

FRANK KUPFERLE

Mob +33(0) 674 35 35 59

Email frank.kupferle@c4ci.eu

PLANCHER MIXTE BOIS-BETON EN SITUATION D'INCENDIE : COMPORTEMENT DES CONNECTEURS DE TYPE TIGE

Rapport final

Financé par :

CODIFAB

Développement des Industries Françaises
de l'Ameublement et du Bois

| | | | |
|-----------|---------|---------|------------|
| CLIENT | CODIFAB | DATE | 31/08/2022 |
| PROJET N° | 1905 | VERSION | REV2 |

TABLE DES MATIERES

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 6 |
| 1.1 | Contexte général | 6 |
| 1.2 | Synthèse des conclusions de l'étude précédente | 7 |
| 1.3 | Objectif de l'étude..... | 7 |
| 1.4 | Approche méthodologique | 8 |
| 2 | PRINCIPE DE L'ESSAI ET CONFIGURATIONS RETENUES | 9 |
| 2.1 | Principe de l'essai..... | 9 |
| 2.2 | Critères de choix des configurations..... | 9 |
| 2.2.1 | CONFIGURATION DE L'ASSEMBLAGE | 9 |
| 2.2.2 | CONFIGURATION DU COFFRAGE PERDU VIS-À-VIS DE L'ASSEMBLAGE..... | 10 |
| 2.2.3 | ORGANES D'ASSEMBLAGE | 12 |
| 2.2.4 | NERVURES BOIS..... | 12 |
| 2.2.5 | DALLE DE COMPRESSION BÉTON | 13 |
| 2.2.6 | AUTRES PARAMÈTRES..... | 13 |
| 2.3 | Configurations retenues..... | 14 |
| 2.4 | Détermination de la section de bois | 15 |
| 2.5 | Détermination de l'entraxe des vis | 16 |
| 2.5.1 | ESPACEMENT LONGITUDINAL..... | 16 |
| 2.5.2 | ESPACEMENT TRANSVERSAL..... | 16 |
| 2.5.3 | DISTANCES MINIMALES AU BORD..... | 16 |
| 2.6 | Détermination de la portée maximale théorique des poutres..... | 17 |
| 2.6.1 | HYPOTHÈSES | 17 |
| 2.6.2 | DIMENSIONNEMENT | 17 |
| 2.6.3 | PORTÉES MAXIMALES THÉORIQUES | 18 |
| 2.7 | Efforts de chargement équivalent pour les essais..... | 19 |
| 2.7.1 | APPROCHE INITIALE ET ÉVOLUTION..... | 19 |
| 2.7.2 | PRINCIPE DE L'APPROCHE INITIALE..... | 20 |
| 2.7.3 | APPLICATION NUMÉRIQUE..... | 20 |
| 2.7.4 | CHARGES ÉQUIVALENTES SELON LE CALCUL EN SITUATION D'ESSAI..... | 21 |
| 2.7.5 | CHARGES DES ESSAIS EFFECTIVEMENT APPLIQUÉES ET CALCULS CORRESPONDANTS | 23 |
| 2.8 | Instrumentation de l'essai | 24 |
| 2.9 | Préparation des corps d'épreuve | 26 |
| 2.10 | Dispositif de l'essai sur le four | 29 |
| 3 | OBSERVATIONS ET ANALYSE DES RÉSULTATS DES ESSAIS | 30 |
| 3.1 | Observations lors des essais..... | 30 |
| 3.1.1 | POUTRE GL01 | 30 |
| 3.1.2 | POUTRE GL02 | 33 |
| 3.1.3 | POUTRE GL03 | 35 |
| 3.1.4 | POUTRE GL04 | 37 |
| 3.1.5 | SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS..... | 40 |
| 4 | ANALYSE DES MESURES ET RÉSULTATS | 41 |
| 4.1.1 | ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE AU DROIT DES VIS..... | 41 |
| 4.1.2 | ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS LE BÉTON | 42 |
| 4.1.3 | VITESSE DE COMBUSTION DU PANNEAU | 44 |
| 4.1.4 | ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS LE BOIS | 46 |
| 4.1.5 | APPLICATION DE LA MÉTHODE FIT AUX VIS À 45° | 49 |
| 4.1.6 | APPLICATION DES MÉTHODES DE CALCUL AUX VIS À 90° | 51 |
| 5 | SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS | 54 |
| 5.1 | Rappel des objectifs | 54 |

