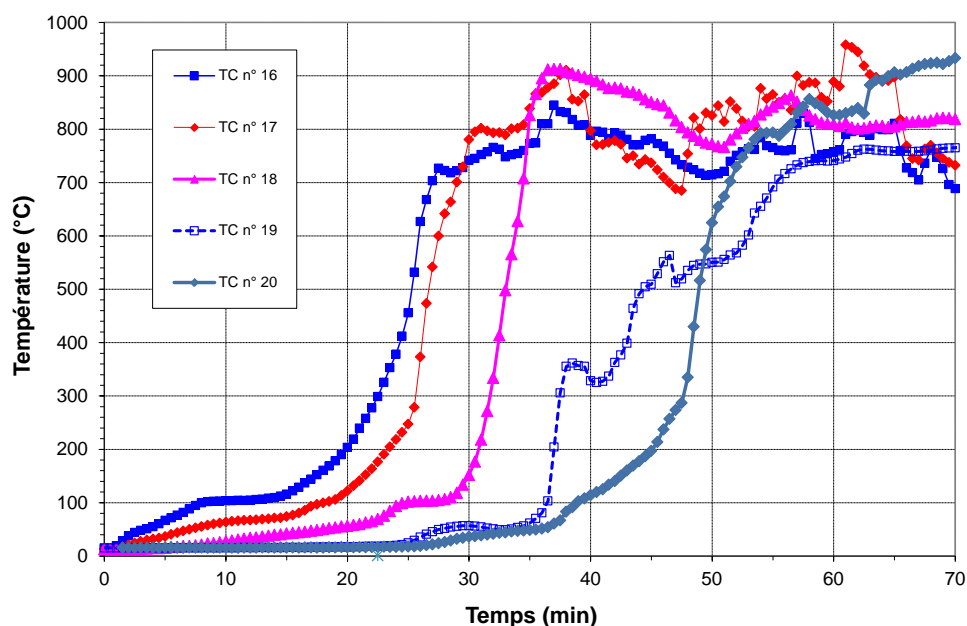


Figure 3.2.4 : Températures mesurées sur une section hors montant à différents points (essai RS11-053/I).

3.3 - Analyse des résultats expérimentaux des parois verticales.

L'analyse des résultats expérimentaux des parois (des maquettes et de grandeur réelle) montre que :

- ✓ la vitesse moyenne de combustion de la 1^{ère} couche d'OSB (en contact avec le feu) du parement côté feu varie entre 0,9 et 1,9 mm/min,
- ✓ la vitesse moyenne de combustion de la 2^{ème} couche d'OSB du parement côté feu varie entre 1,4 et 2,7 mm/min,
- ✓ la vitesse moyenne de combustion du parement opposé au feu (OSB) varie entre 1,5 et 2,4 mm/min,
- ✓ la vitesse moyenne de combustion des montants après la chute du parement côté feu varie entre 1,2 et 3,6 mm/min,
- ✓ les durées de résistance au feu des maquettes sont supérieures à celles des parois en grandeur réelle.

La différence des durées de résistance au feu entre les maquettes et les parois en grandeur réelle montre que l'effet échelle n'est pas négligeable. En effet, même si les déformations des parois avec des structures bois sont quasiment négligeables, l'effet échelle est dû au nombre de joint. Il est clair que les parois grandeur réelle ont bien plus de joints que les maquettes, et par conséquent, l'effet de retrait des parements côté feu influence sensiblement la durée de résistance au feu des parois.

Un des paramètres qui joue un rôle important sur la tenue mécanique des parements en plaques de plâtre est le pas des fixations des différentes couches. En effet, l'augmentation du pas de fixation des plaques de plâtre diminue la durée de la tenue mécanique des plaques de plâtre et, par conséquent, la durée de résistance au feu. La grande différence de résistance au feu entre les essais RS11-053/J et RS11-053/L peut être due en partie au grand pas de la fixation de la deuxième couche de plaques de plâtre de l'essai RS11-053/J.

Il est important de rappeler que la vitesse moyenne de combustion du deuxième parement côté feu est bien plus élevée que celle de la première couche et que la vitesse de combustion du parement opposé au feu est encore plus élevée après la chute du parement côté feu.

Il est également important de noter que la vitesse moyenne de combustion des montants (après la chute du parement côté feu) est particulièrement élevée. La vitesse moyenne maximale calculée est de l'ordre de 3,6 mm/min. Ceci s'explique du fait que l'épaisseur des montants n'est pas élevée (45 mm) et qu'après la chute du parement côté feu les montants sont attaqués brusquement par un flux thermique très élevé sur leur trois faces.

L'analyse des résultats expérimentaux présentés dans le tableau 3.2.1 permet de donner une durée de résistance au feu plus longue pour quelques configurations qui sont données dans ce tableau si l'on modifie uniquement le type d'isolant. Dans le tableau 3.3.1 sont données les durées de résistance estimées de cinq configurations de parois (cinq types de parements) avec un isolant de type laine de roche.

Les classements (durées de résistance au feu) donnés dans le tableau 3.3.1 ne sont valables que si l'isolant inséré dans les parois est du type laine de roche de masse volumique supérieure ou égale à 27 kg/m³. Bien entendu le parement opposé au feu peut être identique à l'un des types de parements indiqués dans le tableau 3.2.1.

La méthode donnée dans le chapitre 4 permet de définir la durée de résistance au feu d'une configuration de paroi en prenant en compte l'apport de tous les éléments de la paroi. Au cas où cette méthode est utilisée pour une paroi porteuse, il est très important de vérifier la résistance au feu de la paroi (critère R). L'essai RS11-053/I représente le cas d'une paroi de façade attaquée par un feu ISO R834 de l'extérieur.

Nr. d'essai	Parement exposé au feu	Isolant	Classement
RS11-053/H	1 BA13A + 1 OSB (1*9 mm)	LR (masse volumique ≥ 27 kg/m ³)	REI30
RS11-053/I	Bardage épicea 18 mm + 1 OSB (1*12 mm)		REI30
RS11-053/J	2 BA13F		REI60
RS11-053/K	1 BA13A + 1 BA18D		REI60
RS11-053/L	2 BA15F		REI90

Tableau 3.3.1 : Durées de résistance au feu des parois bois avec isolant laine de roche de masse volumique ≥ 27 kg/m³.

3.4 - Résultats expérimentaux des maquettes de planchers

Dans le tableau 3.4.1 sont résumés les résultats des quatre maquettes de planchers testées. Ces résultats montrent que celle avec l'isolant de type laine de verre est la première à perdre l'écran du plafond pendant l'essai au feu.

Par conséquent, pour tous les essais de planchers en grandeur réelle (4000 mm x 3000 mm), il a été décidé d'utiliser la laine de verre comme isolant. Ensuite les configurations validées avec ce type d'isolant sont validées pour les autres types d'isolants.

Ecran exposé au feu	Ecran non exposé au feu	Type d'isolant	Chute de l'écran côté feu (min)	Instant à partir duquel la combustion des solives démarre (min)	Classement
1 BA15F	1 OSB (1*15 mm)	Laine de verre	24	24	EI30
		Fibres de bois	25	24,5	EI30
		Laine de roche	pas de chute	27	EI30
		Ouate de cellulose	27	25	EI30

Tableau 3.4.1 : Durées de résistance au feu des maquettes de planchers testées.

Dans les cas où la durée de la résistance au feu du plancher est calculée en prenant en compte la résistance au feu de l'écran côté feu, ainsi que celle des solives et de l'écran posé au-dessus des solives, l'instant du démarrage de la combustion des solives et de l'écran opposé au feu est très important.

3.5 - Résultats expérimentaux des planchers en grandeur réelle

Dans le tableau 3.5.1 sont résumés les paramètres les plus importants qui déterminent la durée de résistance au feu des planchers testés en grandeur réelle, ainsi que les durées de résistance au feu déterminées expérimentalement pour ces planchers (T_{pl} : température dans le plénum).

