

3^{ème} Ecole d'automne du GDR
Durabilité des matériaux de construction biosourcés



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Résistance au feu des matériaux biosourcés

Christophe Lanos (LGCGM – Univ. Rennes)

christophe.lanos@uni-rennes.fr



17-20 octobre 2023, Bagnères-de-Bigorre



Sommaire

Introduction

Notion de protection incendie

Le feu

Définition de la résistance au feu

Méthodes d'évaluation de la résistance au feu

Essais au feu

Exemples de résultats

Cas du bois

Cas d'une paroi réalisée avec un complexe biosourcé

Cas d'un mur multicouche avec ossature bois

Essai de transmission de feu entre étages

Modélisation de la résistance au feu

Transfert couplé : températures et masse au sein du matériau

Dégradation par combustion

Interposition d'un écran devant le matériau combustible

Introduction

- Généralités

80 % des sinistres dans **bâtiments d'habitation** et 10% dans **bâtiments publics**

95% des décès dus à la **fumée**, très peu dus à la chaleur

→ Causes des incendies

- **naturelles** : foudre, cataclysme,...

- le plus souvent **humaines** : directement (maladresse, malveillance,...) ou indirectement (défaut de construction, d'entretien, de surveillance,...)

→ Intensité de l'incendie: Durée et Températures atteintes

- Fonction de la **quantité de matières combustibles**

Charge d'incendie = somme des potentiels calorifiques de tous les matériaux combustibles contenus dans le local en MégaJoules (MJ) ou en kg de bois équivalents (1kg de bois = 17,3 MJ)

→ valeurs forfaitaires en fonction du type du local

- Fonction des conditions de **ventilation**

- Principe de gestion de l'incendie

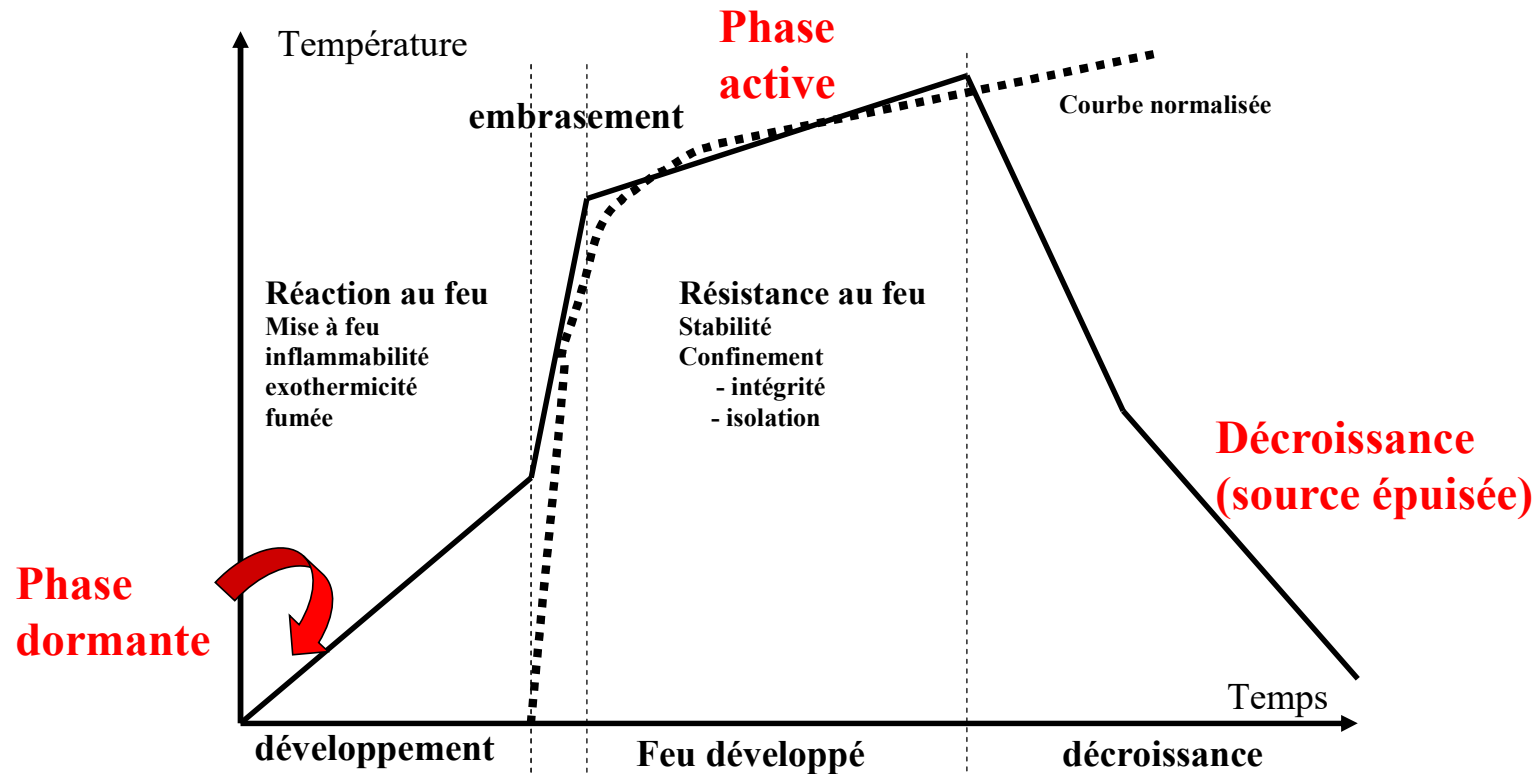
- Empêcher l'apparition de l'incendie (réaction au feu des matériaux)
- Garantir la sécurité des personnes occupant le bâtiment affecté par l'incendie
 - Stabilité des éléments porteurs
 - Evacuation des occupants
- Permettre une intervention efficace des secours en sécurité
 - gestion de la ventilation
- Limiter la propagation de l'incendie aux locaux et bâtiments voisins

→ Remarque: La sauvegarde du bâtiment endommagé par l'incendie ne constitue pas un objectif

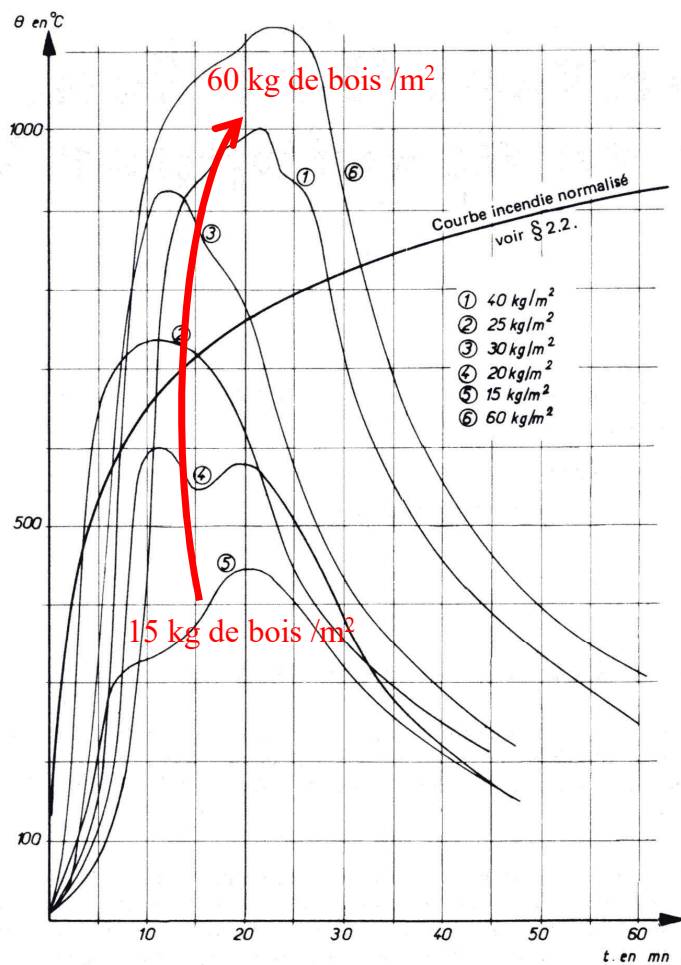
Notion de protection incendie

Le feu

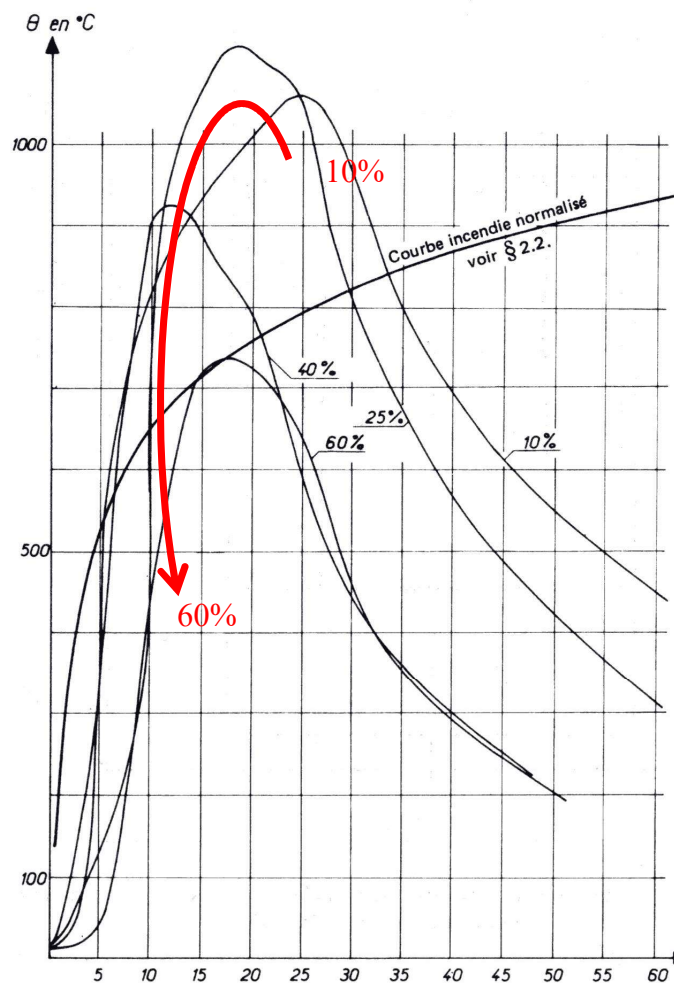
- Evolution caractéristique de la température durant un incendie



● Influence de la puissance du feu:

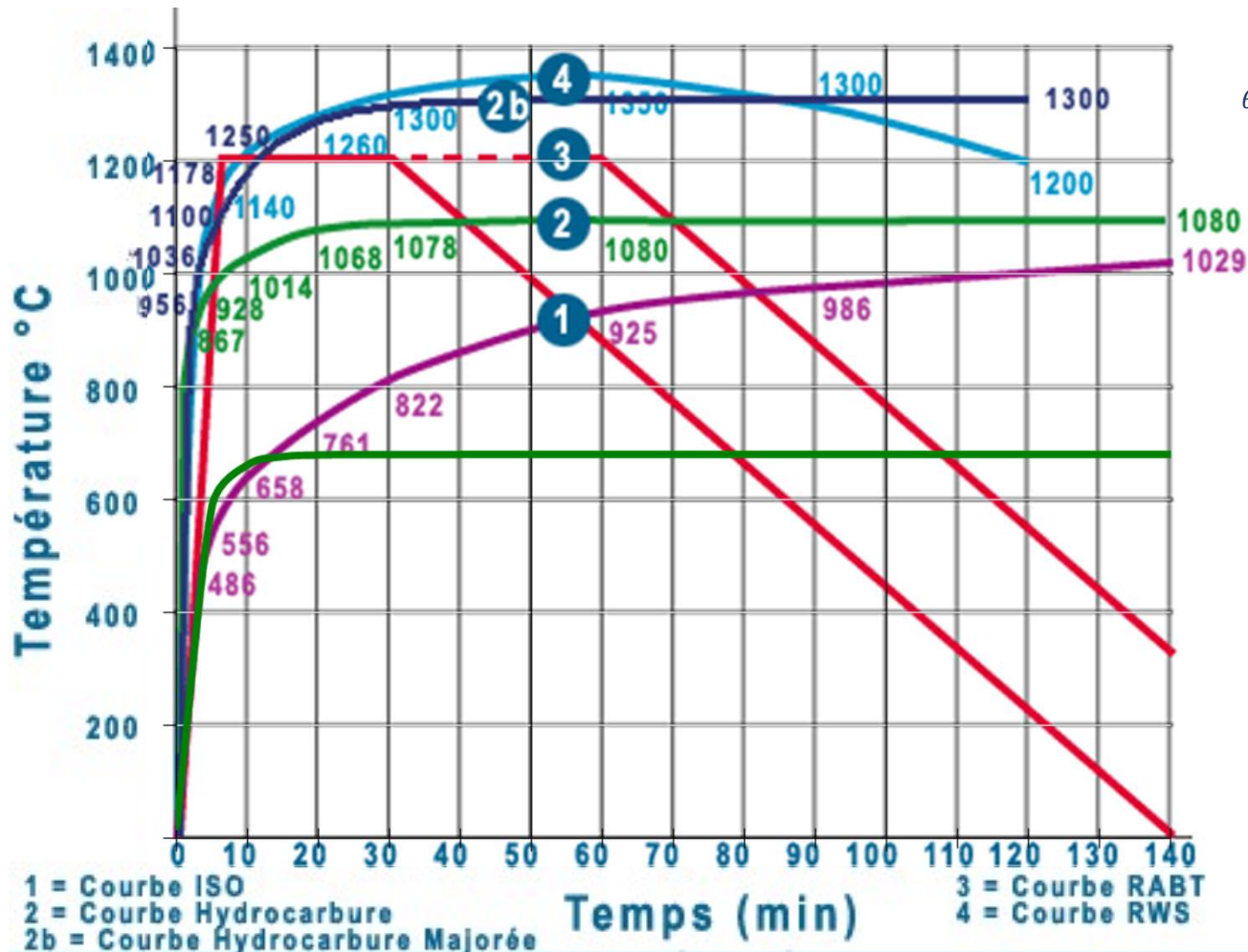


Evolution de la température pour différentes charges d'incendie (kg de bois / m^2)



Evolution de la température pour différentes conditions de ventilation charges d'incendie = 30 kg de bois / m^2

● La modélisation du feu



Hydrocarbure majorée
 $\theta = \theta_0 + 1280(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t})$

Hydrocarbure
 $\theta = \theta_0 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t})$

norme EN 1991-1-2 (ISO 834)
 $\theta_g = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1)$

Feu extérieur
 $\theta = \theta_0 + 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t})$

T en celsius et t en minutes

→ Différentes courbes normalisées de température de four pour simuler les conditions d'un incendie

Définition de la résistance au feu

● Exigences REI

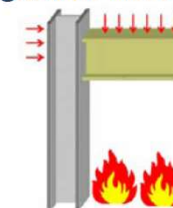
Exigences...	... Marquage requis
SF Stabilité au feu	R
PF Pare-flammes	E ou RE
CF Coupe-feu	EI ou REI

Stabilité des éléments de structure garantie pendant le temps spécifié

Capacité portante R

R120

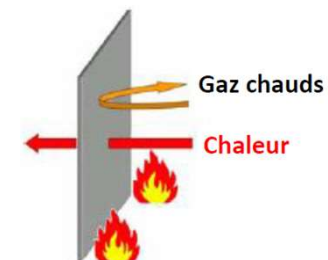
Chargement mécanique



Les composants de la construction doivent être étanches aux flammes et gaz

Étanchéité au feu E

E30



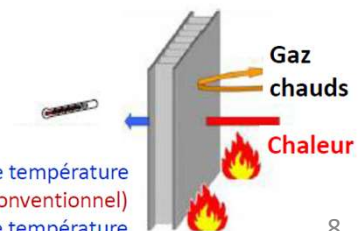
Les composants doivent assurer l'isolation thermique.