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

| | | |
|----------|--|----|
| 5.2 | Synthèse des essais et enseignements clés | 54 |
| 5.3 | Application de la méthode FIT aux vis (conformes à l'EN 14592 ou sous ETE) | 55 |
| 5.4 | Vitesse de combustion des panneaux à base de bois sur substrat béton | 56 |
| 5.5 | Conclusions et perspectives..... | 56 |
| ANNEXE A | COURBES D'ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE AU COURS DE L'ESSAI..... | 58 |
| A.1 | Evolution de la température au droit des vis | 59 |
| A.2 | Evolution de la température dans le béton | 62 |
| A.3 | Evolution de la température dans le bois..... | 65 |
| ANNEXE B | RAPPORTS D'ESSAIS DU CSTB | 70 |

LITE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Principe initial de l'essai simultané des 4 poutres | 9 |
| Figure 2 : Arrangement longitudinal des vis – Cas des vis à 90° | 10 |
| Figure 3 : Arrangement longitudinal des vis – Cas des vis à 45° | 10 |
| Figure 4 : Section de plancher mixte bois-béton – 2 rangées de vis – Cas du panneau filant au-dessus de la poutre | 11 |
| Figure 5 : Section de plancher mixte bois-béton – 2 rangées de vis – Cas du béton au contact de la poutre | 11 |
| Figure 6 : Instrumentation de l'essai – Principe de positionnement des deux nappes de thermocouples | 24 |
| Figure 7 : Instrumentation de l'essai – Poutre GL01 | 24 |
| Figure 8 : Instrumentation de l'essai – Poutre GL02 | 25 |
| Figure 9 : Instrumentation de l'essai – Poutre GL03 | 25 |
| Figure 10 : Instrumentation de l'essai – Poutre GL04 | 25 |
| Figure 11 : Préparation des corps d'épreuve – Poutre et panneau de coffrage | 26 |
| Figure 12 : Préparation des corps d'épreuve – Film PE, vis, instrumentation, treillis soudé, coffrage de la dalle | 26 |
| Figure 13 : Préparation des corps d'épreuve – Coulage de la dalle béton et levage | 27 |
| Figure 14 : Préparation des corps d'épreuve – Mise en place sur le four et mise ne place du système de chargement | 27 |
| Figure 15 : Préparation des corps d'épreuve – Vues des panneaux et vis (GL02, GL03 et GL04) | 28 |
| Figure 16 : Préparation des corps d'épreuve – Vue des vis à 45° avec panneau interrompu (GL03 et GL04) | 28 |
| Figure 17 : Dispositif de l'essai sur le four – Instrumentation – Application de la charge | 29 |
| Figure 18 : Essai GL01 – Vue à $t_{fi} = 17$ minutes | 30 |
| Figure 19 : Essai GL01 – Vues à $t_{fi} = 33$ et 36 minutes | 31 |
| Figure 20 : Essai GL01 – Vues après retrait et arrosage de la maquette | 31 |
| Figure 21 : Essai GL01 – Vue des extrémités de la poutre bois après retrait et arrosage | 32 |
| Figure 22 : Essai GL02 – Vues à $t_{fi} = 35$ et 41 minutes | 33 |
| Figure 23 : Essai GL02 – Vues à $t_{fi} = 43$ minutes | 33 |
| Figure 24 : Essai GL02 – Vues à $t_{fi} = 52$ minutes | 34 |
| Figure 25 : Essai GL02 – Vues après retrait et arrosage de la maquette | 34 |
| Figure 26 : Essai GL03 – Vue à $t_{fi} = 3$ minutes | 35 |
| Figure 27 : Essai GL03 – Vues à $t_{fi} = 25$ et 38 minutes | 36 |
| Figure 28 : Essai GL03 – Vues après retrait et arrosage de la maquette | 36 |
| Figure 29 : Essai GL04 – Vues à $t_{fi} = 19$ et 32 minutes | 37 |