Réf. essai	Ecran côté feu	Chute 1 ^{ère} couche de l'écran (min)	Chute 2 ^{ème} /3 ^{ème} couches de l'écran (min)	Instant du début de la combustion des solives (min)	Instant auquel T _{pl} =300°C	Instant auquel T _{dos-écran} =300°C	Durée réelle de résistance au feu (EI)	Classement assuré par l'écran seul
RS12-098	1 BA13	4	-	-	-	-	4	REI15
RS12-099	2 BA13	19	29	29	31	29	39	REI30
RS12-100	1 BA15 F	26	-	24	28	20	35	REI30
RS12-101	1 BA18	29,5	-	31	31	29	35	REI30
RS12-102	1*25 mm (1/2-CP std)	27	-	29	29	27	32,5	REI30
	1*25 mm (1/2-CP ignifugé)	27	-	26	26	27	32,5	REI15
RS12-103	1*22 mm CP	20	-	18	20	18	26	REI15
RS12-104	2 BA15 F	29	53	55	55	48,5	58	REI30
RS12-105	1 BA25	31	-	33	32	28,5	37	REI30
RS12-106	1 BA13 + 1 BA18	34	44	45	46,5	46	50	REI30
RS12-107	3 BA15F	27	48/67	68	68	68	68	REI60
RS12-108	2 BA18	32	53	52	55	51	59	REI30

Tableau 3.5.1 : Durées de résistance au feu des planchers testés.

3.6 - Analyse des résultats expérimentaux des planchers

Les résultats des essais de planchers présentés dans le tableau 3.5.1 montrent que quelle que soit la configuration du plancher, les classements donnés dans ce tableau sont satisfaits si les écrans mis en œuvre sont ceux donnés dans ce tableau et que les entraxes des fixations des écrans sont ceux donnés dans le tableau 2.1.1. Ces classements sont valables pour les 5 types d'isolants objets de cette étude et pour tout autre type d'isolant dont la conductivité thermique est supérieure à celle de la laine de verre et dont la masse volumique ne dépasse pas 50 kg/m³.

Les joints des écrans et leurs périphéries doivent être traités à l'enduit plâtre de finition dans lequel sont marouflées des bandes à joint (voir rapports d'essais).

Les durées de résistance au feu des planchers protégés par des écrans constitués de deux couches de plaques de plâtre BA15 type F ou de deux couches de plaques de plâtre BA18 de type D peuvent être classées REI60 si l'isolant mis en œuvre dans le plénum est du type laine de roche.

Dans tous les cas, la durée de résistance au feu du plancher peut être augmentée si :

- ✓ l'apport des autres éléments du plancher est pris en compte selon la méthode donnée dans le chapitre 4,
- ✓ des essais de résistance au feu des fabricants de plaques de plâtre démontrent expérimentalement que leurs plaques assurent une durée de résistance au feu plus longue.

Comme pour les parois, l'utilisation des nouveaux résultats expérimentaux qui améliorent la durée de résistance au feu des planchers doit être accompagnée de procès-verbal de classement délivré par un organisme agréé en résistance au feu. L'utilisation de la méthode de calcul de la résistance au feu d'un plancher donnée dans le chapitre 4 doit, comme pour les parois, vérifier attentivement le critère de résistance (critère R).

Les planchers protégés d'un écran composé de 2BA15F ou de 2BA18D sont estimés REI60 si l'isolant inséré dans le plénum au-dessus de la structure porteuse de l'écran est du type laine de roche de masse volumique supérieure ou égale à 26 kg/m³.

4 - METHODE DE CALCUL DE LA RESISTANCE AU FEU DE PAROIS SEPARATIVES

4.1 - Domaine d'application de la méthode FIT pour le dimensionnement des parois non porteuses

La méthode de calcul de la vérification de la fonction séparative, étanchéité aux flammes et au gaz chauds (critère E ou pare-flammes), ainsi que l'isolation thermique en situation d'incendie (critère I ou coupe-feu) des parois verticales et horizontales non porteuses, proposée dans cette étude est basée sur le guide technique "Fire safety in timber buildings" [1].

Le champ d'application de cette méthode n'est valable que pour les matériaux donnés ci-dessous :

- ✓ bois massif de masse volumique $\geq 290 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ panneaux de bois croisés et collés (CLT) de masse volumique $\geq 290 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ panneaux de bois stratifiés (LVL) de masse volumique $\geq 480 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ OSB conforme à la norme EN 300 [5] de masse volumique $\geq 550 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ panneaux de particules conformes à la norme EN 312 [6] de masse volumique $\geq 500 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ fibres de bois conformes aux normes EN 622-2 [7], EN 622-3 [8], EN 622-5 [9] de masse volumique $\geq 500 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ contreplaqué conforme à la norme EN 636 [10] de masse volumique $\geq 400 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ plaque de plâtre de type A, H et F conforme à la norme EN 520 [11],
- ✓ plaque de plâtre fibrée conforme à la norme EN 15283-2 [12],
- ✓ laine de verre de masse volumique $\leq 26 \text{ kg/m}^3$.

4.2 - Description de la méthode de calcul FIT pour les parois non porteuses

Selon cette méthode la durée de la résistance au feu d'une paroi est déterminée comme la somme des contributions de toutes les couches qui composent la paroi. Elle prend en compte la position de la couche dans la paroi, ainsi que les positions et les configurations des joints de ces couches. La durée de résistance au feu d'une paroi est calculée avec la formule (4.1) en fonction du rôle de chaque couche et de l'interaction entre les couches (voir Figure 4.2.1). Les notations des différents paramètres utilisés pour le calcul de la résistance au feu des parois sont identiques à ceux du guide "Fire safety in timber buildings".

Dans ce guide, la contribution de la dernière couche (opposée au feu) est appelée temps d'isolation et les contributions des autres couches sont appelées temps de protection.

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n} \quad (\text{min}) \quad (4.1)$$

Où :

- t_{ins} : temps d'isolation de la paroi (ou, durée de résistance au feu de la paroi),
- $\sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i}$: la somme des temps de protection de chaque couche $t_{prot,i}$, dans la direction du flux de chaleur (du côté feu vers la face opposée au feu), excepté la couche opposée au feu (dernière couche),
- $t_{ins,n}$: temps d'isolation de la dernière couche de l'ensemble situé du côté non exposé au feu.

Les temps de protection $t_{prot,i}$, et le temps d'isolation $t_{ins,n}$ prennent en compte l'influence des couches adjacentes.

La durée de résistance au feu de la paroi doit satisfaire la relation (4.2) :

$$t_{ins} \geq t_{req} \quad [\text{min}] \quad (4.2)$$

Où : t_{req} est la durée de résistance au feu requise pour la paroi étudiée.

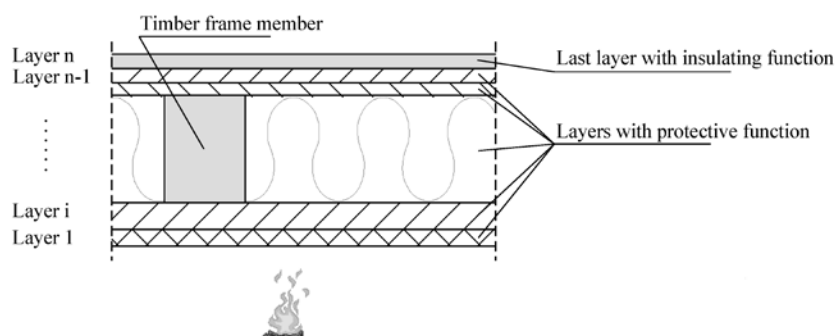


Figure 4.2.1 : Numérotation des couches d'une paroi et fonction des couches.