Élévation moyenne sur la face protégée <math>< 140^\circ</math>

180° ponctuellement

Isolation thermique I

I90



Élévation moyenne de température ≤ 140 K (sous un feu conventionnel)
Élévation maximale de température ≤ 180 K (sous un feu conventionnel)

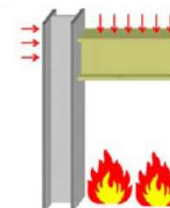
● Exemple d'exigences dans le cas d'habitation :

Résistance au feu (valeurs indicatives – voir CCTP de l'ouvrage)

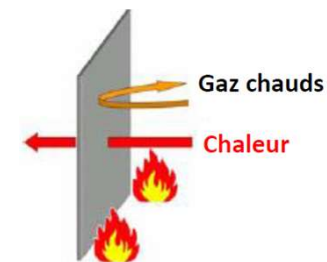
TYPE D'OUVRAGE	Maison R+1 max	Maison > R+1 Collectif < R+3	Collectif < R+7 et H < 28m	Collectif 28m < H < 50m
	1 ^{RE} FAMILLE	2 ^E FAMILLE	3 ^E FAMILLE	4 ^E FAMILLE
PLANCHERS*	REI 15 pour plancher haut du sous-sol	REI 30	REI 60	REI 90
ÉLÉMENTS PORTEURS VERTICAUX (MURS – POTEAUX)	R 15	R 30	R 60	R 90
PAROIS VERTICALES DE L'ENVELOPPE DU LOGEMENT À L'EXCLUSION DES FAÇADES	Pas d'exigence	EI 30	EI 30	EI 60

Note : dans le cas d'habitations individuelles des 1^{res} et 2^e familles jumelées ou réunies en bandes, les parois séparatives doivent être EI 15.

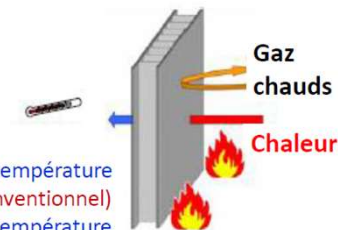
Capacité portante R



Étanchéité au feu E



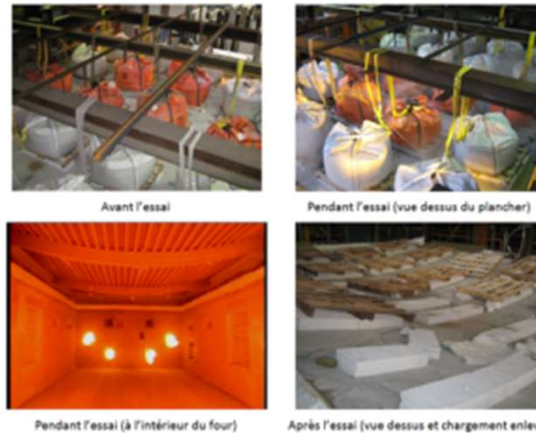
Isolation thermique I



Élévation moyenne de température
≤ 140 K (sous un feu conventionnel)
Élévation maximale de température
≤ 180 K (sous un feu conventionnel)

Méthodes d'évaluation de la résistance au feu

● Essai à échelle réelle



Exemple :

- Four d'essai 16 pyromètres pour évaluer la température du four
- Puissance 6 MW
- 12 brûleurs à gaz
- 4 x 3 m²
- - Mur test place devant le four

- Grande surface d'échantillon exposée directement au feu
- Température du four suivant une des courbes de feu normalisé
- Essai sous charge mécanique
- Four vertical ou horizontal...



Images Durant l'essai

● Exemple d'échantillon réalisé pour l'essai



Mur bloc de béton de chanvre + enduit



Mur bois – OSB + fibre de bois



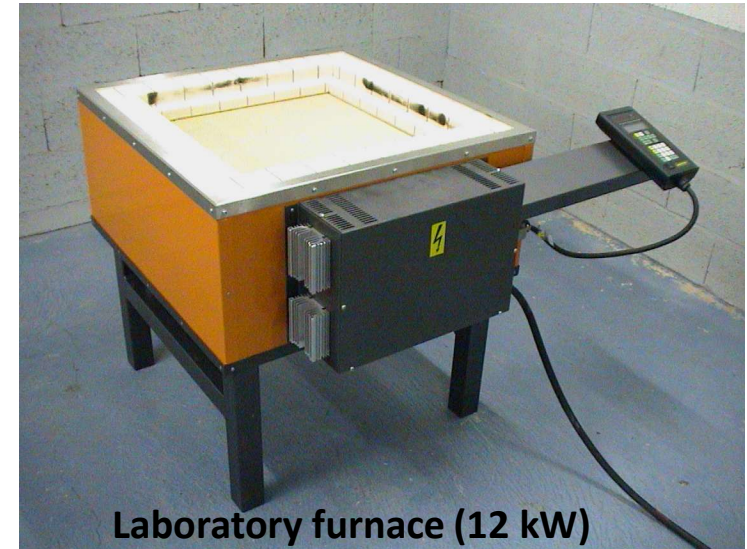
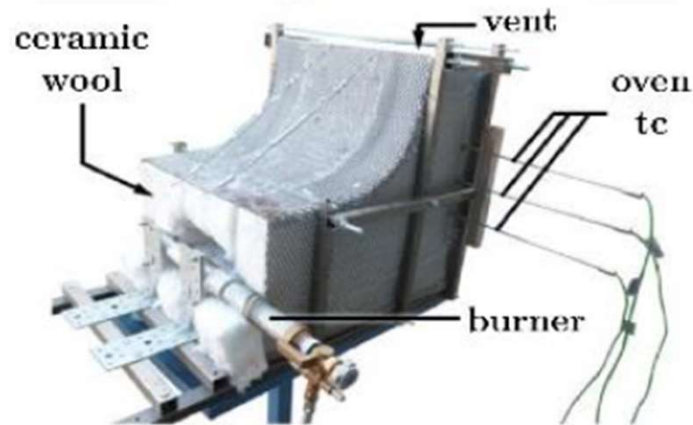
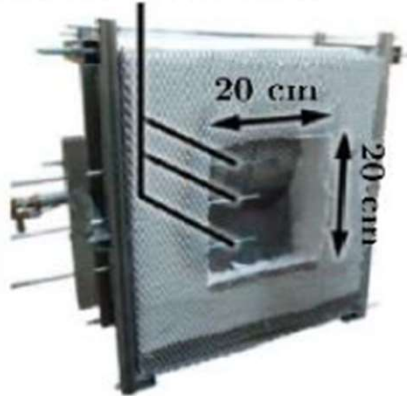
Mur paille - enduit terre

● Essais à échelle réduite

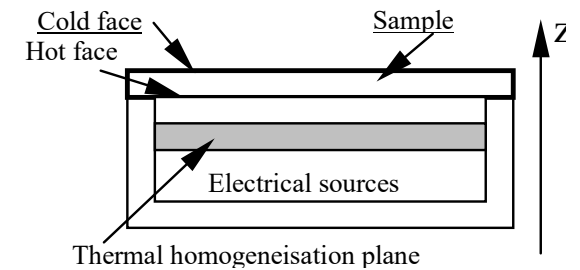


Four à gaz de taille réduite – feu ISO

oven thermocouples



Four électrique LGCGM

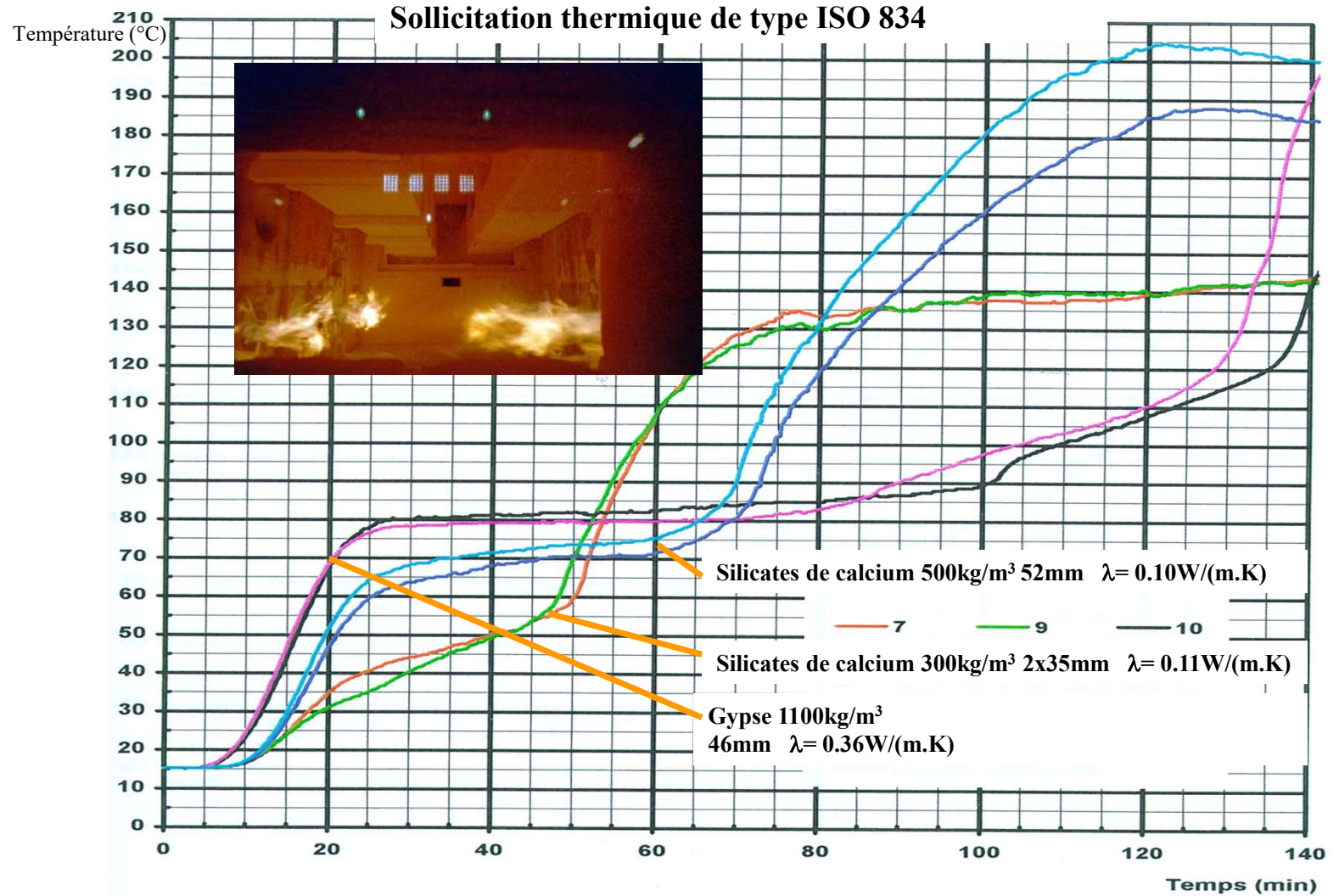


- Petite surface d'échantillon exposée aux hautes températures
- Température du four selon feu normalisé ou pas
- Effet 1D uniquement