| Figure 30 : Essai GL04 – Vues à $t_{fi} = 34$ et 48 minutes | 38 |
| Figure 31 : Essai GL04 – Vue à $t_{fi} = 45$ minutes | 38 |
| Figure 32 : Essai GL04 – Vues au retrait de la maquette | 39 |
| Figure 33 : Essai GL04 – Vues après arrosage de la maquette et retrait du bois carbonisé | 39 |
| Figure 34 : Evolution de la température au droit des vis | 42 |
| Figure 35 : Evolution de la température dans le béton | 43 |
| Figure 36 : Evolution de la température dans le bois – Thermocouples communs aux poutres GL01 à GL04 | 47 |
| Figure 37 : Evolution de la température dans le bois – Thermocouples spécifiques aux poutres GL02 à GL04 | 48 |
| Figure 38 : Evolution de la température dans le bois – Thermocouples au droit de l'angle poutre-panneau | 48 |
| Figure 39 : Courbes de déformation (calcul et essai) – Poutres GL03 et GL04 | 50 |
| Figure 40 : Courbes de déformation (calcul et essai) – Poutres GL01 et GL02 | 53 |
| Figure 41 : Evolution de la température au droit des vis – dans le bois sous la pointe $(x, y) = (50, 100)$ mm | 59 |
| Figure 42 : Evolution de la température au droit des vis – à mi-hauteur de la vis dans le bois côté extérieur (GL01 et GL03) | 59 |
| Figure 43 : Evolution de la température au droit des vis – à l'interface bois-béton côté extérieur | 60 |
| Figure 44 : Evolution de la température au droit des vis – à l'interface bois-béton entre les 2 rangées de vis (GL02 et GL04) | 60 |
| Figure 45 : Evolution de la température au droit des vis – à mi-hauteur de la vis dans le béton | 61 |
| Figure 46 : Evolution de la température au droit des vis – en tête de vis dans le béton | 61 |
| Figure 47 : Evolution de la température dans le béton – à 0 mm (interface avec le panneau de coffrage) | 62 |
| Figure 48 : Evolution de la température dans le béton – à 15 mm (mi-hauteur d'enrobage du treillis soudé) | 62 |
| Figure 49 : Evolution de la température dans le béton – à 30 mm (au droit du treillis soudé) | 63 |
| Figure 50 : Evolution de la température dans le béton – à 40 mm (mi-hauteur de la dalle) | 63 |
| Figure 51 : Evolution de la température dans le béton – à 80 mm (face non exposée) | 64 |
| Figure 52 : Evolution de la température dans le bois – $(x, y) = (10, 20)$ mm | 65 |
| Figure 53 : Evolution de la température dans le bois – $(x, y) = (20, 40)$ mm | 65 |
| Figure 54 : Evolution de la température dans le bois – $(x, y) = (30, 60)$ mm | 66 |
| Figure 55 : Evolution de la température dans le bois – $(x, y) = (40, 80)$ mm | 66 |
| Figure 56 : Evolution de la température dans le bois – $(x, y) = (50, 100)$ mm sous la pointe des vis | 67 |
| Figure 57 : Evolution de la température dans le bois – GL02 & GL04 entre rangées $(x, y) = (60, 120)$ mm | 67 |
| Figure 58 : Evolution de la température dans le bois – GL02 & GL04 entre rangées $(x, y) = (70, 140)$ mm | 68 |
| Figure 59 : Evolution de la température dans le bois – GL02 & GL04 à l'axe, entre rangées $(x, y) = (80, 160)$ mm | 68 |
| Figure 60 : Evolution de la température dans le bois – Thermocouple à l'angle entre le panneau et la poutre bois | 69 |