Les temps de protection et d'isolation des couches peuvent être calculés respectivement selon l'équation (4.2) et l'équation (4.3), en tenant compte des valeurs fondamentales des couches, des coefficients de la position des couches dans le montage et des coefficients des joints :

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad (4.2)$$

$$t_{\text{ins},n} = (t_{\text{ins},0,n} \cdot k_{\text{pos,exp},n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n} \quad (4.3)$$

Où :

- $t_{\text{prot},0,i}$: temps de protection de base de la couche i (Tableau 4.2.1),
- $t_{\text{ins},0,n}$: temps d'isolation de base la dernière couche non exposée au feu (Tableau 4.2.1)
- $k_{\text{pos,exp},i}$, $k_{\text{pos,exp},n}$: coefficient de position qui prend en compte l'influence de la couche (ou des couches) qui précède la couche étudiée (Tableau 4.2.2) : **Coefficients de position $k_{\text{pos,exp},i}$ et $k_{\text{pos,exp},n}$ pour parois ayant une couche d'isolant insérée entre le parement côté feu et celui opposé au feu.**
- $k_{\text{pos,unexp},i}$: coefficient de position tenant en compte l'influence de la couche qui suit la couche étudiée (Tableau 4.2.3),
- Δt_i : temps de correction qui prend en compte l'effet de plaques de plâtre de type F et de plaques de plâtre armées de fibres (Tableau 4.2.4)
- $k_{j,i}$, $k_{j,n}$: coefficient qui prend en compte l'effet des joints (Tableau 4.2.5).

Le temps de protection de base $t_{\text{prot},0,i}$ et le temps d'isolation de base $t_{\text{ins},0,n}$ correspondent à la résistance au feu de la couche, sans prendre en compte l'influence des couches adjacentes.

Dans les tableaux 4.2.1 à 4.2.5 les paramètres suivants sont utilisés :

- h_i : épaisseur d'une couche i [mm]
- ρ_i : masse volumique de la couche i [kg/m^3]
- β_0 : la vitesse de combustion unidimensionnelle ($\beta_0 = 0,65 \text{ mm}/\text{min}$), quel que soit le type de matériau à base de bois.

Dans le Tableau 4.2.1, pour les laines minérales, n'est calculé que le $t_{\text{prot},0,i}$, car la laine minérale n'est utilisée quasiment pas sur la dernière couche d'une paroi. C'est pour cette raison que dans ce tableau $t_{\text{ins},0,n}=0$. Au cas où la laine minérale est utilisée sur la dernière couche (de la paroi opposée au feu), un essai de résistance au feu doit être effectué pour définir la résistance au feu de la paroi.

Pour les laines minérales, dans le **Tableau 4.2.2 : Coefficients de position $k_{\text{pos,exp},i}$ et $k_{\text{pos,exp},n}$ pour parois ayant une couche d'isolant insérée entre le parement côté feu et celui opposé au feu.**

, seul est donné le coefficient de position $k_{\text{pos,exp},i}$ pour la valeur de protection $t_{\text{prot},0,i}$, car comme expliqué précédemment l'utilisation de la laine minérale sur la dernière couche des parois et des planchers est très rare.

Les simulations numériques du comportement des parois non porteuses ont démontré que l'influence de la couche qui suit, la couche étudiée, est faible sur la résistance au feu de cette dernière si la couche qui suit est constituée de plaques de plâtre ou du bois. Par conséquent, pour simplifier ces cas il a été supposé que $k_{\text{pos,unexp}}=1$. En revanche, si la couche qui suit la couche étudiée est constituée d'isolant, son rôle sur le comportement au feu de la couche étudiée est important. Dans ces conditions les formules pour le calcul de $k_{\text{pos,unexp}}$ sont données dans le Tableau 4.2.3.

Matériaux	Valeur d'isolation de base $t_{\text{ins},0,n}$ [min]	Valeur de protection $t_{\text{prot},0,i}$ [min]
Plaques de plâtre	$24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$	$30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$
Bois massif, bois croisé laminé (CLT), LVL	$19 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$	$30 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$
Panneaux à base des fibres ou des particules	$22 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$	$33 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$
OSB, contreplaqué	$16 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$	$23 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$
Laine de roche de $\rho \geq 26 \text{ kg/m}^3$	0	$0,3 \cdot h_i^{(0,75 \cdot \log(\rho_i) - \rho_i/400)}$
Laine de verre de $\rho \geq 15 \text{ kg/m}^3$	0	pour $h_i < 40 \text{ mm}$: 0 pour $h_i \geq 40 \text{ mm}$: $(0,0007 \cdot \rho_i + 0,046) \cdot h_i + 13 \leq 30$

Tableau 4.2.1 : Formules pour calculer $t_{\text{prot},0,i}$ et $t_{\text{ins},0,n}$ pour différents matériaux.

Matériaux	Coefficient de Position $k_{pos,exp,i}$ et $k_{pos,exp,n}$
Bardage (bois, plaques de plâtre)	$k_{pos,exp,n}$ pour $t_{ins,n}$
	$1 - 0,6 \cdot \frac{\sum t_{prot,n-1}}{t_{ins,0,n}}$ <p>pour $\sum t_{prot,n-1} \leq \frac{t_{ins,0,n}}{2}$</p>
	$0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{ins,0,n}}{\sum t_{prot,n-1}}}$ <p>pour $\sum t_{prot,n-1} > \frac{t_{ins,0,n}}{2}$</p>
	$k_{pos,exp,i}$ pour $t_{prot,i}$
	$1 - 0,6 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}}$ <p>pour $\sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2}$</p>
	$0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}}$ <p>pour $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2}$</p>
Laine de roche	$k_{pos,exp,i}$ pour $t_{prot,i}$
	$1 - 0,6 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}}$ <p>pour $\sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2}$</p>
	$0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}}$ <p>pour $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2}$</p>
	Laine de verre $h_i \geq 40$ mm
$1 - 0,8 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}}$ <p>pour $\sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{4}$</p> $(0,001 \cdot \rho_i + 0,27) \cdot \left[\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right]^{(0,75 - 0,002 \cdot \rho_i)}$ <p>pour $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{4}$</p>	

Tableau 4.2.2 : Coefficients de position $k_{pos,exp,i}$ et $k_{pos,exp,n}$ pour parois ayant une couche d'isolant insérée entre le parement côté feu et celui opposé au feu.

Matériaux	$k_{\text{pos,unexp},i}$ pour les couches suivies de plaque de plâtre ou bois	$k_{\text{pos,unexp},i}$ pour les couches suivies d'une couche d'isolant
Plaques de plâtre	1,0	$0,5 \cdot h_i^{0,15}$
Bois massif, CLT et LVL		$0,35 \cdot h_i^{0,21}$
Panneaux à base des fibres ou des particules		$0,41 \cdot h_i^{0,18}$
OSB, contreplaqués		$0,5 \cdot h_i^{0,15}$
Laine de roche		$0,18 \cdot h_i^{(0,001 \cdot \rho_i + 0,08)}$
Laine de verre		$0,01 \cdot h_i - \frac{h_i^2}{30000} + \rho_i^{0,09} - 1,3$