Essais au feu

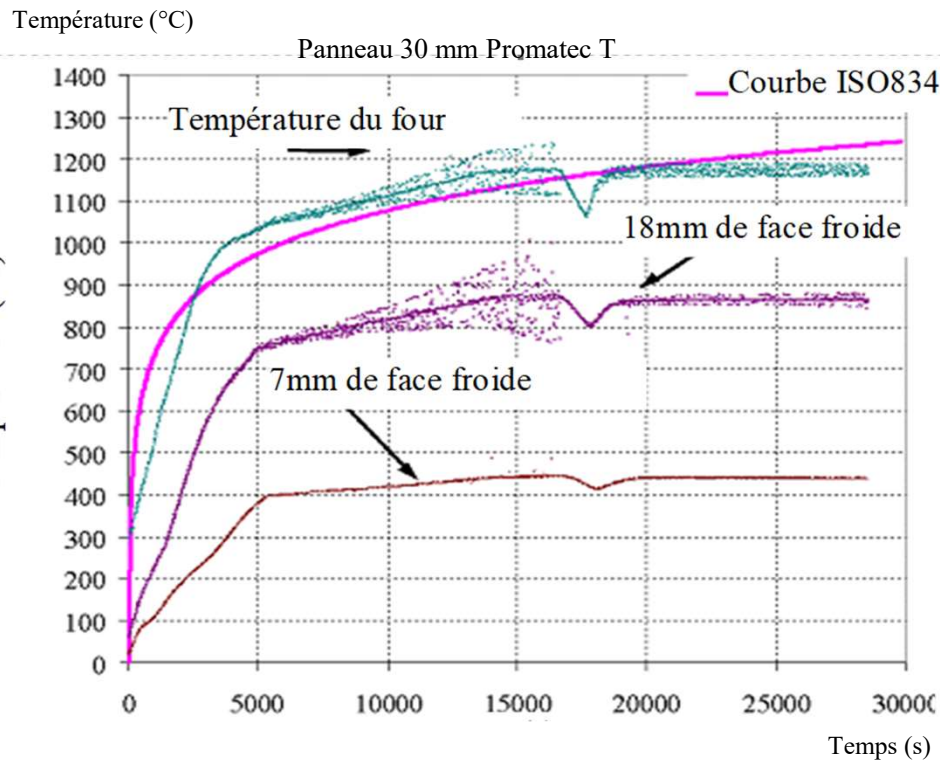
Exemples de résultats

- températures de la face non exposée

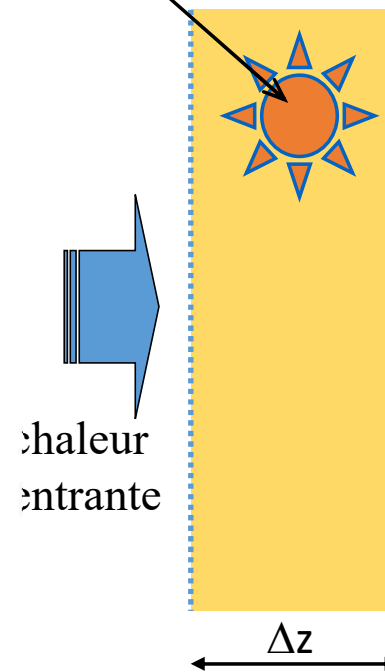


- températures au sein du matériau

→ Cas d'un matériau simplement diffusif



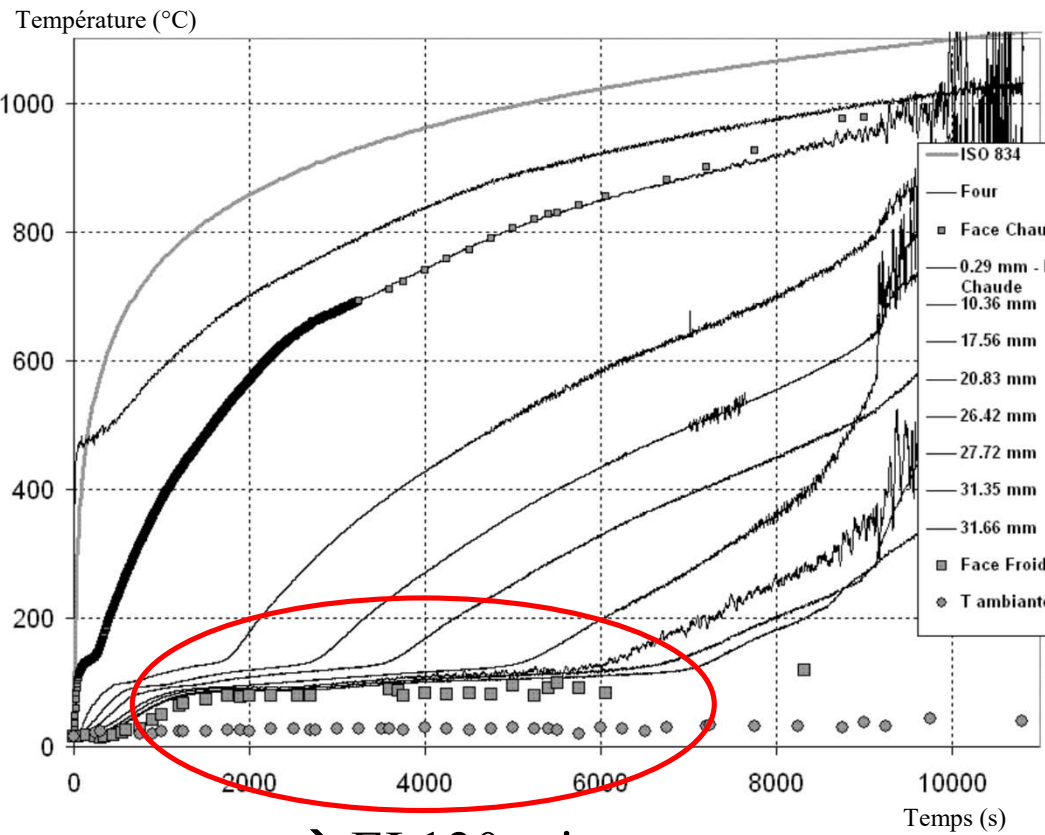
chaleur stockée



$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

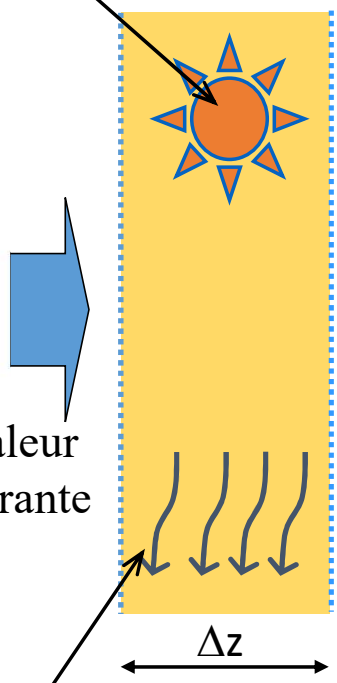
● Exemple de résultats : températures au sein du matériau

→ Cas d'un matériau à changement de phase : le gypse (35 mm)



→ EI 120 min
 → Fissuration du panneau

chaleur stockée



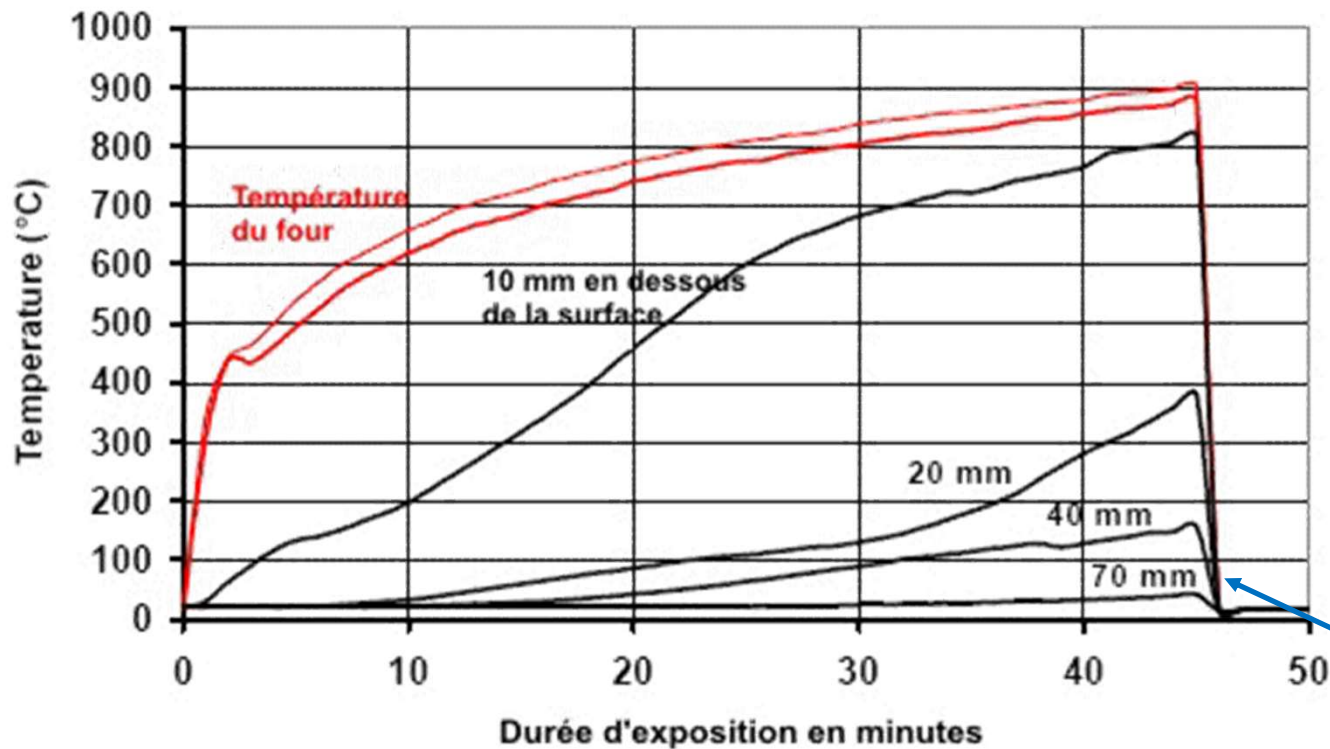
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \phi_g = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\phi_g = \rho \Delta H \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)$$

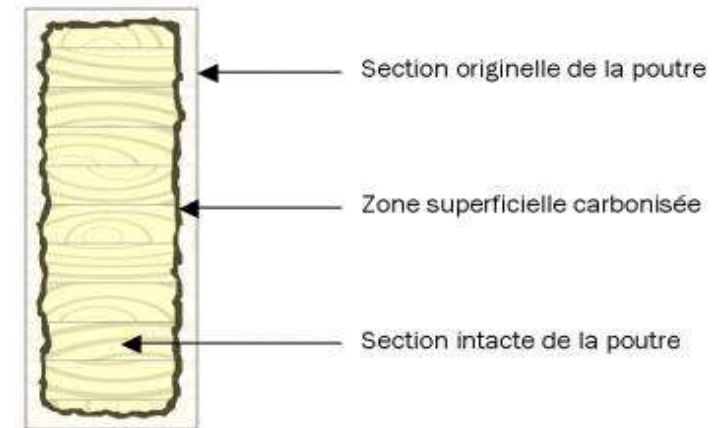
cinétique de conversion chimique du matériau (vaporisation, déshydratation, décarbonatation)

Cas du bois

- Evolution de la température du bois en fonction de la profondeur



Températures moyennes mesurées à différentes profondeurs de poutres en bois lamellé collé (6) soumises à des essais d'exposition au feu.
Etude réalisée par le Norwegian Institute of Wood Technology (NTI) avec la participation du FMPA. Rapport SP 2001:35



la température centrale d'une pièce en bois lamellé exposée à un essai au feu n'excède pas 50°C au bout de 45 min

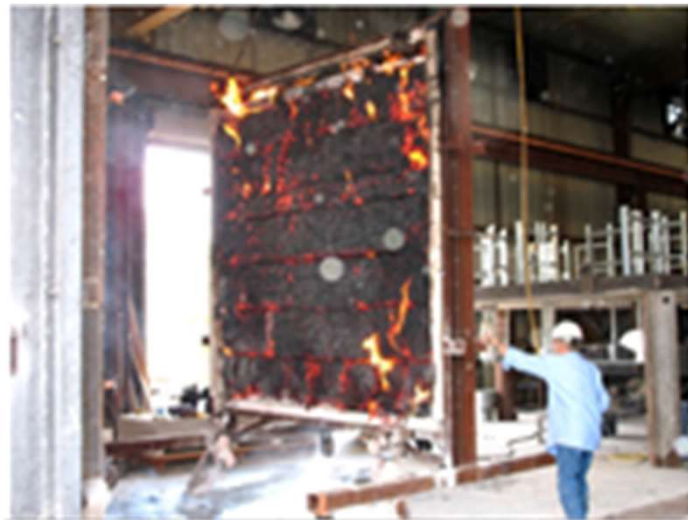
Cas d'un mur de paille



Render applied on samples



Stucco reinforcing mesh



Furnace opening
(exposed render fall down)



unexposed render after hose stream test

- EI 120 min
- Effet protecteur de l'enduit
- Feu couvant

Cas d'un mur de béton de chanvre

● Mur maçonné

● Mur moulé – ossature bois



Application of render



30 minutes



60 minutes

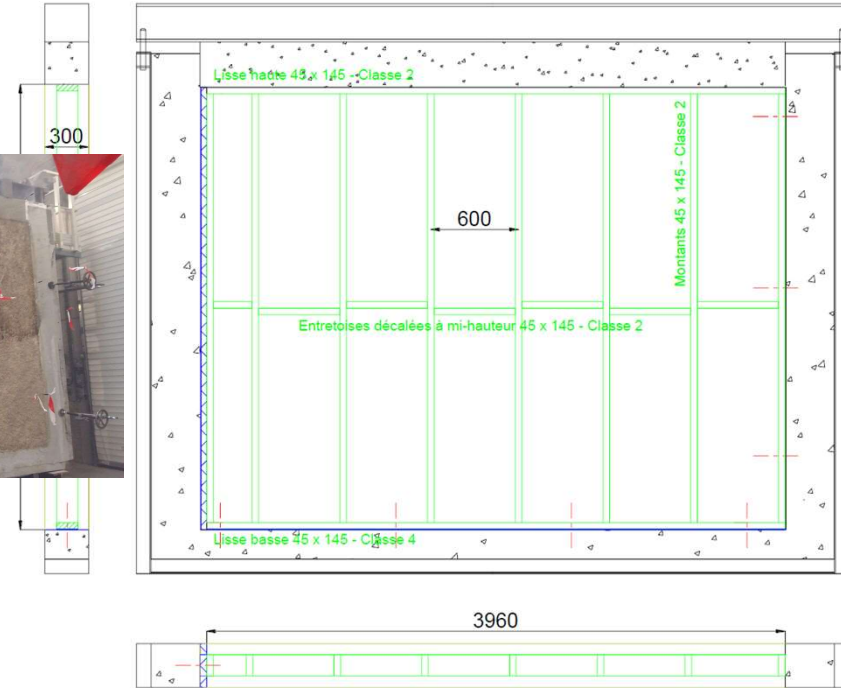


90 minutes



102 minutes

→ EI 90 min

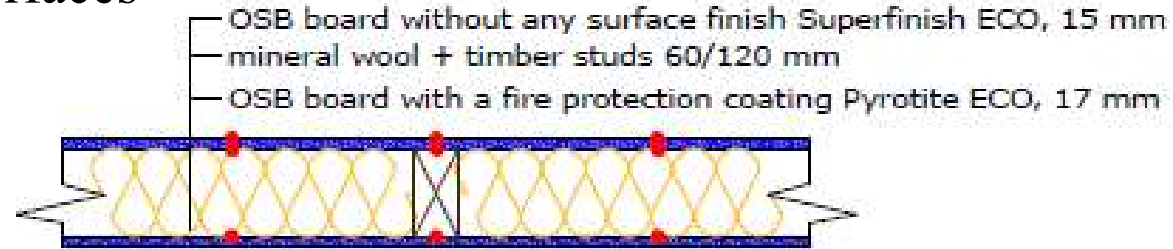


Étanchéité au feu (E)	
Inflammation soutenue	240 minutes (sans échec)
Inflammation du tampon de coton	240 minutes (sans échec)
Pénétration et déplacement d'un calibre d'ouverture	240 minutes (sans échec)
Isolation thermique (I)	
Durée de l'isolation thermique	240 minutes (sans échec)