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Description détaillée des configurations de chaque corps d'épreuve | 14 |
| Tableau 2 : Définition de la largeur de section standard la plus proche du cas limite en situation d'incendie | 15 |
| Tableau 3 : Définition de la hauteur de section standard la plus proche du cas limite en situation d'incendie..... | 15 |
| Tableau 4 : Portées maximales théoriques et synthèse des résultats du dimensionnement | 18 |
| Tableau 5 : Charge totale vérin sous hypothèse COV 15% et portée d'essai de 3,20m pour une poutre | 21 |
| Tableau 6 : Calcul en situation d'incendie en conditions d'essai avec charges concentrées – Valeurs ELU assemblage décisif..... | 22 |
| Tableau 7 : Calcul en situation d'incendie en conditions d'essai avec charges concentrées – Valeurs effectivement appliquées . | 23 |
| Tableau 8 : Synthèse des observations lors des essais | 40 |
| Tableau 9 : Vitesse de combustion unidimensionnelle du panneau de coffrage observée lors des essais | 44 |
| Tableau 10 : Vitesse de combustion unidimensionnelle du panneau de coffrage proposée (mm/min) | 45 |
| Tableau 11 : Poutres G03 et GL04 – Application de la méthode FIT..... | 50 |
| Tableau 12 : Poutres G01 et GL02 – Application de la méthode FIT et du prEN 1995-1-2:2020-08..... | 52 |
| Tableau 13 : Synthèse des configurations testées et des durées observées..... | 54 |

REMERCIEMENTS

Le rédacteur des présentes souhaite remercier particulièrement :



L'entreprise MATHIS pour avoir accepté d'intégrer dans son plan de charge ce projet particulier pour fournir, préparer à façon et livrer l'ensemble des éléments bois nécessaires à la confection des corps d'épreuve, et de mettre gracieusement à disposition Pascal TOUSAIN pour le suivi et la coordination de cette préparation et Benjamin BLUM pour aider le rédacteur au montage des corps d'épreuve au laboratoire du CSTB.



L'entreprise SIMPSON STRONG-TIE, et notamment Pascal PETRAULT et Nicolas HONORE pour leur aide et avoir gracieusement fourni les vis utilisées pour les poutres GL01 et GL02.



L'entreprise SPAX, et notamment Micha HOCHSTRATE pour son aide et avoir gracieusement fourni les vis utilisées pour les poutres GL03 et GL04.

Il convient également de remercier Romuald AVENEL et l'ensemble de l'équipe du laboratoire de résistance au feu du CSTB qui nous a accompagné et accueilli pour la réalisation de ces essais au design quelque peu particulier.

Il convient enfin de remercier les membres du comité de pilotage pour leur disponibilité et leur patience.

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte général

Depuis près d'un demi-siècle, les planchers mixtes bois-béton se développent dans le paysage de la construction. Cette technique s'appuie sur la collaboration mécanique du béton et du bois, et les propriétés de chacun de ces matériaux étant utilisées de manière optimale. La dalle béton, sollicitée en compression, apporte une masse utile pour l'isolation phonique et l'inertie thermique. La structure bois, située en sous-face, est sollicitée en traction et apporte de la légèreté diminuant de ce fait les charges (descendantes, sismiques,...). Le plancher résultant est ainsi plus performant qu'un plancher bois classique et offre une alternative intéressante d'un point de vue environnemental au plancher béton.

Cette solution technique est habituellement destinée à des ouvrages relativement exceptionnels : ouvrages d'art, planchers de longue portée, établissements recevant du public ou encore en renforcement de planchers de monuments historiques.

On distingue parmi ces techniques :

- les **procédés ou systèmes dits « propriétaires »**, développés par des entreprises privées qui en détiennent les droits de propriété industrielle, et usuellement titulaires d'une évaluation technique pour une technique dite non courante (Avis Technique, Agrément Technique Européen, etc...) ;
- les **systèmes basés sur des composants dits « traditionnels » ou de technique courante**, c'est-à-dire ceux utilisant des porteurs bois de type « poutre » avec matériaux standards et connecteurs « du commerce » (vis, tirefonds...).

Cette dernière famille fait l'objet de Recommandations Professionnelles rédigées dans le cadre du programme RAGE 2012 (*Règles de l'Art du Grenelle de l'Environnement*) intitulées « *Mise en œuvre et isolation des planchers mixtes bois-béton* » [1] [2], dans la construction neuve et la rénovation, publiées en Mars 2015.

Les planchers mixtes bois-béton sont donc des solutions performantes pour la reprise de charges importantes, pour un encombrement minimal, et pour une résistance au feu accrue vis-à-vis d'un plancher bois classique.