Tableau 4.2.3 : Coefficients de position $k_{\text{pos,unexp},i}$

Matériaux	Parois horizontales	Parois verticales
Bardage (bois, plaques de plâtre)	Δt_n pour $t_{\text{ins},n}$ [min]	
	$0,06 \cdot t_{\text{prot},n-1} + 1,1 \cdot t_{\text{ins},0,n} - 5,0$ <i>pour $t_{\text{ins},0,n} < 8$ min</i>	$0,03 \cdot t_{\text{prot},n-1} + 0,9 \cdot t_{\text{ins},0,n} - 2,3$ <i>pour $t_{\text{ins},0,n} < 12$ min</i>
	$0,1 \cdot t_{\text{prot},n-1} - 0,035 \cdot t_{\text{ins},0,n} + 1,2$ <i>pour $t_{\text{ins},0,n} \geq 8$ min</i>	$0,22 \cdot t_{\text{prot},n-1} - 0,1 \cdot t_{\text{ins},0,n} + 4,7$ <i>pour $t_{\text{ins},0,n} \geq 12$ min</i>
	Δt_i pour $t_{\text{prot},i}$ [min]	
	$0,06 \cdot t_{\text{prot},i-1} + 1,1 \cdot t_{\text{prot},0,i} - 5,0$ <i>pour $t_{\text{prot},0,i} < 8$ min</i>	$0,03 \cdot t_{\text{prot},i-1} + 0,9 \cdot t_{\text{prot},0,i} - 2,3$ <i>pour $t_{\text{prot},0,i} < 12$ min</i>
	$0,1 \cdot t_{\text{prot},i-1} - 0,035 \cdot t_{\text{prot},0,i} + 1,2$ <i>pour $t_{\text{prot},0,i} \geq 8$ min</i>	$0,22 \cdot t_{\text{prot},i-1} - 0,1 \cdot t_{\text{prot},0,i} + 4,7$ <i>pour $t_{\text{prot},0,i} \geq 12$ min</i>
Laine minérale	Δt_i pour $t_{\text{prot},i}$ [min]	
	$0,1 \cdot t_{\text{prot},i-1} - 0,035 \cdot t_{\text{prot},0,i}$	$0,1 \cdot t_{\text{prot},i-1} + t_{\text{prot},0,i} - 1,0$ <i>pour $t_{\text{prot},0,i} < 6$ min</i> $0,22 \cdot t_{\text{prot},i-1} - 0,1 \cdot t_{\text{prot},0,i} + 3,5$ <i>pour $t_{\text{prot},0,i} \geq 6$ min</i>

Tableau 4.2.4 : Durées de temps Δt_i et Δt_n qui corrigent les durées de protection $t_{\text{prot},0,i}$ et d'isolation $t_{\text{ins},0,n}$ des couches protégées par des plaques de plâtre de type F et de plaques fibrées.

Dans le Tableau 4.2.5 sont données les formules qui permettent de calculer les coefficients qui prennent en compte le rôle des joints sur la durée de résistance au feu des parois. L'EN 1995-1-2[13] interdit les joints supérieurs à 2 mm. Les résultats expérimentaux montrent que les joints d'une couche suivie d'une cavité vide et ceux de la dernière couche jouent un rôle significatif sur la durée de résistance au feu de ces deux couches. En revanche, l'influence des joints sur les autres couches est quasiment négligeable. Par conséquent, les coefficients des joints des autres couches sont supposés $k_{j,i}=1$.

L'influence de cavités vides entre deux couches est pris en compte dans la méthode de calcul en modifiant les coefficients de la position, des $k_{pos,exp}$ pour la couche sur le côté de la cavité non exposée au feu et des $k_{pos,unexp}$ de la couche sur le côté de la cavité qui est exposée au feu.

Matériaux	Type de joint	$k_{j,n}$ pour $t_{ins,n}$	$k_{j,i}$ pour $t_{prot,i}$	
			Couche suivie par un vide	Couche suivie par isolation, ou autre élément
Bardage bois	 $\leq 2mm$ $\geq 30mm$	0,3	0,3	1,0
	 $\leq 2mm$ $\geq 15mm$	0,4	0,4	1,0
	 $\leq 2mm$ $\geq 30mm$	0,6	0,6	1,0
	Pas de joint	1,0	1,0	1,0
Panneaux à base des fibres, ou des particules	 $\leq 2mm$	0,8	0,8	1,0
	 $> 2mm$ filled joint	1,0	1,0	1,0
Isolation de type laine minérale	 $\leq 0mm$	-	0,8	1,0
	Pas de joint	-	1,0	1,0

Tableau 4.2.5 : Coefficients de position $k_{j,i}$.

Matériaux	Couche qui délimite le vide du côté exposé au feu	Couche qui délimite le vide du côté non exposé au feu	
		Bardage plâtre, bois	$k_{\text{pos,unexp},i}$ référence tableau 4.2.3, colonne 3
Isolation à base de laine minérale	$k_{\text{pos,unexp},i} = 1,0$		Δt_i (ou Δt_n) référence tableau 4.2.4

Tableau 4.2.6 : Coefficients de correction qui prennent en compte l'influence des joints sur les durées de résistance au feu des couches.

Afin d'éviter une perte rapide de la durée de résistance au feu d'une paroi il est nécessaire que les parements et les isolants soient proprement fixés. Les types de fixations des parois et les espacements de ces fixations sont basés sur des essais de résistance au feu. La norme NF EN 1995-1-2 donne quelques recommandations sur le positionnement des fixations aux niveaux des angles et des extrémités des parements. La longueur de la pénétration des vis doit être supérieure à 10 mm.

Concernant l'isolant, afin qu'elle ne chute pas très rapidement après la chute du parement côté feu il faut qu'il soit soigneusement serré entre les montants en bois et fixé.

4.3 - Exemple de calcul de la résistance au feu d'une paroi non-porteuse selon FIT

Dans le Tableau 4.3.1 sont présentés les résultats de calcul de toutes les contributions des couches qui composent une paroi constituée de 2 couches de plaques de plâtre d'épaisseur de 12.5 mm (BA13), d'une couche de laine de verre d'épaisseur de 100 mm et de masse volumique de 15 kg/m^3 et de deux couches de OSB d'épaisseur de 9 mm.

Calcul de la durée de résistance au feu d'une paroi non-porteuse selon FIT (composition de la paroi : 2xBA13+LV+2xOSB9)					
Couche (i)	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}
Matériau	BA13-A	BA13-A	laine de verre	OSB	OSB
δ_i (mm)	12.50	12.50	100	9	9
ρ_i (kg/m ³)			15	640	640
$t_{prot,0,i}$	24.10	24.10	14.51	9.56	-
$t_{ins,0,i}$	24.10	24.10	14.51	9.56	5.23
$k_{pos,exp,i}$	1	0.5	0.16	0.26	0.19
$k_{pos,un exp,i}$	1	0.73	1	1	-
$k_{j,i}$	1	1	1	1	0.8
Δt_i	0	0	0	0	0
$t_{prot,i}$ (min)	24.10	8.80	3.53	2.45	0
$t_{ins,5}$ (min)	0	0	0	0	0.77
Durée de résistance au feu $t_{ins} = 39.65$ min					

Tableau 4.3.1 : Durées de résistance au feu d'une cloison définies selon FIT, pour un isolant de type laine de verre.

Dans le Tableau 4.3.2 sont données les durées de résistance au feu de la cloison présentée dans le Tableau 4.3.1, mais ceci pour des cas où les épaisseurs et les masses volumiques de la laine de verre sont différentes.

Les résultats présentés dans ce tableau montrent que pour un isolant de type laine de verre dont l'épaisseur varie de 50 à 200 mm et la masse volumiques varie de 15 à 26 kg/m³ la contribution de la laine de verre sur la durée de résistance au feu de la cloison varie entre 2.5 et 6.5 minutes. En effet, après la chute du parement ou de l'écran côté feu la laine de verre fond rapidement, mais si l'on observe les durées de protection et/ou d'isolation calculées pour le parement opposé au feu on constate qu'elles sont très faibles. Ces résultats sont liés à la méthode de calcul. Par conséquent, pour la détermination de la fonction séparative (classement EI) des parements, les valeurs $t_{prot,isolant}$ calculés sont acceptables.

En effet, pour les configurations des parois étudiées dans le cadre de cette étude, on constate que, dans la forte majorité des cas, les durées de résistance au feu calculées, selon la méthode proposée [1], sont légèrement inférieures à celles mesurées expérimentalement.

On peut conclure que l'application de cette méthode pour la vérification de la durée, ou le dimensionnement des parois non porteuses conduit à des résultats satisfaisants si elle respecte le domaine de validité défini en §4.1.

Pour le calcul de la résistance au feu des montants et des solives des parois on considère qu'une minute après la chute du parement et/ou de l'écran côté feu ces éléments de structures carbonisent comme expliqué au §5.4.