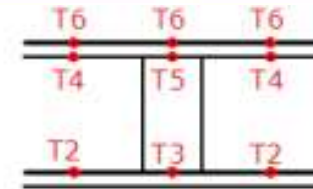
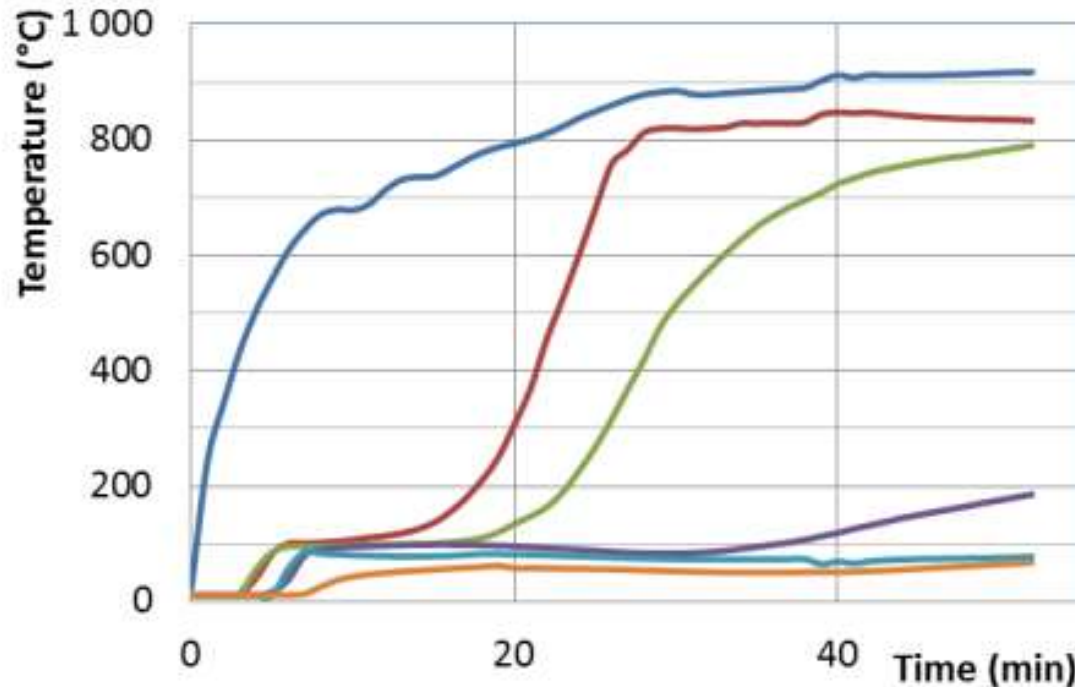
Cas d'une paroi réalisée avec un complexe biosourcé

- Evolution de la température aux interfaces

COST Action FP1404
 Fire Safe Use of Bio-based Building Products
 WG2/TG4 Claddings

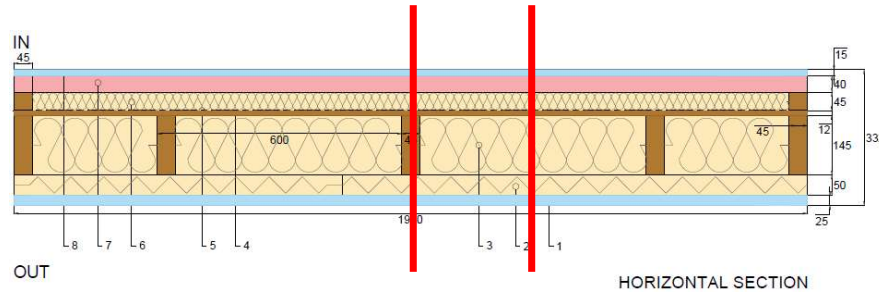
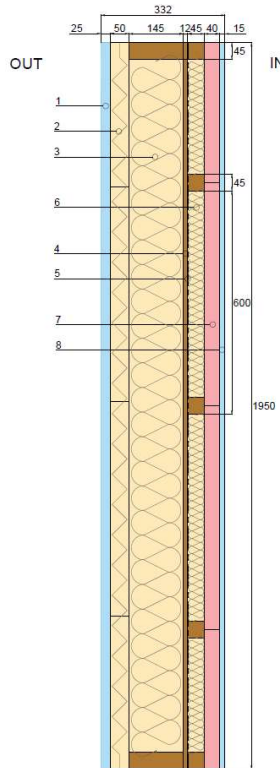


Progression of temperatures in the wall



- Temperature in the furnace
- T2_average (Isolant coté exposé au feu)
- T3_average (Ossature bois coté exposé au feu)
- T4_average (Isolant coté non exposé)
- T5_average (Ossature bois coté non exposé)
- T6_average

● Conditions d'essais



Position C Position A

- Specimen surface exposed to the fire of $1 \times 0.5 \text{ m}^2$
- Plaster and render applied on site, reinforced with a glass fiber mesh ($5 \times 5 \text{ mm}^2$)
- Delay of 28 days for the hardening and drying

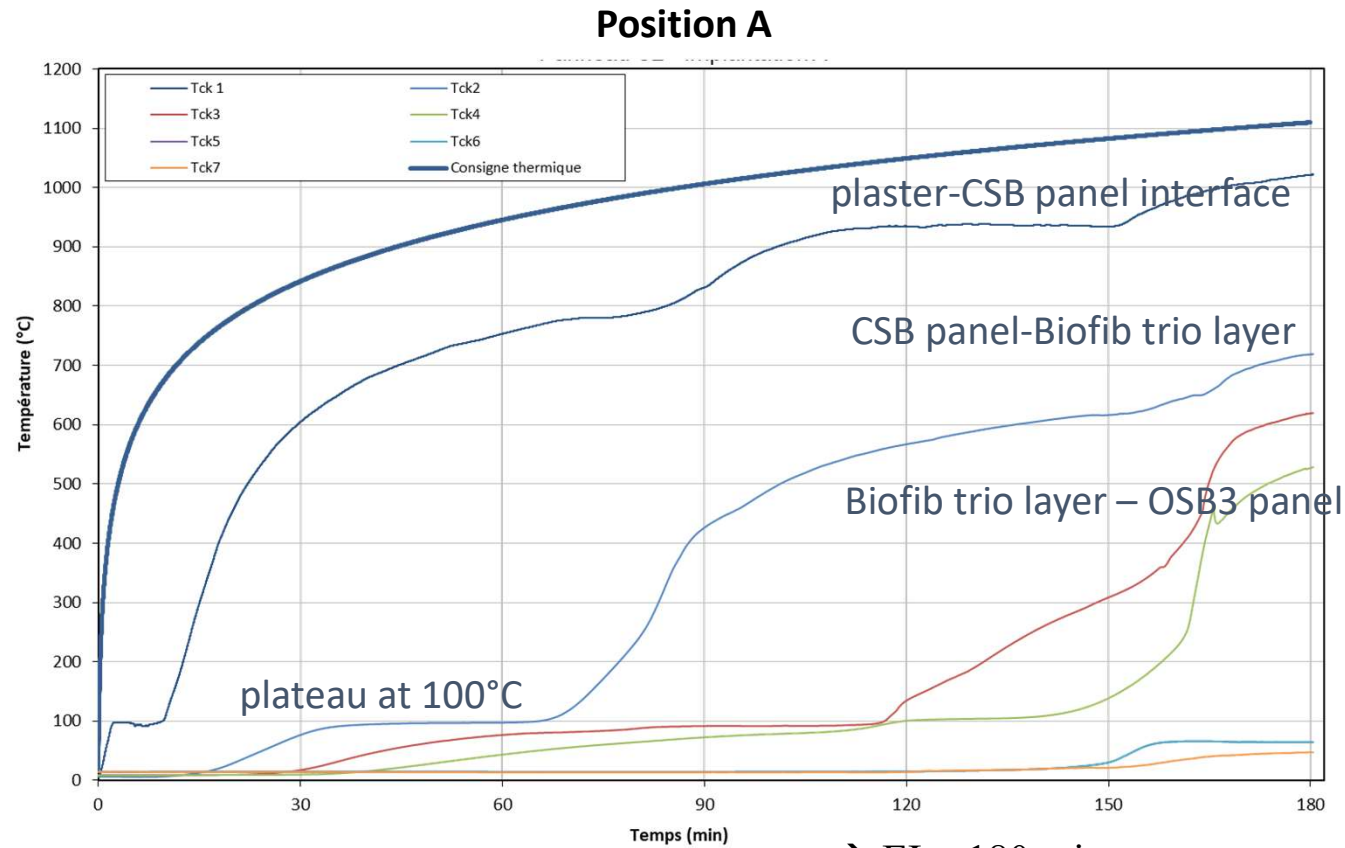
- Thermocouples placés à chaque interface (position A et C)
- Test avec feu extérieur
- Test avec feu intérieur



- Mur de test en béton cellulaire
- Fenêtres de test
- Étanchéité avec laine céramique



● Feu intérieur



→ EI = 180 min

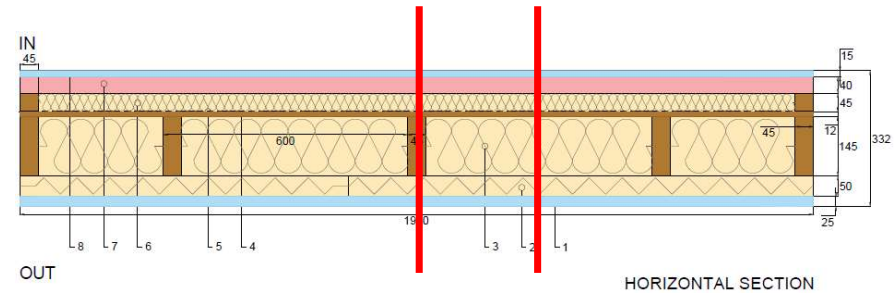
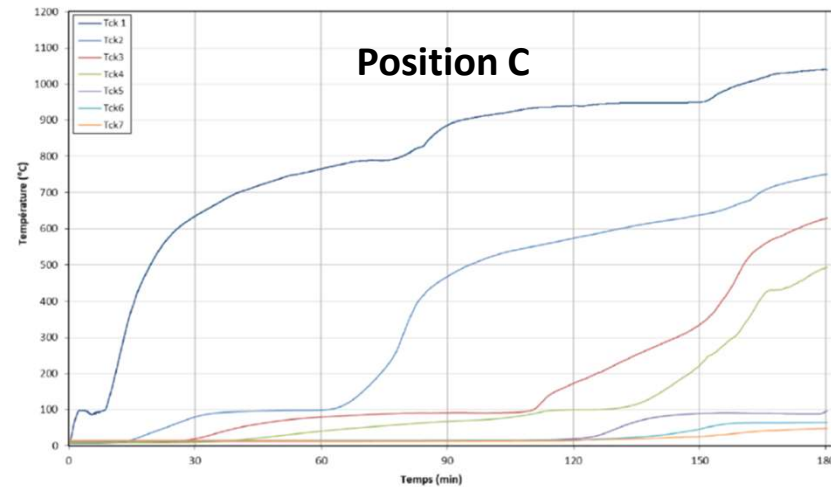
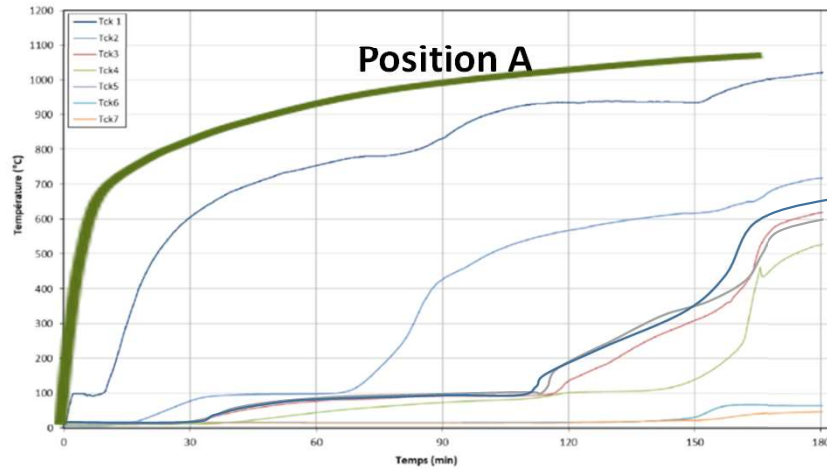
- face non exposée < 100°C après 3 heures

- Tck2, Tck3 and Tck4 stabilisés sous 700°C

→ l'enduit intérieur joue le rôle d'écran au flux de chaleur

→ Arrêt de l'essai lié à une perte d'étanchéité

● Feu intérieur



Position C Position A

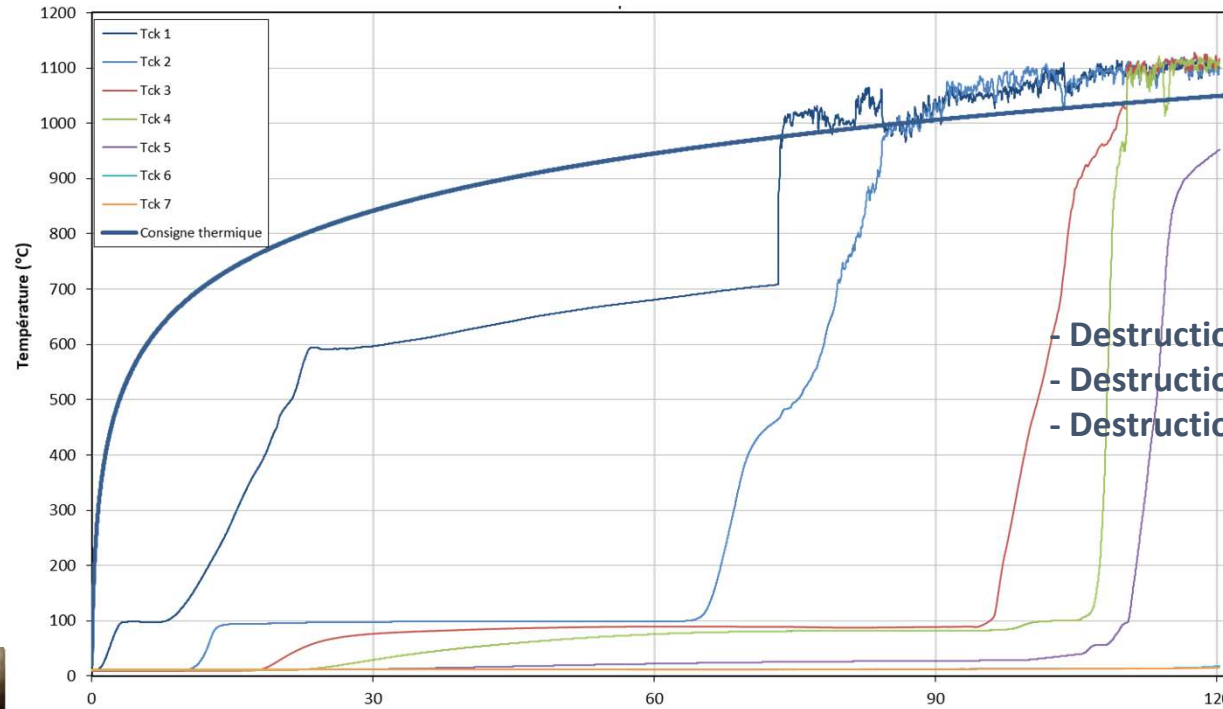
- Courbes similaires pour les deux positions
- Tck3 (panneau OSB3) sur le plateau à 100°C:
 - jusqu'à 115 min en position A
 - jusqu'à 110 min en position C