Toutefois, cette résistance au feu n'est aujourd'hui justifiable de manière optimale que par le biais d'essais conventionnels par un laboratoire agréé en résistance au feu, la seule méthode calculatoire réglementairement validée supposant que les porteurs bois et la dalle béton sont déconnectés (cf. Recommandations Professionnelles RAGE « *Mise en œuvre et isolation des planchers mixtes bois-béton* » [1] [2]). On utilise donc très souvent des écrans de protection pour apporter le complément de résistance souhaité.

Or, un certain nombre de travaux dans le monde ont démontré un bon fonctionnement des connexions bois-béton en situation d'incendie, et une performance globale des planchers à même de satisfaire les exigences de résistance au feu en mobilisant l'ensemble des composants du plancher (porteurs bois avec carbonisation maîtrisée, dalle béton jouant le rôle d'écran...). Ces travaux incluant des essais ont pour certains été réalisés par des Universitaires et ont fait l'objet de publications.

Dans le contexte réglementaire en vigueur en France vis-à-vis du risque d'incendie, il est rappelé que l'Arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages admet comme méthode d'évaluation des performances de résistance au feu les seules approches suivantes (on se réfèrera au texte de l'Arrêté pour le vocable exact et les précisions afférentes) :

- un essai conventionnel dont le procès-verbal donne lieu à un domaine d'application directe, réalisé ou confirmé par un laboratoire agréé en résistance au feu ;
- une justification par le calcul selon une règle de dimensionnement acceptée – ici les Eurocodes – ou par référence à un procédé approuvé – par exemple un référentiel tel que les Règles Bois-Feu ;
- une appréciation de laboratoire réalisée par un laboratoire agréé en résistance au feu.

C'est dans ce contexte, que le CODIFAB avait confié à C4Ci entre 2016 et 2018 la réalisation d'une première étude visant à faire un état des lieux des méthodes existantes et des travaux de recherche existants ou en cours, afin d'en expliquer les mécanismes, et de les confronter à des configurations types de plancher mixte bois-béton, pour, enfin, déboucher sur une éventuelle proposition de méthode de dimensionnement aux Eurocodes de la résistance au feu des planchers mixtes bois-béton non propriétaires et/ou des recommandations d'actions complémentaires.

1.2 Synthèse des conclusions de l'étude précédente

Le projet CODIFAB « Dimensionnement des Planchers Mixtes Bois-Béton en Situation d'Incendie » a permis d'identifier deux méthodes analytiques susceptibles d'être portées à terme vers l'acceptation réglementaire :

- Une méthode pour les assemblages par organes métalliques de type tige vissés à 45° (mais dont la calibration est à priori faite sur un système propriétaire), publiée dans le guide « Fire Safety in Timber Buildings » (SP Trätekt, 2010), et référencée ci-après « méthode FIT ».
- Une méthode pour les assemblages par entaille renforcés par tire-fonds, basée sur la méthode de la section réduite de l'EN 1995-1-2.

La comparaison de ces méthodes analytiques avec les données d'essai permet d'envisager le dimensionnement avec un niveau de sécurité satisfaisant pour des durées de résistance allant jusqu'à 60 minutes, moyennant quelques vérifications ou prises en compte complémentaires, notamment la prise en compte de la réduction du module d'élasticité du béton en fonction du temps d'exposition pour approcher de manière plus satisfaisante la redistribution des efforts.

Toutefois, pour pouvoir aller à l'acceptation réglementaire, certains sujets nécessitent un approfondissement/complément, notamment :

1. Une étude complémentaire sur les connecteurs métalliques de type tige, afin de valider/ajuster la méthode développée sur un système propriétaire.
2. Un complément sur les modules de glissement des entailles : il s'agit d'un sujet « à froid » et non « au feu », mais les données existantes alors étaient limitatives en termes de dimension des entailles et des poutres.
3. Un complément sur la vitesse de combustion unidimensionnelle des panneaux de coffrage perdu sur support béton qui jouent un rôle d'écran non négligeable.
4. Le cadrage de la méthode de prise en compte de la réduction du module d'élasticité du béton en fonction du temps d'exposition : l'approche utilisée dans la première étude, si elle est basée sur des travaux publiés et une annexe informative de l'EN 1992-1-2, mérite d'être approfondie.