Influence de l'épaisseur et de la masse volumique de l'isolant sur la durée de résistance au feu d'une cloison constituée de 2xBA13-A + LV + 2xOSB9				
mm	kg/m ³	Minutes		
δ	ρ	$t_{\text{prot,LV}}$	t_{ins}	Δt_{ins}
50	15	2.66	38.82	0.25
50	26	2.93	39.07	
100	15	3.53	39.65	0.43
100	26	3.98	40.08	
150	15	4.50	40.58	0.63
150	26	5.16	41.21	
200	15	5.57	41.60	0.86
200	26	6.46	42.46	
Paroi : 2xBA13-A + LV + 1xOSB12				
δ	ρ	$t_{\text{prot,LV}}$	t_{ins}	$t_{\text{ins},5}(\text{OSB12})$
100	15	3.53	37.89	1.48
Paroi : 1xBA18-A+1xBA13-A + LV + 1xOSB9				
δ	ρ	$t_{\text{prot,LV}}$	t_{ins}	$t_{\text{ins},5}(\text{OSB9})$
100	15	2.85	46.96	0.70
Paroi : 2xBA13-A + LV + 2xBA13-A				
δ	ρ	$t_{\text{prot,LV}}$	t_{ins}	$t_{\text{ins},5}(\text{BA13-A})$
100	15	3.53	51	4.72

Tableau 4.3.2 : Durées de résistance au feu d'une cloison définies selon FIT et différents paramètres de l'isolant en laine de verre.

Dans le Tableau 4.3.3 sont données les durées de résistance au feu de la même cloison présente dans le Tableau 4.3.1, mais l'isolant est du type laine de roche. L'épaisseur de cet isolant varie de 50 à 200 mm et sa masse volumiques varie de 26 à 50 kg/m³

Les résultats de calculs montrent que l'augmentation de la masse volumique et l'augmentation de l'épaisseur de la laine de roche augmente fortement la durée de résistance au feu de la cloison. En effet, si l'on compare les contributions obtenues de la laine de roche sur la résistance au feu de la cloison (voir Tableau 4.3.3) avec des résultats expérimentaux on constate que la méthode FIT surévalue très fortement la contribution de la laine de roche sur la résistance au feu.

Par conséquent, afin d'éviter tout risque en situation d'incendie, pour les parois avec de l'isolant de type laine de roche, il est recommandé de prendre en compte les contributions suivantes :

- ✓ Pour l'isolant en laine de roche de masse volumique de 26 kg/m^3 et d'épaisseur supérieure ou égale à 50 mm la contribution de la laine de roche sur la durée de résistance au feu prise en compte sera $t_{\text{prot},i} = 5$ minutes. Pendant cette durée on considère que les montants et les solives carbonisent seulement sur la face côté feu.
- ✓ Pour l'isolant en laine de roche de masse volumique de 50 kg/m^3 et d'épaisseur supérieure ou égale à 50 mm la contribution de la laine de roche sur la durée de résistance au feu prise en compte sera $t_{\text{prot},i} = 10$ minutes. Pendant cette durée on considère que les montants et les solives carbonisent seulement sur la face côté feu.

Pour des masses volumiques de la laine roche $26 < \rho < 50 \text{ kg/m}^3$ la contribution de l'isolant peut être définie par une interpolation linéaire entre les deux valeurs données ci-avant.

Une fois les durées $t_{\text{prot},i}$ écoulées on considère que la laine de roche chute et par conséquent, les montants et les solives carbonisent sur les autres faces comme expliqué au § 5.4.

La contribution de la laine de roche peut être optimisée si plus de trois d'essai démontrent que les valeurs proposées ci-avant sont très sécuritaires.

Influence de l'épaisseur et de la masse volumique de l'isolant sur la durée de résistance au feu d'une cloison constituée de 2BA13-A + LR + 2OSB9				
mm	kg/m ³	Minutes		
δ	ρ	$t_{\text{prot,LR}}$	t_{ins}	Δ_{tins}
50	26	4.95	41.01	6.95
50	50	12.16	47.96	
100	26	13.95	49.70	25.64
100	50	40.15	75.34	
150	26	25.58	61.03	49.06
150	50	75.30	110.09	
200	26	39.31	74.51	72.56
200	50	112.55	147.07	

Tableau 4.3.3 : Durées de résistance au feu d'une cloison définies selon FIT et différents paramètres de l'isolant en laine de roche.

5 - METHODE DE CALCUL DE LA RESISTANCE AU FEU DES PAROIS PORTEUSES

Dans le chapitre 4 a été expliquée la méthode proposée pour la détermination de l'étanchéité (classement E) et de l'isolation thermique (classement I) d'une paroi séparative verticale ou horizontale. Cette méthode ne traite pas la résistance au feu (classement R ou autrement dit la stabilité au feu) de la paroi. Pour une paroi non porteuse afin que le classement EI soit assuré il faut que la paroi soit autoporteuse. Dans le cas d'une paroi porteuse il faut qu'elle assure également la fonction de la résistance au feu R.

Dans ce chapitre est expliquée la méthode de vérification de la résistance au feu de la structure porteuse d'une paroi.

Le parement ou l'écran qui protège la structure porteuse d'une paroi verticale ou horizontale peut être constitué de plaques de plâtre, de panneaux à base de bois ou d'un mélange des deux.

La méthode de calcul donnée dans ce chapitre est basée essentiellement sur le guide "Fire Safety in Timber Buildings", mais elle exploite, également, la norme NF EN1995 et les résultats des essais de résistance au feu effectués dans le cadre de cette étude.

5.1 - Détermination de l'instant du début de la carbonisation de la structure d'une paroi dont le parement ou l'écran côté feu est composé de plaques de plâtre

Pour les parements constitués de plaques de plâtre et situés du côté exposé au feu dans le Tableau 5.1.1 et le Tableau 5.1.2 sont données respectivement, les formules qui permettent de calculer les durées nécessaires (t_{ch}) pour que la carbonisation commence dans le dos des parements, et les formules qui permettent de calculer les durées qui conduisent à la chute des parements (t_f). Bien entendu ces durées sont calculées à partir du démarrage du feu.

Dans ces deux tableaux, et pour chaque formule, a également été donnée sa plage de validité. Pour les parements qui ne sont pas couverts par ce tableau il est nécessaire de réaliser des essais de résistance au feu.

Protection	Parois verticaux	Planchers
1 x type A ou F	$1,8 h_p - 7$ pour $9\text{mm} \leq h_p \leq 18\text{mm}$ $25,5$ pour $h_p > 18\text{mm}$	
2 x type F, ou 1 x type F+ 1 x type A	$\min(2,1h_{p,\text{tot}} - 7 ; 3,5h_p + 7)$ pour $\begin{cases} 25\text{mm} \leq h_{p,\text{tot}} \leq 31\text{mm} \\ 9\text{mm} \leq h_p \leq 18\text{mm} \end{cases}$	$\min(2,1h_{p,\text{tot}} - 7 ; 4h_p - 14)$ pour $\begin{cases} 25\text{mm} \leq h_{p,\text{tot}} \leq 31\text{mm} \\ 9\text{mm} \leq h_p \leq 18\text{mm} \end{cases}$
2 x type A	$\min(2,1h_{p,\text{tot}} - 7 ; 1,6h_p + 13)$ pour $\begin{cases} 18\text{mm} \leq h_{p,\text{tot}} \leq 31\text{mm} \\ 9\text{mm} \leq h_p \leq 18\text{mm} \end{cases}$	$\min(2,1h_{p,\text{tot}} - 7 ; 1,6h_p + 11)$ pour $\begin{cases} 18\text{mm} \leq h_{p,\text{tot}} \leq 31\text{mm} \\ 9\text{mm} \leq h_p \leq 18\text{mm} \end{cases}$

Tableau 5.1.1 : Temps en minutes, t_{chr} , de démarrage de la combustion derrière une protection en plaque de plâtre (h_p : épaisseur de la plaque extérieure, $h_{p,\text{tot}}$: épaisseur totale de protection en mm)