Champ de température très homogène

- Pas altéré par la présence de l'ossature bois
(même constat en feu extérieur)

● Feu extérieur

Position A



→ EI = 120 min

- enduit ext : court plateau à 100°C = faible teneur en eau
plateau à 700°C = décarbonatation

- à 75 min : rupture de l'enduit

- exposition directe des autres couches qui se détruisent progressivement

→ Arrêt de l'essai lié à un passage de flamme



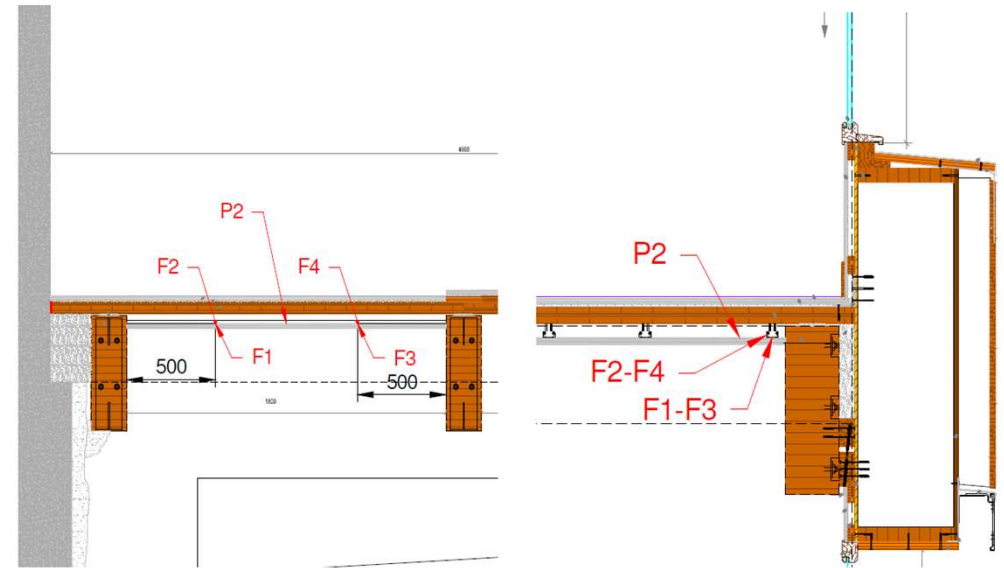
● Bilan des essais réalisés

Feu extérieur sur solution ISOBIO:	EI 120 min
Feu intérieur sur solution ISOBIO:	EI 180 min
Feu extérieur sur variante avec bardage bois:	EI 92 min
Feu intérieur sur variante avec BA13:	EI 65 min

- La résistance au feu est directement liée à:
- l'intégrité de la face exposée (enduit)
 - la préservation de la stabilité de toutes les couches constitutives

Essai de transmission de feu entre étages

→ simuler un incendie en grandeur réelle



Position des thermocouples dans le faux plafond (plancher SUD)

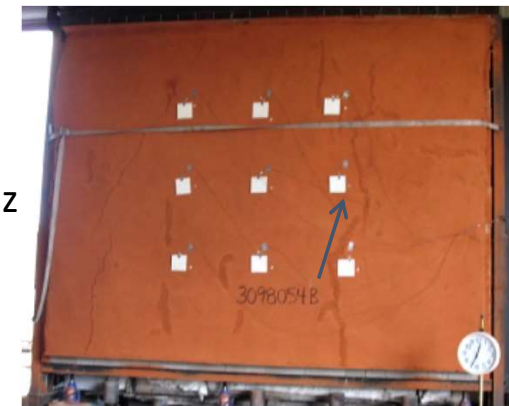
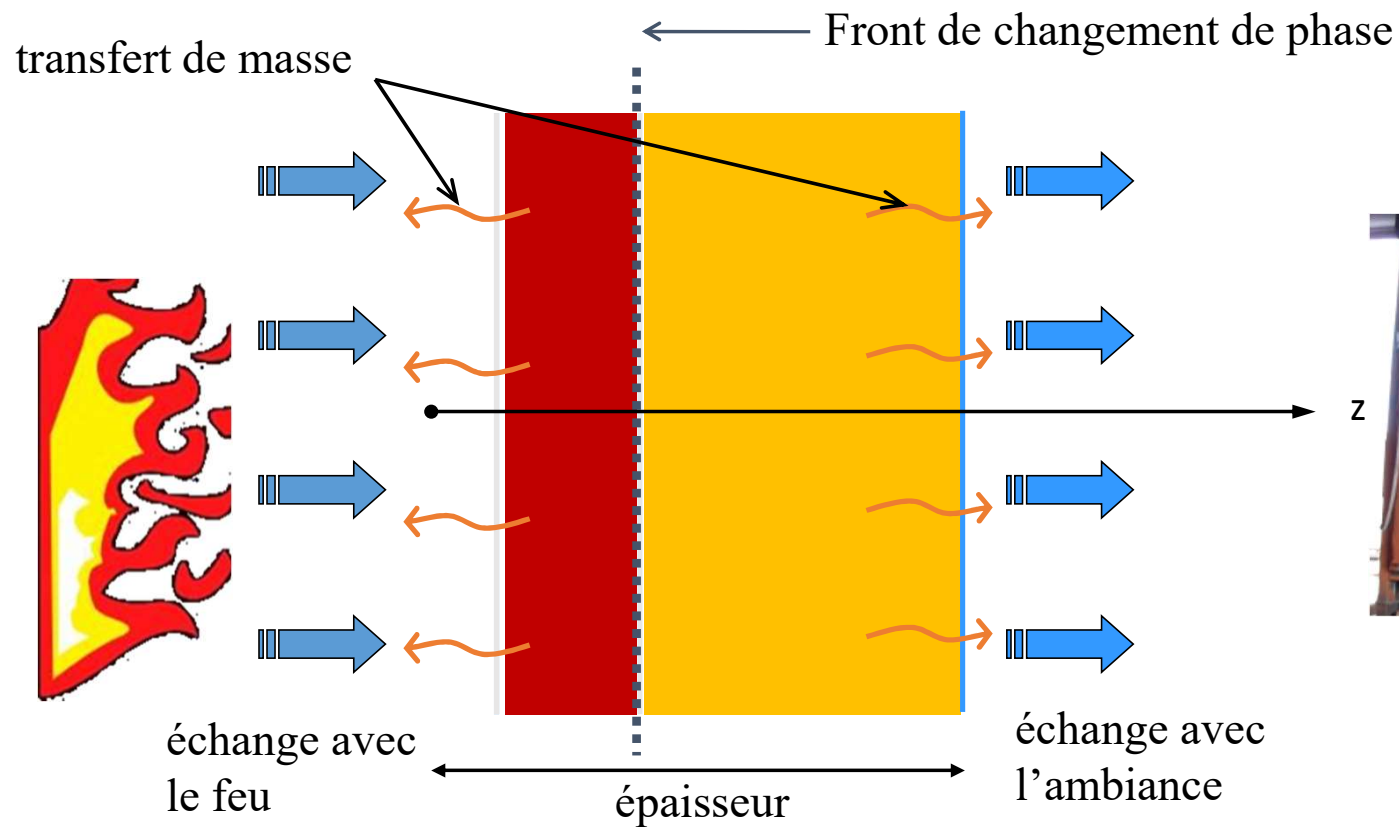
local expérimental pour incendie réel du CSTB (Lepir 2)

- deux niveaux
- façade en caissons bois, isolés avec des bottes de paille
 - EI 30 min ($T_{sup} < 180^{\circ} C$ pas de gaz de combustion à l'étage)
 - Applicable en ERP en R+2
 - Généralisation : mise en place d'un déflecteur métallique



Modélisation de la résistance au feu

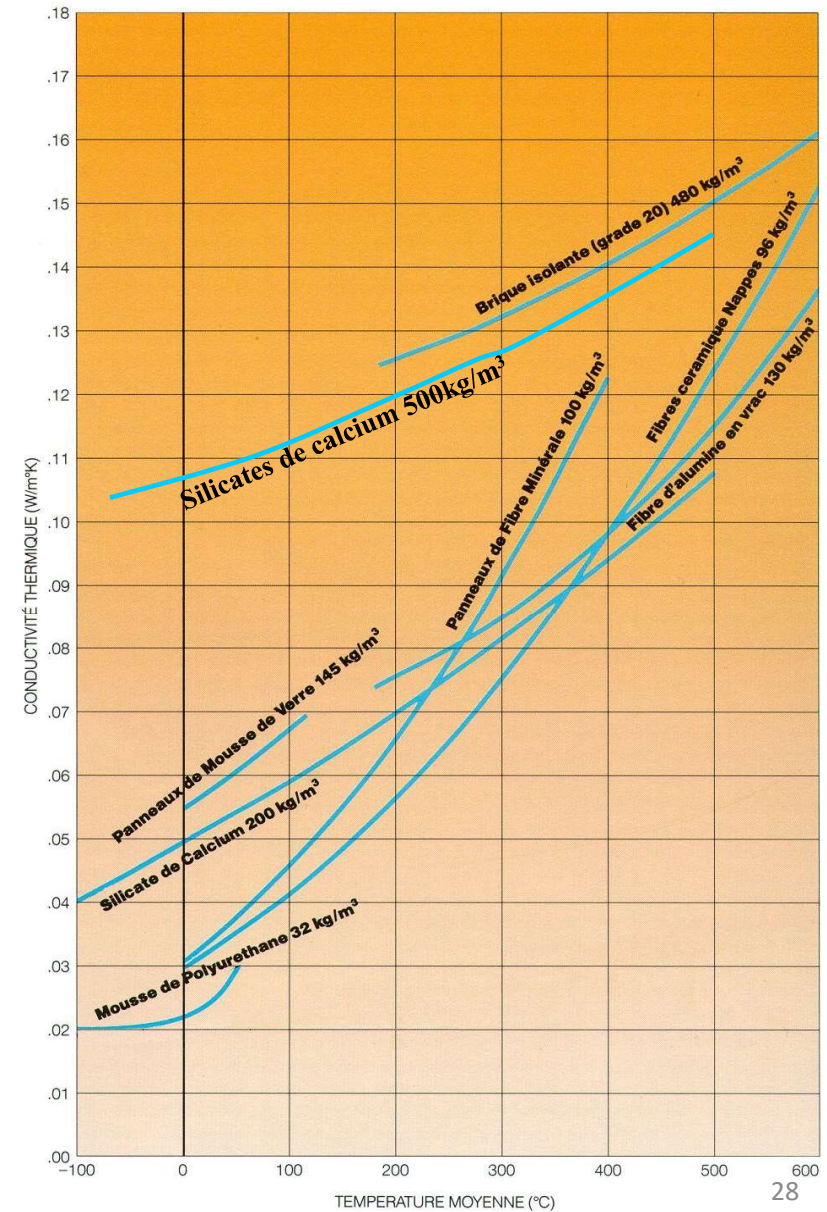
Transfert couplé : températures et masse au sein du matériau



Eau liquide arrivant par les fissures

● Remarque : forte dépendance des paramètres de transfert avec T

- Conductivité thermique
- Chaleur massique
- Masse volumique
- ...

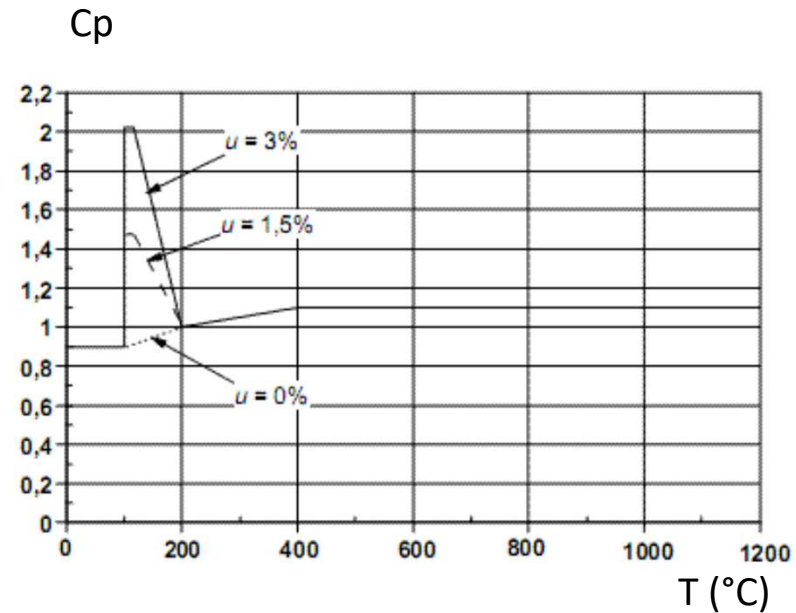
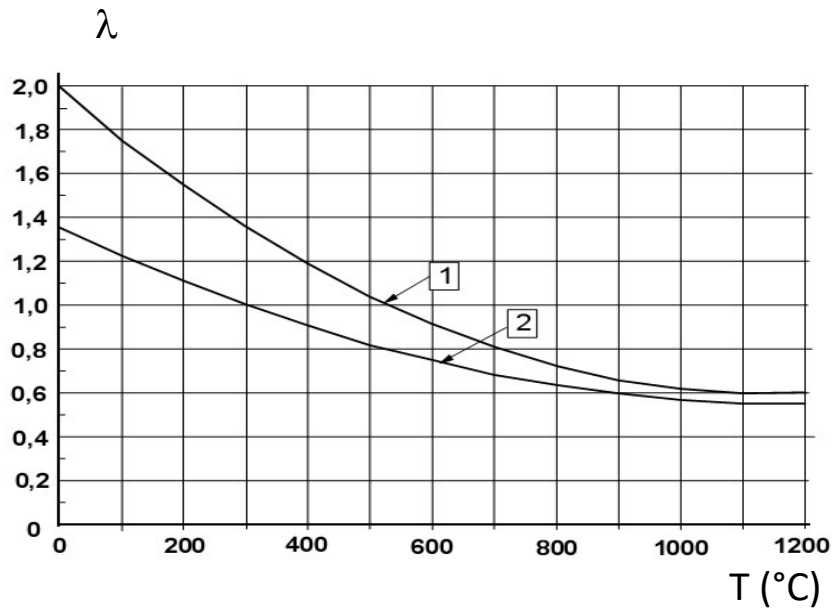