COMMENTAIRE :

Concernant le point 2. portant sur le module de glissement des entailles, la norme expérimentale XP CEN/TS 19103 publiée en Février 2022 apporte des réponses qui permettent d'élargir le champ d'application de cette technologie d'assemblage mixte bois-béton.

L'étude avait également mis en lumière le fait que l'approche des Recommandations Professionnelles RAGE consistant à conduire une vérification en situation d'incendie de la poutre bois seule sans apport de la connexion n'était pas systématiquement sécuritaire.

Lien vers la page de l'étude le site du CODIFAB :

<https://www.codifab.fr/actions-collectives/dimensionnement-des-planchers-mixtes-bois-beton-en-situation-d-incendie-2143>

1.3 Objectif de l'étude

Le CODIFAB a ainsi confié à C4Ci, en collaboration avec le laboratoire de résistance au feu du CSTB (dont on rappelle qu'il est laboratoire agréé en résistance au feu au sens de l'arrêté du 22 mars 2004), la réalisation d'une seconde étude visant en premier lieu à apporter des éléments de réponse sur le sujet 1. « Etude complémentaire sur les connecteurs métalliques de type tige », tout en ne perdant pas de vue les sujets 3. (vitesse de combustion des panneaux à base de bois sur substrat béton) et 4. (prise en compte de la réduction du module d'élasticité du béton en fonction du temps d'exposition).

L'objectif sous-jacent de cette seconde étude est l'analyse du comportement de connecteurs métalliques de type tige non propriétaires, et plus particulièrement de vis à filetage partiel ou total (conformes à l'EN 14592 ou sous ETE) disponibles sur le marché français pour la réalisation d'assemblages courants de construction bois.

L'étude s'appuie sur la réalisation d'essais en vraie grandeur réalisés au laboratoire de résistance au feu du CSTB.

Les principes-objectifs suivants ont donc été retenus, en accord avec le comité de pilotage de l'action :

- L'étude ne vise pas à caractériser une configuration d'assemblage et/ou de plancher mixte bois-béton donné. Elle vise à évaluer l'applicabilité de la méthode FIT à des solutions non propriétaires.
- La durée de résistance cible est de 60 minutes.
- En conséquence les configurations soumises à l'essai seront définies afin d'atteindre la rupture à proximité des 60 minutes d'exposition, en sur-sollicitant le cas échéant les connecteurs.
- Les configurations soumises à l'essai devront dans la mesure du possible couvrir une variété de connecteurs, d'arrangements de la connexion bois-béton et de panneaux à base de bois formant coffrage perdu.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

L'étude s'inscrit en outre dans le contexte des travaux normatifs suivants :

- Travaux de révision de l'Eurocode 5 et donc de l'EN 1995-1-2 à l'horizon 2025 – 2027, qui prévoient l'inclusion d'éléments complémentaires permettant le dimensionnement de certains planchers mixtes bois-béton, menés par le CEN/TC 250/SC 5/WG 4 et le CEN/TC 250/HG Fire ;
- Travaux de rédaction d'une Technical Specification portant sur le dimensionnement (à froid) des structures mixtes bois-béton préfigurant la future partie 1-3 de l'Eurocode 5, menés par le CEN/TC 250/SC 5/WG 2.

L'étude a donc été réalisée en restant en contact avec ces groupes de travail, auxquels a en partie participé le rédacteur des présentes.

COMMENTAIRE :

La Technical Specification a été publiée début 2022 et porte la référence CEN/TS 19103. Elle a été transposée en France en tant que norme expérimentale XP CEN TX 19103 publiée par l'AFNOR en Février 2022.

Les travaux de transformation en la future EN 1995-1-3 sont planifiés sur la période 2023 – 2027.