Protection	Parois verticaux	Planchers
1 x type F	$4,5 h_p - 24$ pour $9\text{mm} \leq h_p \leq 18\text{mm}$ 57 pour $h_p > 18\text{mm}$	$h_p + 10$ pour $12,5\text{mm} \leq h_p \leq 16\text{mm}$ 26 pour $h_p > 16\text{mm}$
2 x type F	$4 h_{p,\text{tot}} - 40$ pour $25\text{mm} \leq h_{p,\text{tot}} \leq 31\text{mm}$ 84 pour $h_{p,\text{tot}} > 31\text{mm}$	$2 h_{p,\text{tot}} - 6$ pour $25\text{mm} \leq h_{p,\text{tot}} \leq 31\text{mm}$ 55 pour $h_{p,\text{tot}} > 31\text{mm}$
1 x type F (ext) + 1 x type A (int)	75 pour $\begin{cases} h_{p,\text{type F}} \geq 15\text{mm} \\ h_{p,\text{tot}} \geq 27\text{mm} \end{cases}$	45 pour $h_{p,\text{type F}} \geq 15\text{mm}$
1 x type A	$1,9 h_p - 7$ pour $9\text{mm} \leq h_p \leq 15\text{mm}$ $21,5$ pour $h_p > 15\text{mm}$	$1,8 h_p - 7$ pour $12,5\text{mm} \leq h_p \leq 18\text{mm}$ 25 pour $h_p > 18\text{mm}$
2 x types A	$2,1 h_{p,\text{tot}} - 14$ pour $25\text{mm} \leq h_{p,\text{tot}} \leq 30\text{mm}$ 49 pour $h_{p,\text{tot}} > 30\text{mm}$	$h_{p,\text{tot}} + 3$ pour $18\text{mm} \leq h_{p,\text{tot}} \leq 25\text{mm}$
3 x types F		67 pour $h_{p,\text{tot}} = 45$

Tableau 5.1.2 : Temps en minutes, t_f , de chute de la protection en plaque de plâtre (h_p : épaisseur de la plaque extérieure et $h_{p,\text{tot}}$: épaisseur totale de protection en mm).

Pour des parois verticales dans le Tableau 5.1.3 sont donnés les instants, calculés et mesurés expérimentalement, du début de la carbonisation dans le dos de quelques types de parements qui ont été testés dans le cadre de cette étude, ainsi que les instants, calculés et mesurés expérimentalement, de la chute de ces parements. Pour ces parois, les valeurs calculées sont presque toujours légèrement plus faibles que les valeurs mesurées. Par conséquent on peut conclure que la méthode de calcul de ces durées est très légèrement sécuritaire.

Parois : Instant du début de la carbonisation (t_{ch}) dans le dos d'un parement et l'instant de sa chute (t_f) en minutes				
Type de parement en plaque de plâtre côté feu	$t_{ch}(cal)$	$t_{ch}(exp)$	$t_f(cal)$	$t_f(exp)$
1xBA13-A	15.5	15.0	16.8	18.0
1xBA15-F	20.0	24.0	43.5	65.0
2xBA13-A	33.0	38.0	38.5	42.5
2xBA13-F	45.5	46.5	60.0	65.0
2xBA15-F	56.0	64.0	80.0	83.0
1xB18-A+1xBA13-A	41.8	47.5	49.0	47.5

Tableau 5.1.3 : Instant du début de la carbonisation dans le dos d'un parement en plaques de plâtre et l'instant de sa chute.

Pour des écrans horizontaux (plafonds) dans le Tableau 5.1.3 sont donnés les instants, calculés et mesurés expérimentalement, du début de la carbonisation dans le dos de quelques types d'écrans qui ont été testés dans le cadre de cette étude, ainsi que les instants calculés et mesurés expérimentalement de la chute de ces écrans. Pour ces écrans, également, les valeurs calculées sont presque toujours légèrement plus faibles que les valeurs mesurées. Par conséquent on peut conclure que la méthode de calcul de ces durées est très légèrement sécuritaire.

Planchers : Instant du début de la carbonisation (t_{ch}) dans le dos d'un écran et l'instant de sa chute (t_f) en minutes				
Type de plafond en plaques de plâtre	t_{ch} (cal)	t_{ch} (exp)	t_f (cal)	t_f (exp)
1xBA13-A	15.5	14.5	15.5	15.0
1xBA15-F	20.0	20.0	25.0	26.0
2xBA13-A	31.0	29.0		29.0
2xBA13-F	36.0		47.0	
2xBA15-F	46.0	48.5	54.0	53.0
3xBA15-F		67.0		67.0

Tableau 5.1.4 : Instant du début de la carbonisation dans le dos d'un écran de plafond en plaques de plâtre et l'instant de sa chute.

Les vitesses de la combustion qui seront prises en compte pour la détermination de la résistance au feu de la structure de la paroi (montants ou solives) sont données dans le paragraphe 5.4.

5.2 - Détermination de l'instant du début de la carbonisation de la structure d'une paroi dont le parement ou l'écran côté feu est composé de panneaux bois

Deux variantes peuvent être utilisées pour la détermination de l'instant auquel démarre la carbonisation des montants de la paroi t_{ch} (montants ou solives).

Variante 1 – Détermination de la durée de protection procurée par le parement composé de (n) couches de panneaux bois, selon la méthode donnée dans la section 4. L'instant du début de la carbonisation des montants est défini par la relation suivante :

$$t_{ch} = \sum_{i=1}^{i=n} t_{prot,0,i} \quad ; \quad \text{temps de protection du parement ou instant à partir duquel}$$

commence la combustion des montants de la paroi verticale ou horizontale.

Variante 2 – Détermination de t_{ch} (montants ou solives) en fonction de l'instant de la chute du parement multicouches en panneaux bois. L'instant de la chute d'un parement constitué d'une couche de panneaux bois sera défini par la relation suivante :

$$t_{ch} = t_f = \frac{h_p}{\beta_{0,p,t}} \quad \text{où : } \beta_{0,p,t} = \beta_0 k_p k_h = \beta_0 \cdot \sqrt{450/\rho_k} \cdot \sqrt{20/h_p} \quad (5.1)$$

avec :

- ✓ ρ_k : est la masse volumique caractéristique du panneau bois, en kg/m³,
- ✓ h_p : est l'épaisseur du panneau, en millimètres.
- ✓ β_0 : est la vitesse de la combustion du panneau donné par le tableau 3.1 de la norme NF EN 1995-1-2.

Si le parement est constitué de plusieurs couches de panneaux de bois la vitesse de carbonisation de la première couche côté feu sera celle définie par la relation 5.1.

Une fois que la première couche est consommée, la combustion de la deuxième couche commencera avec une vitesse deux fois plus grande que celle donnée par la relation 5.1, et ceci jusqu'à ce que la profondeur de la combustion atteigne 25 mm. Ensuite la combustion continue avec la vitesse donnée par la relation 5.1.

La somme des durées de consommation des couches donnera l'instant auquel démarrera la combustion des montants.

Finalement, les deux variantes peuvent fournir deux durées de résistance au feu différentes de la protection de l'ossature de la paroi.

- ✓ Pour les structures dont le classement doit satisfaire une exigence REI il faut retenir la durée la plus faible.
- ✓ Pour les structures dont le classement doit satisfaire une exigence EI il faut retenir la durée la plus élevée.

5.3 - Détermination de l'instant du début de la carbonisation de la structure d'une paroi dont le parement ou l'écran côté feu est composé d'une couche en plaques de plâtre et d'une couche de panneaux bois

Pour les parements, ou écrans, constitués d'une couche (ou plusieurs) de plaque de plâtre et d'une couche (ou plusieurs) de panneaux bois la combustion des montants commence également après la chute des deux couches.