● Prise en compte des changements de phases

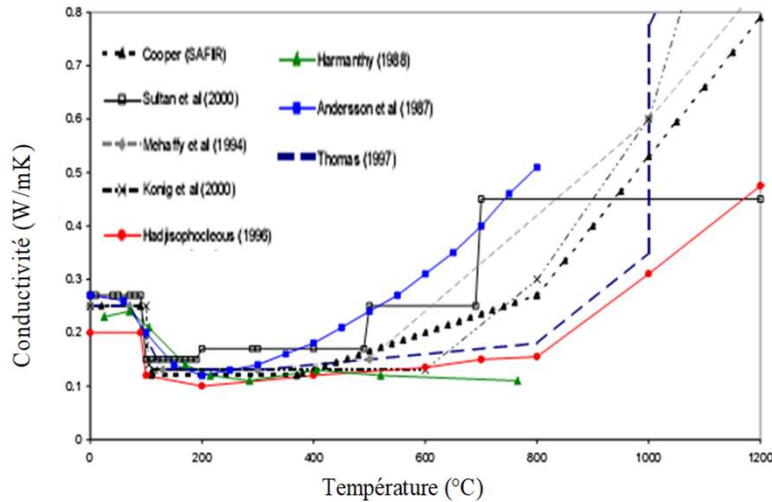
→ Méthode du Cp équivalent

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

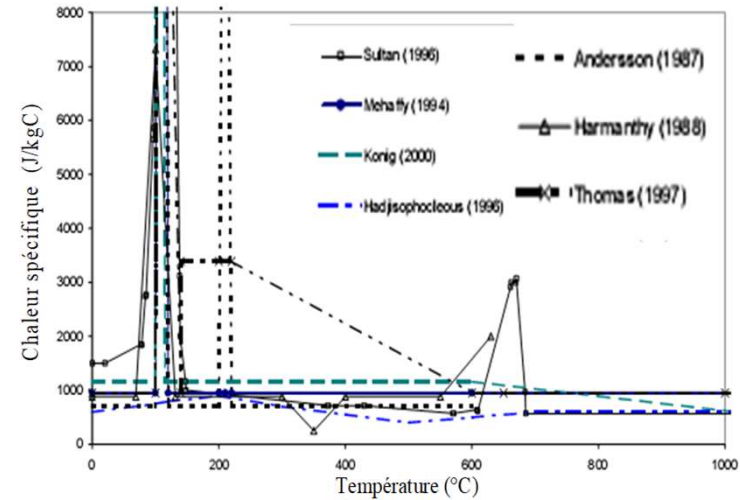
Cas du béton avec une teneur en eau limitée (0 à 3%)



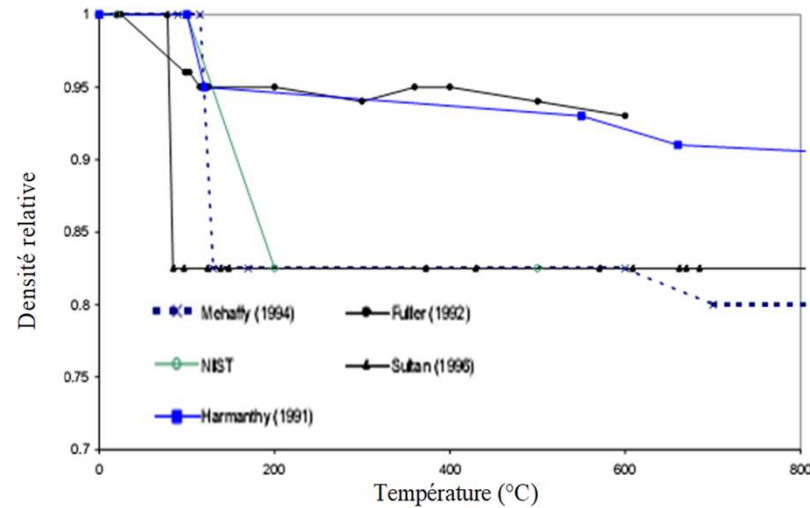
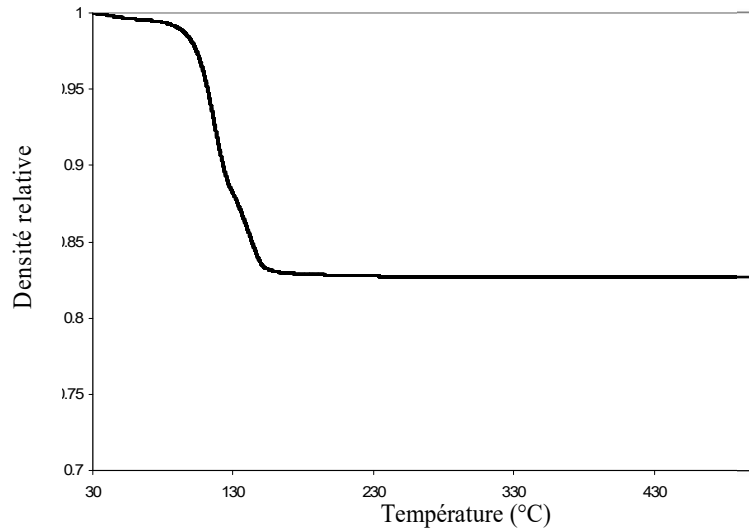
Cas du gypse traité selon l'approche du Cp équivalent (eau de cristallisation 20 %)



conductivité thermique du gypse en fonction de température



Variation de chaleur spécifique du gypse en fonction de température



Perte de masse du gypse caractérisé par les deux stades de la déshydratation du gypse

(Jones, 2001)

● Prise en compte des changements de phases

Méthode par cinétique de réaction

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \phi_g = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \phi_g = \rho \Delta H \frac{d\alpha}{dt}$$

- Matériaux à forte chaleur latente endothermique

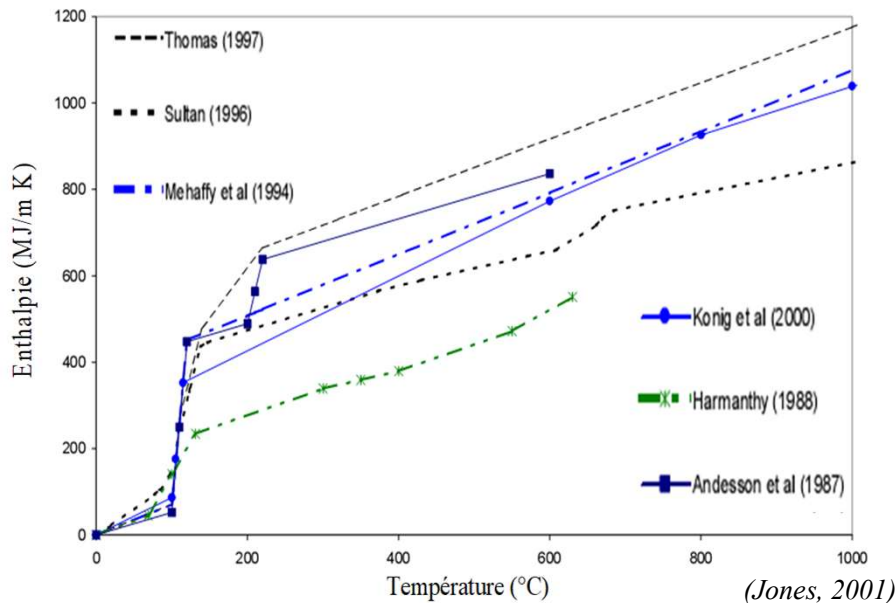
- (déshydratation ou décarbonatation)
- 200°C hydroxyde de magnésium
 - 400°C hydroxyde de calcium
 - 150°C gypse
 - 80°C composés à base de bore
 - 300°C hydrates d'aluminium
 - 900°C carbonate de calcium/magnésium
 - 600°C silicate de calcium hydratés

cinétique de réaction

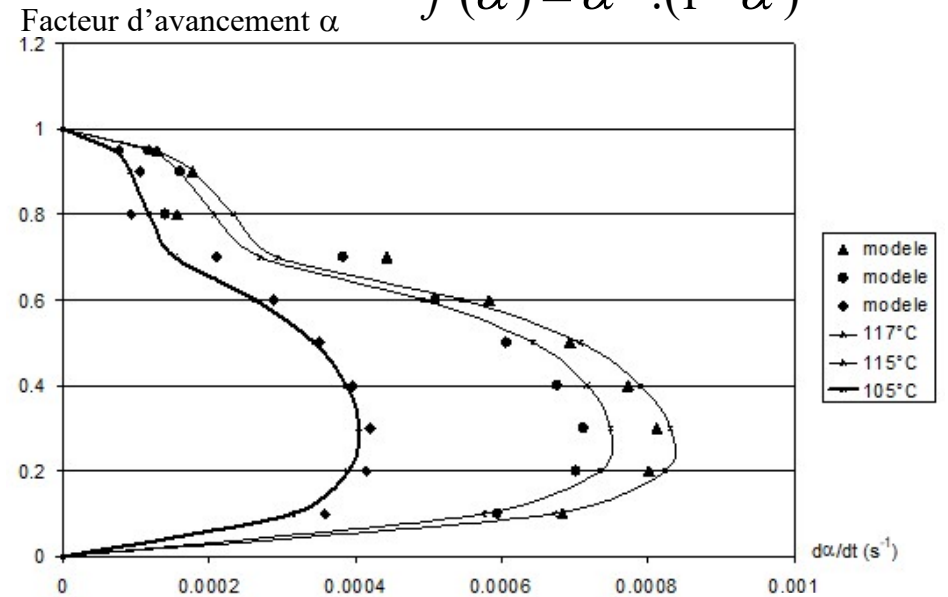
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = f(\alpha) \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R.T}\right)$$

→ Exemple du gypse

$$f(\alpha) = \alpha^m \cdot (1-\alpha)^n$$



Variation d'enthalpie du gypse en fonction de température (Jones, 2001)



Ajustement du modèle sur la cinétique de perte d'eau du gypse (Nguyen, 2009)

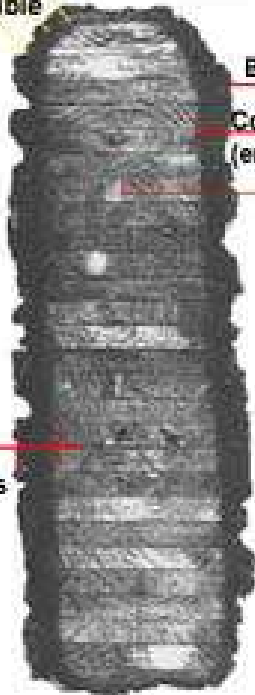
Dégradation par combustion

- Vitesse de combustion : cas du bois

- 1- Evaporation
- 2- CO₂ incombustible
CO combustible



Élément boisé boulonné

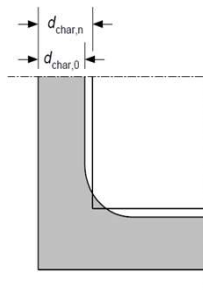


Bois carbonisé
Couche pyrolysée (environ 6 mm)
Bois non affecté par le feu (section efficace)

Couche de charbon de bois (conductivité thermique 1/8° du bois massif)

Vitesse de combustion	β_n mm/min	β_0 mm/min
Bois résineux et hêtre :		
Massif dont $290 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k$	0,80	0,65
BLC dont $290 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k$	0,70	0,65
Bois feuillu (massif ou BLC)		
$290 \leq \rho_k < 450 \text{ kg/m}^3$	0,70	0,65
$450 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k$	0,55	0,50
LVL		
$480 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_k$	0,70	0,65
Panneaux, $\rho_k = 450 \text{ kg/m}^3$, ép. $\geq 20 \text{ mm}$		
Panneautage bois		0,9
Contreplaqué		1,0
Panneaux à base de bois autres que contreplaqué		
		0,9

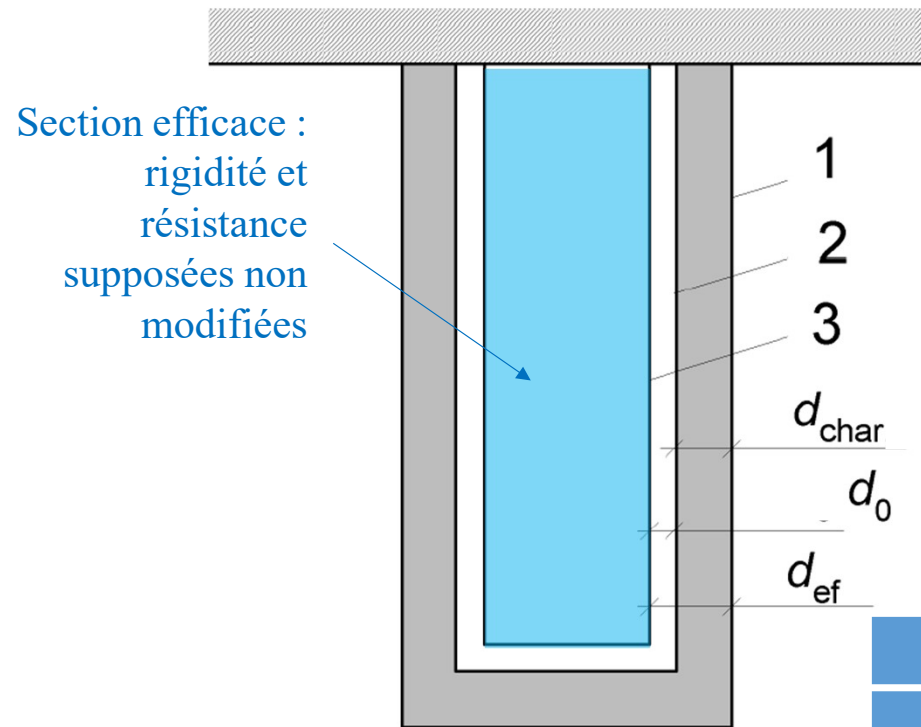
β vitesse de combustion fictive



β_0 , vitesse de combustion uni-directionnelle

β_n , prise en compte des effets des arrondis en coin et des fentes

● Principe de dimensionnement d'une section de bois partiellement brûlée



- 1 – Surface initiale de l'élément
- 2 – Limite de la section résiduelle
- 3 – Limite de la section efficace ($T < 300^{\circ}\text{C}$)

d_{ef} = profondeur de carbonisation efficace

d_{char} = profondeur de carbonisation fictive

d_o = couche de rigidité et résistance supposées nulles

La face exposée au feu travaille en	Traction	Compression
REI ≤ 30	$d_o = 10 \text{ mm}$	$d_o = 20 \text{ mm}$
REI > 30	$d_o = 20 \text{ mm}$	$d_o = 30 \text{ mm}$

t_{req} temps de résistance au feu requis

$$d_{char} = \beta \times t_{req}$$

$$d_{ef} = d_{char} + d_o$$

Interposition d'un écran devant le matériau combustible

- méthode pour le bois

$$d_{\text{char}} = \beta \times t_{\text{req}} \quad t_{\text{req}} \text{ temps de résistance au feu requis}$$