1.4 Approche méthodologique

A la lumière des travaux existants identifiés lors de la première étude, deux approches expérimentales ont été jugées à la fois pertinentes et envisageables :

- Soit la réalisation de plusieurs essais en petit four (dans le prolongement des travaux initiaux d'A. Frangi qui ont permis le développement de la méthode FIT) :
 - Essais de traction/arrachement à diverses températures fixes puis sous feu ISO ;
 - Essais de cisaillement/module de glissement à diverses températures fixes puis sous feu ISO ;
 - Eprouvettes de petites dimensions avec les diverses configurations à étudier.

⇒ Approche qui permet de tester plusieurs types et orientations de connecteurs, et nécessite de travailler par analogie.

⇒ Approche qui ne permet pas d'appréhender le comportement du coffrage perdu, ou de la dalle béton.
- Soit la réalisation d'essais de résistance au feu en four pour parois horizontales (EN 1363-1 et EN 1365-3) de plusieurs configurations de poutres/planchers sous charge :
 - Poutre/plancher de portée 3.0 m sous charge
 - 2 typologies d'organes de fixation et d'orientation (45° et 90°)
 - Divers types de coffrage perdu en panneaux à base de bois

⇒ Approche qui permet de tester les éléments en vraie grandeur et sous charge, et d'étudier le comportement du coffrage perdu.

⇒ Approche plus limitative quant au nombre de configurations pouvant être testées.

Après échanges avec le laboratoire et le comité de pilotage, le choix s'est porté sur la seconde approche (essais de résistance au feu sur poutre/plancher en vraie grandeur).

COMMENTAIRE :

Outre le fait de permettre d'étudier plusieurs paramètres, la seconde approche a également été pressentie comme plus à même de venir appuyer la démarche d'acceptation réglementaire, car plus proche des modes de preuves reconnus par la réglementation et l'arrêté du 22 mars 2004.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2 PRINCIPE DE L'ESSAI ET CONFIGURATIONS RETENUES

2.1 Principe de l'essai

Afin de pouvoir soumettre à l'essai des configurations différentes, il a été décidé de réaliser un corps d'épreuve par configuration, constitué d'une poutre en bois lamellé-collé, d'une dalle de compression béton d'1,0 m de large, d'une solution d'assemblage bois-béton et d'un type de coffrage perdu en panneau à base de bois, le tout formant une poutre à section en T.

L'essai de résistance au feu est réalisé conformément à :

- l'EN 1363-1:2020-02 Essais de résistance au feu – Partie 1 : exigences générales ; et à
- l'EN 1365-3:2000-06 Essais de résistance au feu des éléments porteurs – Partie 3 : poutres.

L'essai est donc réalisé sous charge.

L'objectif de l'essai étant l'étude du comportement de la connexion bois-béton, sollicitée en cisaillement à l'interface entre la poutre et la dalle de compression, le dispositif de l'essai a été choisi sur la base des considérations suivantes :

- Afin de privilégier un effort tranchant élevé (solllicitation visée) et de limiter ou retarder le risque de rupture en traction/flexion de la nervure, il est usuel de privilégier une portée de l'essai de 5 à 10 fois la hauteur de la poutre ;
- Afin d'uniformiser l'effort sur chaque organe d'assemblage, un chargement en flexion 3 points (à effort tranchant constant en valeur absolue sur la longueur de la poutre) est privilégié.

En conséquence, et sur la base des dimensions du four du laboratoire de résistance au feu du CSTB utilisé pour ces essais d'une part, et de la hauteur de poutre visée d'autre part (voir plus loin), une portée de 3,0 m a été retenue.

Le programme initial du projet permet l'essai de 4 poutres / configurations différentes.

Le choix, pour chaque configuration, de l'intensité de la charge est décrit plus loin.

COMMENTAIRE :

Il avait initialement été envisagé de réaliser un seul essai simultanément sur les 4 poutres, en assurant une désolidarisation de chaque poutre/baie et un chargement différencié. Outre quelques complications au niveau du chargement et de la réalisation des corps d'épreuve, le risque que la rupture prématurée d'une poutre perturbe fortement la poursuite de l'essai sur les autres et les implications en termes de sécurité des opérateurs ont conduit à tester chaque poutre séparément.