L'instant auquel commence la combustion des montants, t_{ch} (montants ou solives), doit être déterminé selon les deux variantes suivantes :

Variante 1 – Détermination de la durée de protection procurée par le parement composé de couche(s) de plaques de plâtre et d'une couche de panneaux bois, selon la méthode donnée dans la section 4. Si le parement est constitué de deux couches il faut déterminer

$$t_{ch} = \sum_{i=1}^{i=2} t_{prot,0,i} : \quad \text{temps de protection du parement ou l'instant à partir duquel commence la combustion des montants de la paroi verticale ou horizontale.}$$

Variante 2 – Détermination de t_{ch} (montants ou solives) en fonction de l'instant de la chute de la couche en plaques de plâtre et de la couche de panneaux bois. L'instant de la chute de la couche en plaques de plâtre peut être déterminé à l'aide des formules données dans le Tableau 5.1.2. Pour calculer l'instant de la chute de la couche en panneau en bois il faut prendre en compte la combustion avant la chute de la couche en plaques de plâtre et après la chute de cette couche. En fonction du type de plaque de plâtre l'instant du début de la combustion de la couche de panneaux en bois peut être déterminé à l'aide des

formules données dans le Tableau 5.1.1. La vitesse de la combustion de la couche en bois pendant la durée ($t_f - t_{ch}$), sera 2 fois plus faible que celle définie par la relation 5.1. Après la chute de la couche(s) en plaques de plâtre la vitesse de la combustion de la couche en bois sera deux fois plus grande que celle donnée par la relation 5.1 et ceci jusqu'à une profondeur de carbonisation de 25 mm. Par la suite la vitesse de combustion de cette couche sera celle donnée par la relation 5.1. Si plusieurs couches de panneaux en bois sont mis en œuvre, après la chute de chaque couche en bois la vitesse de la combustion de la couche suivante sera deux fois plus grande que celle donnée par la relation 5.1.

Comme dans le cas des parements en bois, les deux variantes peuvent fournir deux durées différentes de la protection de l'ossature de la paroi.

- ✓ Pour les structures dont le classement doit satisfaire une exigence REI il faut retenir la durée la plus faible.
- ✓ Pour les structures dont le classement doit satisfaire une exigence EI il faut retenir la durée la plus élevée.

5.4 - Détermination de la résistance au feu des montants et solives des parois verticales et horizontales.

La résistance des montants et des solives des parois est calculée selon la méthode de la section réduite. Selon cette méthode la section efficace est celle qui n'est pas du tout affectée par la carbonisation et l'échauffement. Il faut, par conséquent, diminuer la section initiale de ces éléments en enlevant la partie dont la résistance est nulle. L'épaisseur de résistance nulle est appelé l'épaisseur effective carbonisée. Elle est donnée par la formule suivante :

$$d_{ef} = d_{char} + d_0 \quad (5.2)$$

Pour les éléments, dont la face exposée au feu travaille en traction :

- ✓ $d_0=10$, si la résistance au feu exigée de la paroi est $\leq REI 30$,
- ✓ $d_0=20$, si la résistance au feu exigée de la paroi est $> REI 30$.

Pour les éléments, dont la face exposée au feu travaille en compression :

- ✓ $d_0=20$, si la résistance exigée de la paroi est $\leq REI 30$,
- ✓ $d_0=30$, si la résistance exigée de la paroi est $> REI 30$.

Le calcul de d_{char} est effectué comme ci-après.

A - Isolant laine de roche

Pour un isolant de type laine de roche, avant que le parement côté feu chute et pendant la durée de la protection de l'isolant ($t_{prot,isolant}$), telle que calculé dans la section 4, on

suppose que les montants et les solives carbonisent seulement sur la face côté feu. Ensuite, si les parements opposés au feu sont fixés directement sur ces éléments porteurs, ces derniers carbonisent, également, sur les deux faces latérales ; et si les parements opposés au feu sont décalés par des tasseaux, les porteurs carbonisent sur les quatre faces.

L'épaisseur carbonisée est défini selon les relations suivantes :

$$d_{\text{char}} = k_s \cdot k_n \cdot k_2 \cdot \beta_0 \quad \text{pour } t_{\text{ch}} \leq t \leq t_f \quad (5.3)$$

$$d_{\text{char}} = k_s \cdot k_n \cdot k_3 \cdot \beta_0 \quad \text{pour } t > t_f \quad (5.4)$$

$k_n = 1.5$, est le facteur permettant la conversion de la section résiduelle en section rectangulaire,

k_s , est le facteur de section. Il est calculé selon les relations :

$$k_s = 0.00023 \cdot b^2 - 0.045b + 3.19 \quad \text{pour } 38 \text{ mm} \leq b \leq 90 \text{ mm} \quad (5.5)$$

$$k_s = 0.00023 \cdot b^2 - 0.045b + 3.19 \quad \text{pour } b > 90 \text{ mm} \quad (5.6)$$

$k_2 = 2$, est le facteur d'isolation,

k_3 , est le coefficient de post-protection. Ces valeurs sont:

$$k_3 = 3 \quad \text{pour } t_f \leq 30 \text{ minutes,}$$

$$k_3 = 3.5 \quad \text{pour } t_f > 30 \text{ minutes,}$$

β_0 , est la vitesse de carbonisation uni-dimensionnelle donnée dans le tableau 3.1 de la norme NF EN 1995-1-2 et calculée par la relation 5.1.

La section efficace réduite des montants et des solives est celle qui reste après avoir enlevée l'épaisseur $d_{\text{ef}} = d_{\text{char}} + d_0$ déterminée comme expliqué ci-avant.

La vérification de la résistance des montants et des solives sera effectuée en utilisant leurs sections efficaces réduites avec l'aide des formules utilisées pour les calculs à froid de ces éléments de structure.

B - Isolant laine de verre ou autres types

Pour un isolant de type laine de verre ou autre, avant que le parement côté feu chute, et pendant deux minutes après le début de chute de ce parement, on suppose que les montants et les solives carbonisent seulement sur la face côté feu. Ensuite, si les parements opposés au feu sont fixés directement sur ces éléments porteurs, ces derniers carbonisent, également, sur les deux faces latérales ; et si les parements opposés au feu sont décalés par des tasseaux, les porteurs carbonisent sur les quatre faces.

L'épaisseur carbonisée et les différents coefficients sont définis de manière identique à ceux donnés ci-dessus pour la laine de roche.

6 - CONCLUSIONS

Cette étude a permis de donner deux variantes pour la détermination de la résistance au feu des parois et des planchers. La première variante permet de définir la résistance au feu de ces éléments de construction uniquement par le parement exposé au feu sans effectué aucun calcul. La deuxième variante (voir chapitres 4 et 5) permet par des calculs d'optimiser les durées de résistance au feu des parois verticales et horizontales en prenant en compte la contribution de parement opposé au feu et celle de la structure porteuse de la paroi.

L'optimisation de la durée de résistance au feu d'une paroi peut être également effectuée à l'aide d'essais de résistance au feu réalisé par un laboratoire agréé.

Les tableaux 6.1 et 6.2 représentent respectivement les configurations des parois verticales et des planchers et leurs durées de résistance au feu assurées uniquement par les parements exposés au feu.

Types de parement de parois verticales	Classement de résistance au feu pour les types des isolants étudiés*	
	EI	REI
1xBA13-A, ou panneau bois e=16 mm	15	15
1xBA13-A + panneau bois (1x12 mm)	30	15
Panneaux bois : 2x12 mm	30	15
Panneau bois 1x25 mm	30	30
2xBA13-A, ou 1xBA18-D, ou 1xBA15-F	30	30
1xBA13-A + 1xBA18-D	60	30
2xBA18-D	60	60

*Laine de verre, laine de roche, ouate de cellulose, fibres de bois, chanvre et laine de mouton (pour masses volumiques voir §3).

Tableau 6.1 : Classement de résistance au feu de parois verticales, sans calculs complémentaires.