β vitesse de combustion fictive dépend du temps : position de t_{req} par rapport à t_{ch} , t_f et t_a

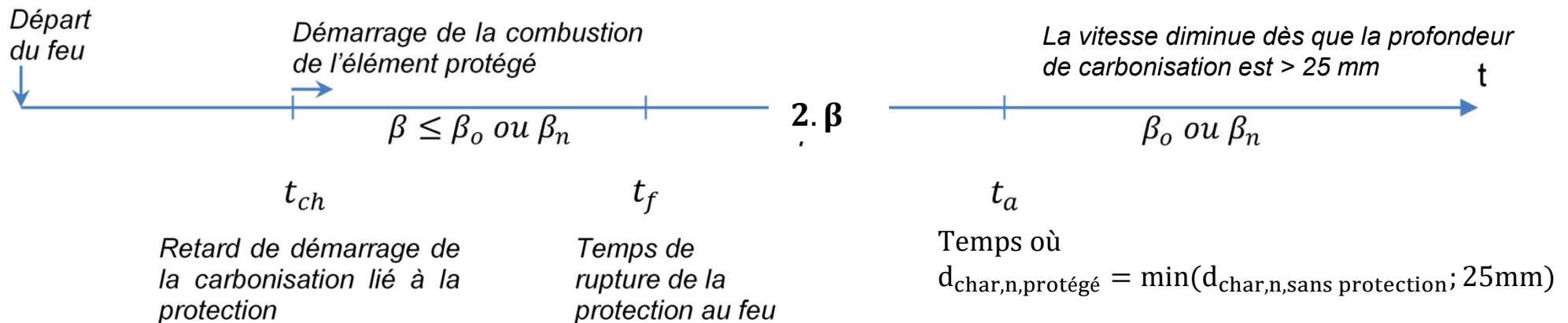
t_{ch} = retard de démarrage de la carbonisation, lié à la protection

t_f = temps de rupture des parements de protection au feu par :

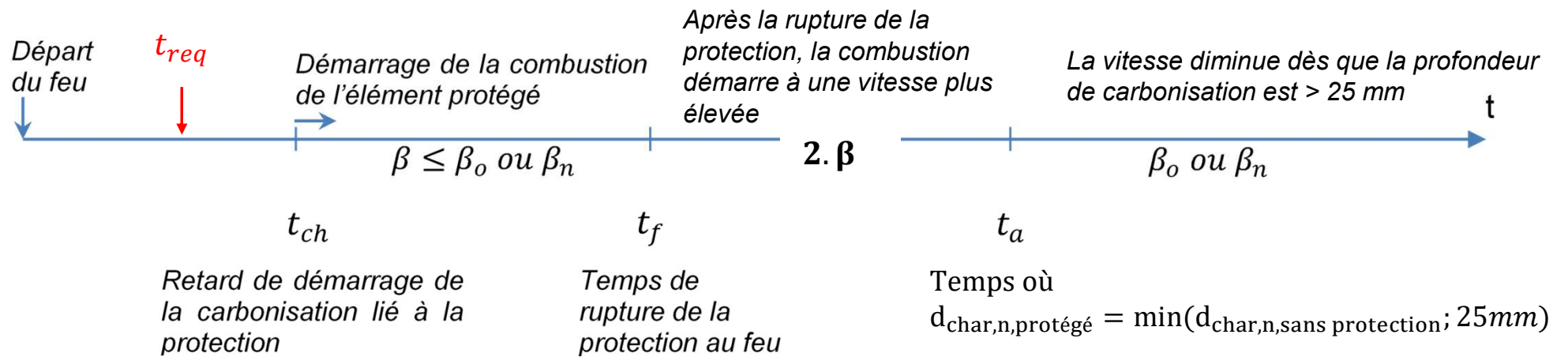
- carbonisation du parement
- dégradation mécanique du parement

t_a = temps où la profondeur de carbonisation est égale au minimum de :

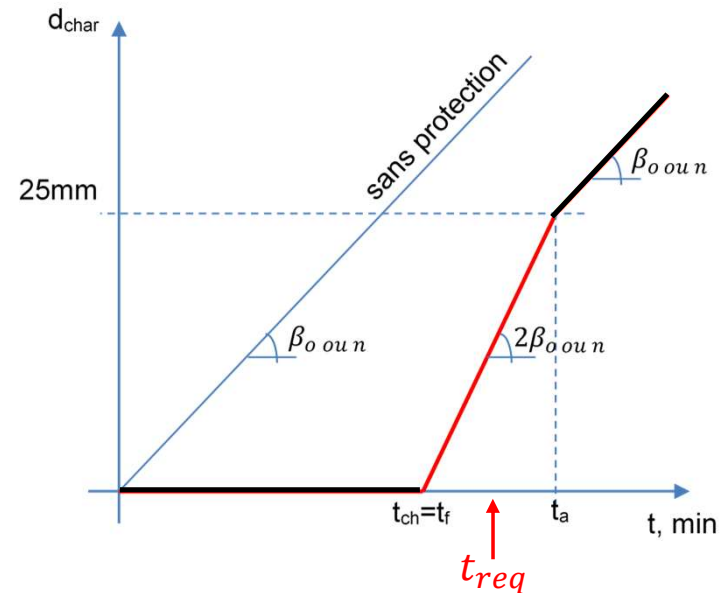
- la profondeur de carbonisation d'un élément identique sans protection au feu
- 25 mm



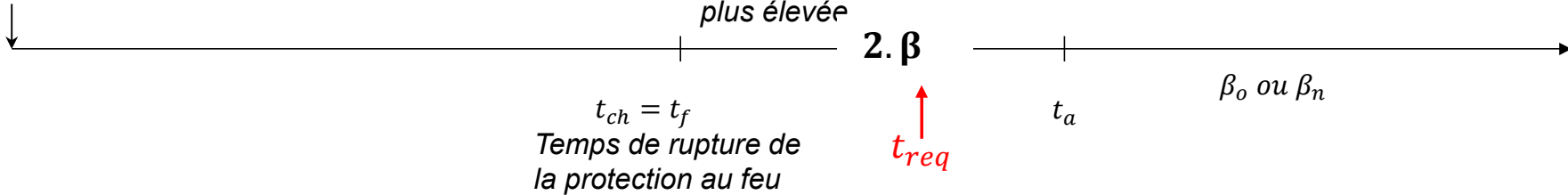
- Si $t_{req} \leq t_{ch}$ → alors $d_{char} = 0$ → La protection joue son rôle et l'élément protégé n'est pas endommagé



- si $t_{ch} = t_f$ avec $t_a = \min\left(2 \cdot t_f; \frac{12,5}{\beta_o \text{ ou } n} + t_f\right)$
 si $t_{req} \leq t_a$ alors $d_{char} = 2 \cdot \beta_o \text{ ou } n \cdot (t_{req} - t_f)$



Départ
du feu



Après la rupture de la protection, la combustion démarre à une vitesse plus élevée

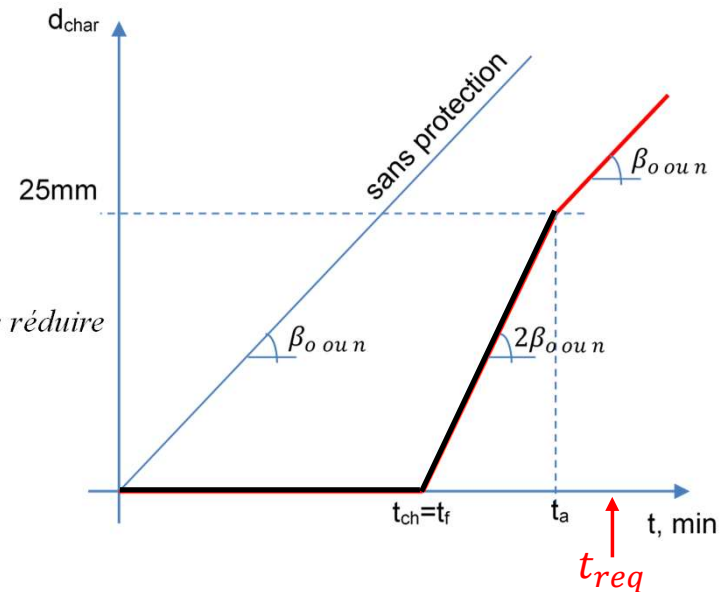
La vitesse diminue dès que la profondeur de carbonisation est > 25 mm

● si $t_{ch} = t_f$ avec $t_a = \min\left(2 \cdot t_f; \frac{12,5}{\beta_o \text{ ou } n} + t_f\right)$

si $t_a \leq t_{req}$

alors $d_{char} = 2 \cdot \beta_o \text{ ou } n \cdot (t_a - t_f) + \beta_o \text{ ou } n \cdot (t_{req} - t_a)$

une couche de carbonisation de 25 mm donne une protection suffisante permettant de réduire la vitesse de combustion



Départ du feu

Après la rupture de la protection, la combustion démarre à une vitesse plus élevée

La vitesse diminue dès que la profondeur de carbonisation est $> 25\text{ mm}$

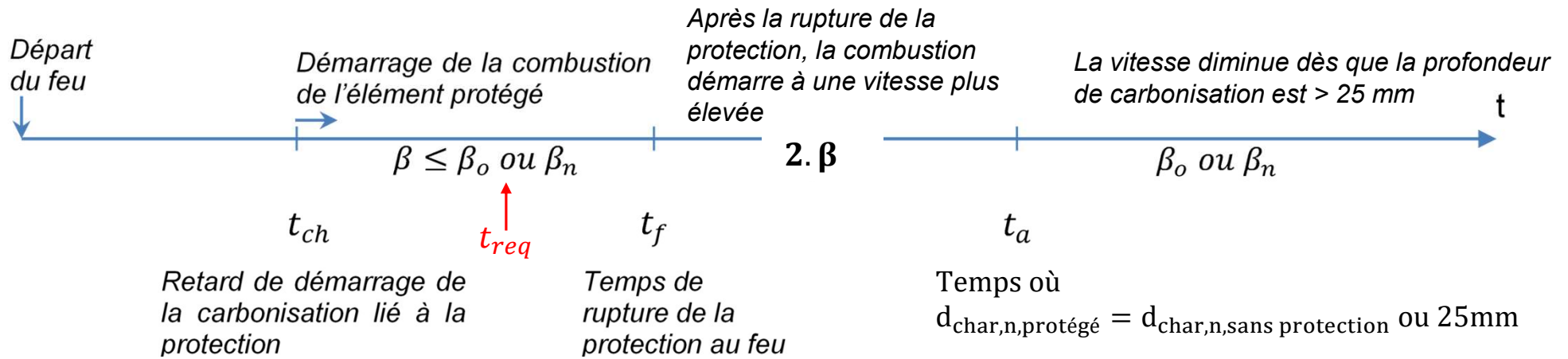
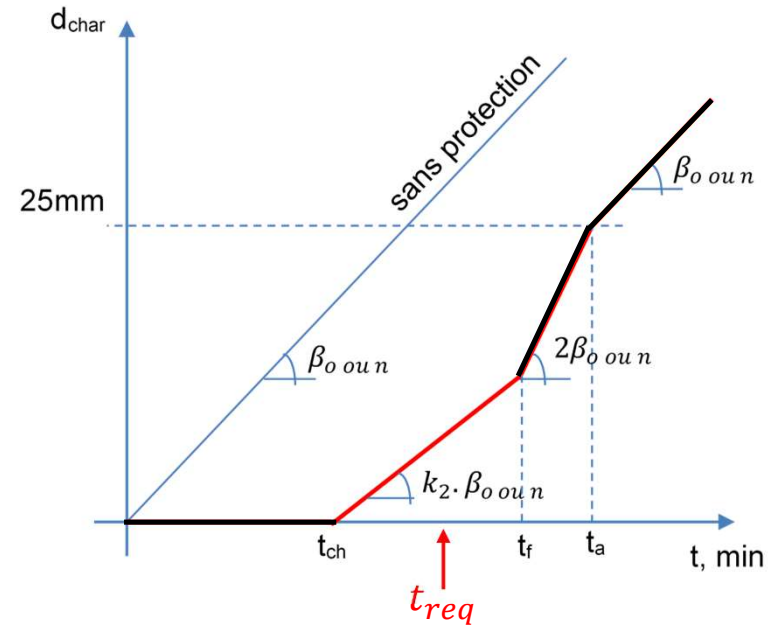
$2 \cdot \beta$

$t_{ch} = t_f$
Temps de rupture de la protection au feu

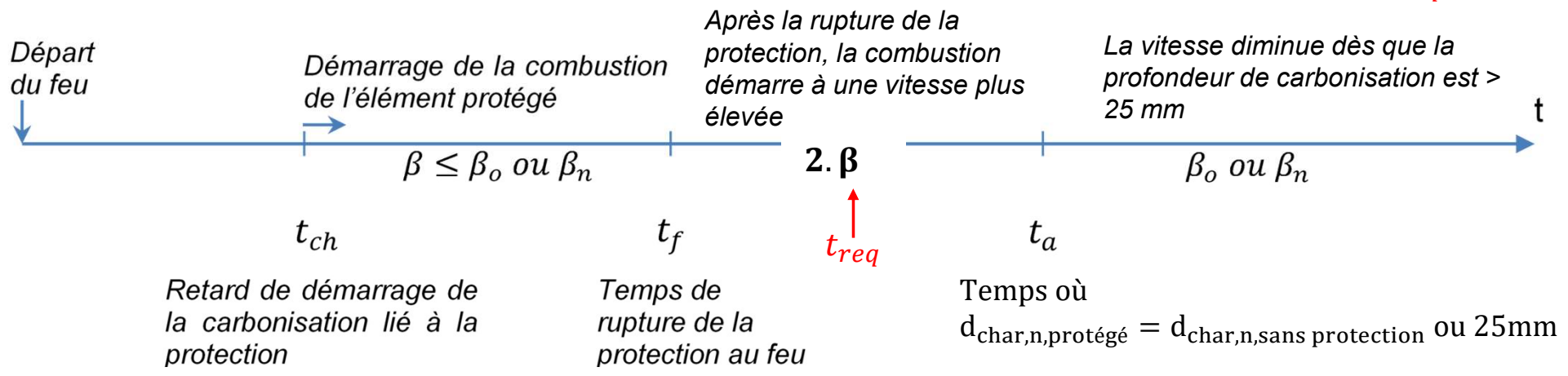
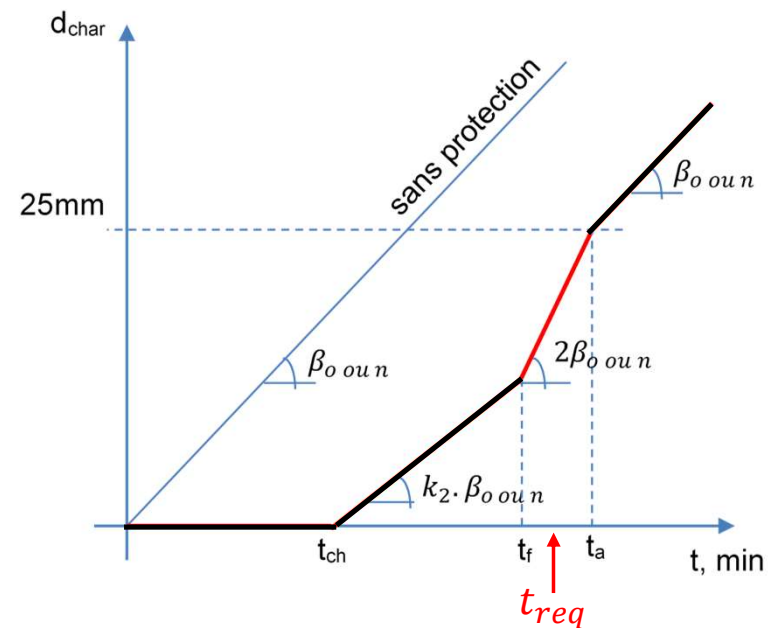
t_a

$\beta_o \text{ ou } \beta_n$
 t_{req}

- si $t_{ch} \leq t_f$ avec $t_a = \frac{12,5}{\beta_o \text{ ou } n} - \frac{k_2}{2} \cdot (t_f - t_{ch}) + t_f$
 si $t_{ch} \leq t_{req} \leq t_f$
 alors $d_{char} = \beta_o \text{ ou } n \cdot k_2 \cdot (t_{req} - t_{ch})$



- si $t_{ch} \leq t_f$ avec $t_a = \frac{12,5}{\beta_o \text{ ou } n} - \frac{k_2}{2} \cdot (t_f - t_{ch}) + t_f$
 si $t_f \leq t_{req} \leq t_a$
 alors $d_{char} = \beta_o \text{ ou } n \cdot k_2 \cdot (t_f - t_{ch}) + 2 \cdot \beta_o \text{ ou } n \cdot (t_{req} - t_f)$

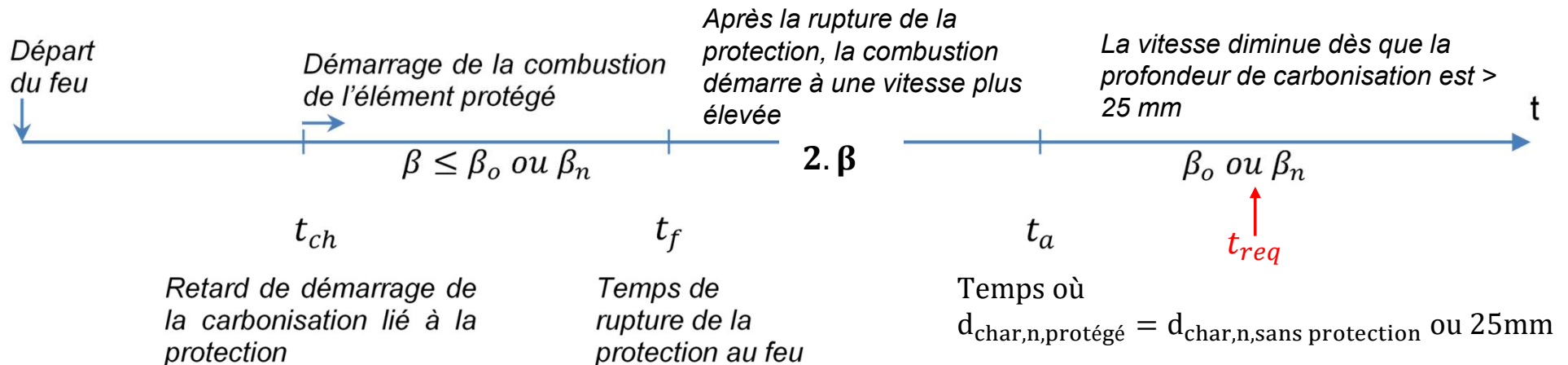
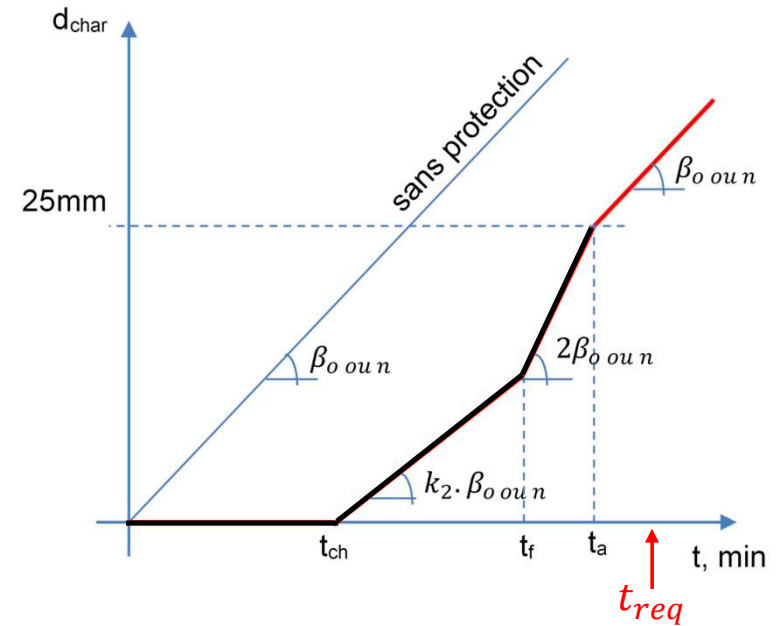


● si $t_{ch} \leq t_f$ avec $t_a = \frac{12,5}{\beta_o \text{ ou } n} - \frac{k_2}{2} \cdot (t_f - t_{ch}) + t_f$

si $t_a \leq t_{req}$:

alors

$$d_{char} = \beta_o \text{ ou } n \cdot k_2 \cdot (t_f - t_{ch}) + 2 \cdot \beta_o \text{ ou } n \cdot (t_a - t_f) + (\beta_o \text{ ou } n) \cdot (t_{req} - t_a)$$

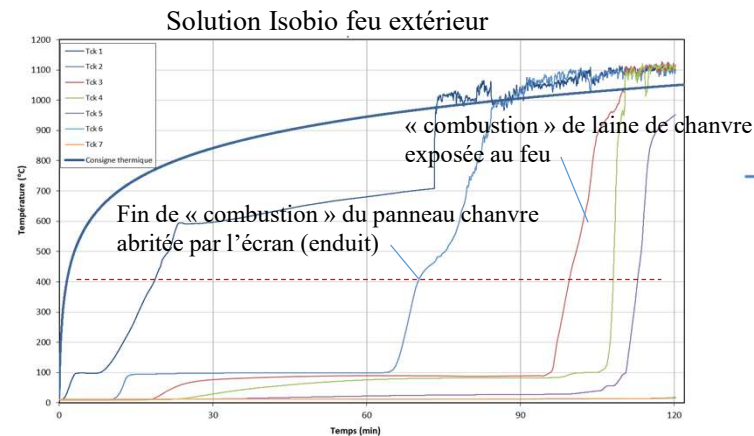
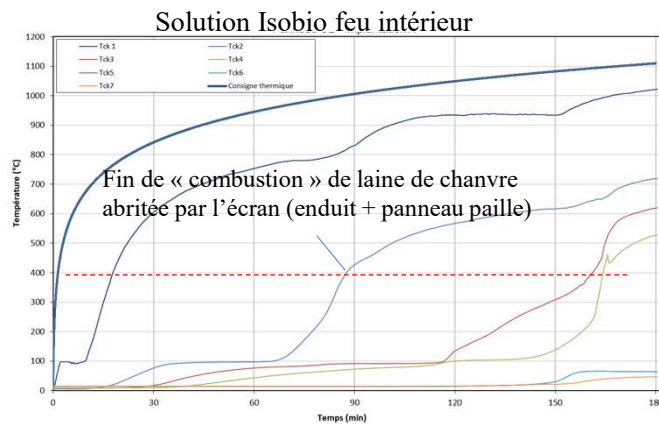
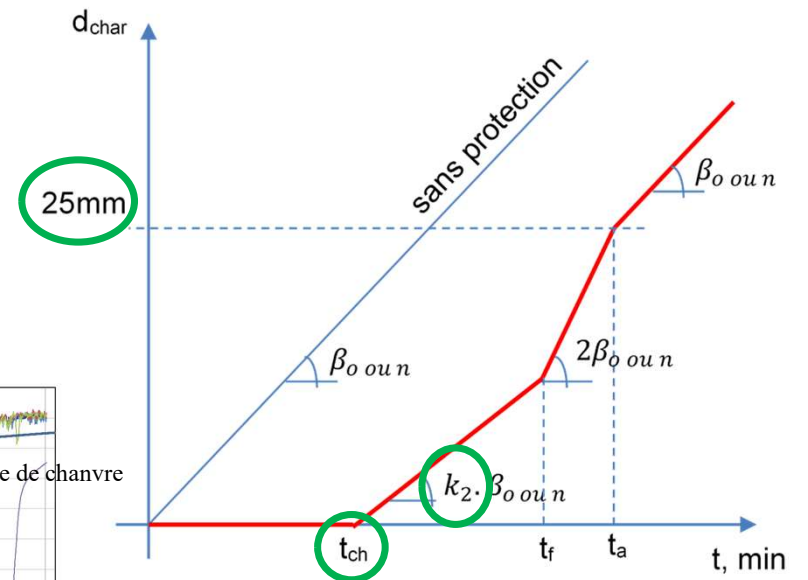


● Intérêt de la méthode de calcul en présence d'un écran et généralisations possibles

→ Possibilité de déterminer une résistance au feu (degré R) dans le cas du bois (protégé ou non)

→ Autre biosourcés sans rôle structurel :

- Il convient d'identifier des valeurs de vitesses de combustion adaptées (β)
- L'objectif serait de définir une durée de combustion pour évaluer le degré EI
- Le rôle de l'écran est bien pris en compte:
 - t_{ch} : retard de la combustion par l'écran
 - k_2 : ralentissement de combustion par l'écran
→ Valeur à identifier en fonction de l'écran
 - revoir la limite de 25 mm
- La relation (t,T) au sein de l'écran reste à évaluer pour définir t_{ch}
(approche par cinétique de réaction /combustion...)



Eléments de bibliographie

- Lanos C. : Bio-aggregate based building materials exposed to fire. Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM, 23, Springer Netherlands, pp.149--165, 2017. (10.1007/978-94-024-1031-0_7).
- CERIB Appréciation de laboratoire n° 020007B: RESISTANCE AU FEU d'un mur non porteur en béton de chanvre avec ossature bois, 16/06/2020.
- CEBTP Grelat, A.; Using sustainable materials as walling for in-dividual housing with wood structure -Final report extracts Volume 2 – Laboratory experiments, Site instrumentation, Update - Convention CEBTP ADEME-ITFFB; July 2004.
- CSTB BCB Rapport d'essais RS05-048 Résistance au feu d'un élément de construction: cloison en chanvribloc avec enduit, 2005.
- CSTB Association Bois et Construction Rapport d'essais 26021044 Comportement au feu d'un élément de façade, 2009.
- Institut für Baustoffe Massivbau und brandschutz TU Braunschweig, Allgemeines bauaufsichtliches prüfzeugnis P-3048/817/08-MPA BS, December 2014.
- Intertek Testing Service; Fire Tests of Building Construction and Materials 2hr fire resistance test of a non loadbearing wheat straw ball wall for Ecological Building Network Project No. 3098054A; July 31, 2006 Revised: July 9, 2007.
- Pavus a.s.; Protokol o zkousce pozarni odolnosti Pr-11-2.097, Nosná stěna z balíků slámy, september 2011.
- ISO 834. Fire-resistance tests -- Elements of building construction (amd 1-2012).
- NF EN 1363-1. Essais de résistance au feu, Partie 1 : exigences générales (march 2013).
- NF EN 1364-1, Essais de résistance au feu des éléments porteurs – Partie 1 : Murs (janvier 2015).
- Dalmaïs M., Colson V., Le Cunff T., Jadeau O., Lanos C. : Behaviour of bio-based material in multilayer wall during fire test, ICBBM 2019, 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, Edited by Mohammed Sonebi and Sofiane Amziane, Associate editor : Jonathan Page, e-ISBN : 978-2-35158-229-9. AJCE vol 37(2) 2019 ISSN 2680-1000.
- NF EN 1995-1-2/NA Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : Généralités - Calcul des structures au feu (Novembre 2022)
- Jones B.H., « Performance of gypsum plasterboard assemblies exposed to real building fires », Thesis Master University Canterbury, New Zealand, pp. 27-57, 2001.
- Nguyen K.S., Baux C., Mélinge Y., Lanos C. “Simulation numérique du transfert thermique à travers des matériaux minéraux”. *Annales BTP N°5*, oct. 2007, pp.37-43.
- Nguyen K.S. : « Comportement thermo-chimique de matériaux minéraux : application à la protection incendie ». Thèse de doctorat de l'INSA de Rennes, 2009.
- COST Action FP1404 COST Action, Final Achievement Report (05/12/2014 to 04/12/2018) Fire Safe Use of Bio-based Building Products WG2/TG4 Claddings.