Types d'écran de planchers	Classement de résistance au feu pour les types des isolants étudiés*	
	EI	REI
1xBA13-A	15	15
2xBA13-A, ou 1xBA15-F, ou 1xBA18-D	30	15
Panneaux bois : 1x22 mm	15	15
Panneaux bois : 1x25 mm	30	30
2xBA13-A, ou 1xBA18-D, ou 1xBA15-F, 2xBA15-F, ou 2xBA18-D	30	30
3xBA15-F	60	60

*Laine de verre, laine de roche, ouate de cellulose et fibres de bois (pour les masses volumiques voir §3).

Tableau 6.2 : Classement de résistance au feu de planchers, sans calculs complémentaires.

Les durées de résistance au feu décrites en figure 6.1 et 6.2 restent valables aussi bien avec des montants et des solives en bois massif qu'en lamellé-collé, contrecollé, LVL, et en poutre I, ...

Les planchers protégés d'un écran composé de 2xBA15-F ou de 2xBA18-D sont estimés REI60 si l'isolant inséré dans le plénum au-dessus de la structure porteuse de l'écran est du type laine de roche de masse volumique supérieure ou égale à 26 kg/m³.

Concernant les pas des fixations des couches successives des parements des parois verticales les recommandations suivantes doivent être appliquées :

- Pour les parements constitués d'une seule couche le pas des fixations ne doit pas dépasser 300 mm.
- Pour les parements constitués de deux couches le pas des fixations de la première couche en contact avec les montants doit être inférieur ou égale à 600 mm et celui de la deuxième ne doit pas dépasser 300 mm.
- Pour les parements constitués de trois couches le pas des fixations des deux premières couches doit être inférieur ou égale à 600 mm et celui de la troisième couche ne doit pas dépasser 300 mm.

Concernant le pas de fixation des couches successives des écrans des planchers les recommandations suivantes doivent être appliquées :

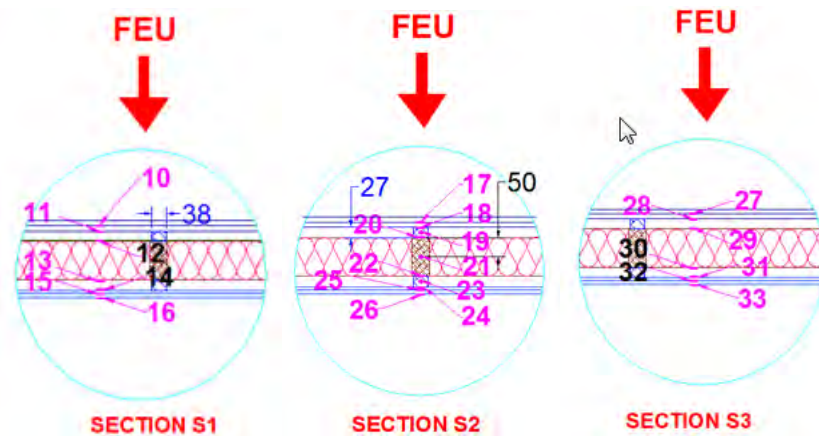
- Pour les écrans constitués d'une seule couche le pas des fixations ne doit pas dépasser 300 mm.
- Pour les écrans constitués de deux couches le pas des fixations de la première couche en contact avec les montants doit être inférieur ou égal à 600 mm et celui de la deuxième ne doit pas dépasser 300 mm.
- Pour les écrans constitués de trois couches le pas des fixations des deux premières couches doit être inférieur ou égal à 600 mm et celui de la troisième couche ne doit pas dépasser 300 mm.

D'une couche à l'autre les fixations doivent être en quinconce.

Concernant le comportement au feu des planchers constitués de CLT un essai a été réalisé et analysé. Mais, étant donné que le nombre et l'épaisseur des couches de ces produits varient de manière significative, l'essai réalisé ne permet pas de tirer une conclusion définitive sur le comportement au feu de ces planchers. Par conséquent, il paraît intéressant qu'une étude plus approfondie soit réalisée concernant le comportement au feu des planchers et des parois composés de CLT.

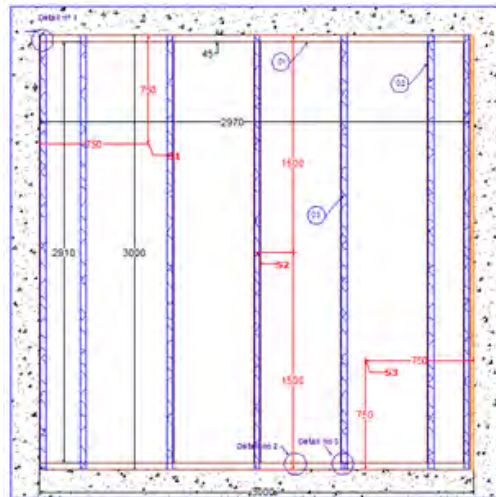
7 - DOCUMENTS DE REFERENCE

1. Fire Safety in Timber Buildings, Technical guideline for Europe, SP Report 2010:19, ISBN 978-91-86319-60-1, SP Trätekt, Box 5609, SE-114 86 Stockholm, Sweden.
2. Rapports d'essais de résistance au feu de cloison n° RS11-053/A à RS11-053/L.
3. Rapports d'essai de résistance au feu de maquettes de plancher n°RS12-001.
4. Rapports d'essais de résistance au feu de planchers n°RS12-098 à RS12-108.
5. EN 300, Oriented Strand Boards (OSB) - Definitions, classification and specifications, European Standard, CEN, Brussels, 2006.
6. EN 312, Particleboards - Specifications, European Standard, CEN, Brussels, 2003.
7. EN 622-2, Fibreboards - Specifications - Part 2: Requirements for hardboards, European Standard, CEN, Brussels, 2004.
8. EN 622-3, Fibreboards - Specifications - Part 3: Requirements for medium boards, European Standard, CEN, Brussels, 2004.
9. EN 622-5, Fibreboards - Specifications - Part 5: Requirements for dry process boards (MDF), European Standard, CEN, Brussels, 2006.
10. EN 636: Plywood - Specifications, European Standard, CEN, Brussels, 2003.
11. EN 520, Gypsum plasterboards - Definitions, requirements and test methods, European Standard, CEN, Brussels, 2004.
12. EN 15283-2, Gypsum boards with fibrous reinforcement - Definitions, requirements and test methods - Part 2: Gypsum fibre boards, European Standard, CEN, Brussels, 2008.
13. EUROCODE 5 (NF EN-1995-1-2), Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-2 : Généralités – Calculs des structures au feu, septembre 2005.

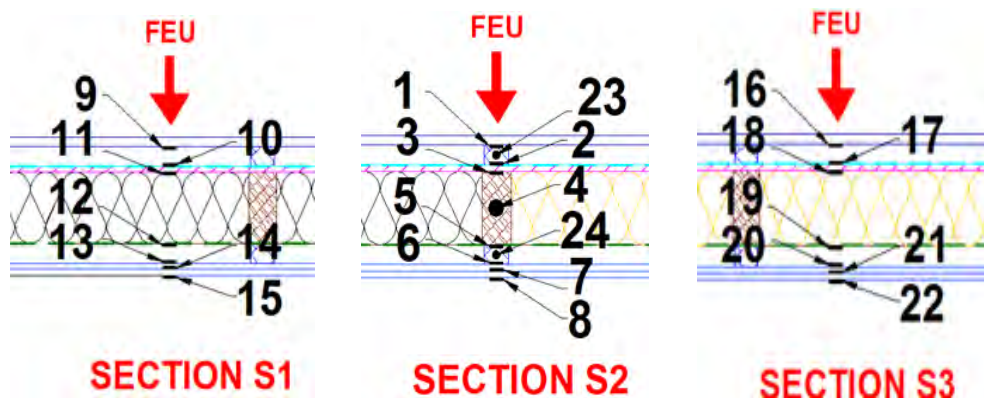


A1-4 - Positionnement des thermocouples de l'essai RS11-053/E.

3 - Positionnement des thermocouples de l'essai RS11-053/I



A1-5 - Positionnement des sections où sont installés les thermocouples de l'essai RS11-053/I.



A1-6 - Positionnement des thermocouples de l'essai RS11-053/I.