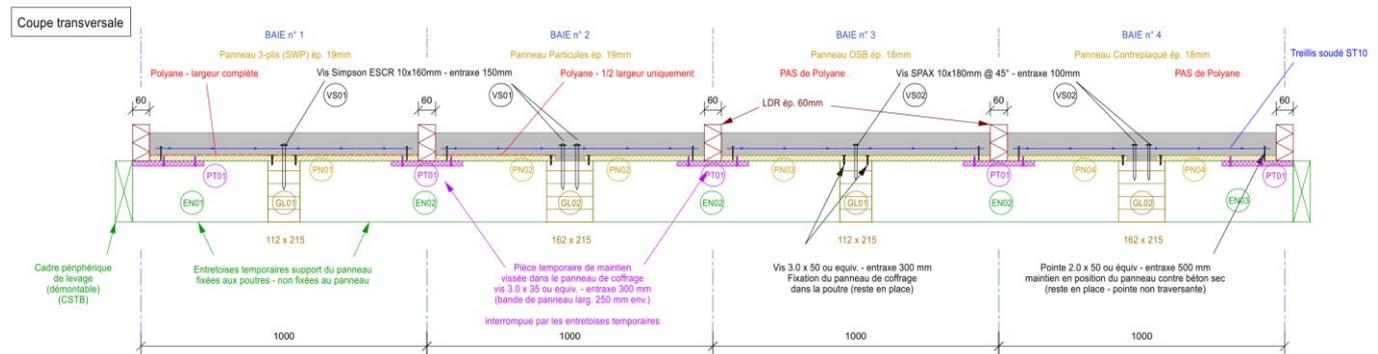


Figure 1 : Principe initial de l'essai simultané des 4 poutres

2.2 Critères de choix des configurations

2.2.1 CONFIGURATION DE L'ASSEMBLAGE

L'objectif de l'étude étant d'évaluer le comportement (et l'applicabilité de la méthode FIT) aux organes de fixation de type tige non propriétaires conformes à l'EN 14592 ou sous ETE, le choix du type de plancher mixte bois-béton s'est tout naturellement porté sur un plancher à nervures bois et dalle de compression béton connectées par des vis.

Les paramètres de configuration de l'assemblage suivants sont représentatifs de la pratique sur le marché :

- Orientation des vis à 45°, inclinées dans le même sens ou croisées, ou orientation à 90° ;
- Rangées simples ou multiples ;
- Entraxe fixe ou variable (plus dense à proximité des appuis où l'effort tranchant est plus important).

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Les choix suivants ont été retenus en accord avec le comité de pilotage :

- Deux orientations des vis : 90° ou 45° inclinées dans le même sens
- 1 ou 2 rangées de vis à entraxe fixe

Les figures ci-dessous (coupes longitudinales) illustrent les deux orientations, et indiquent également les définitions des dimensions utilisées plus loin dans le présent rapport.

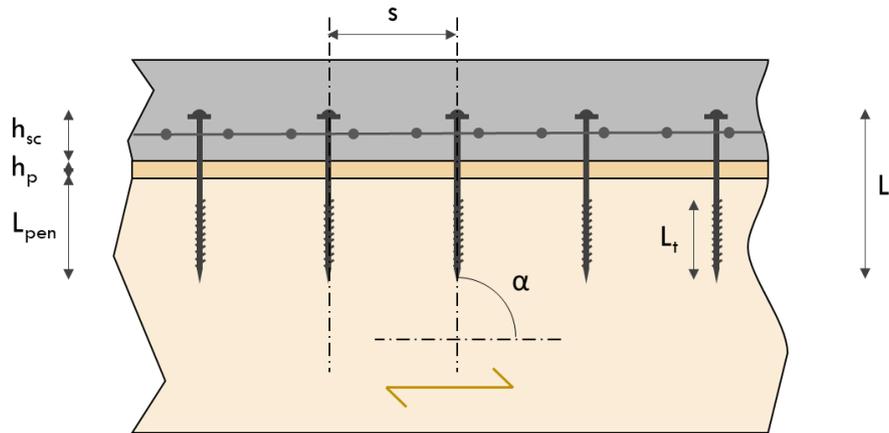


Figure 2 : Arrangement longitudinal des vis – Cas des vis à 90°

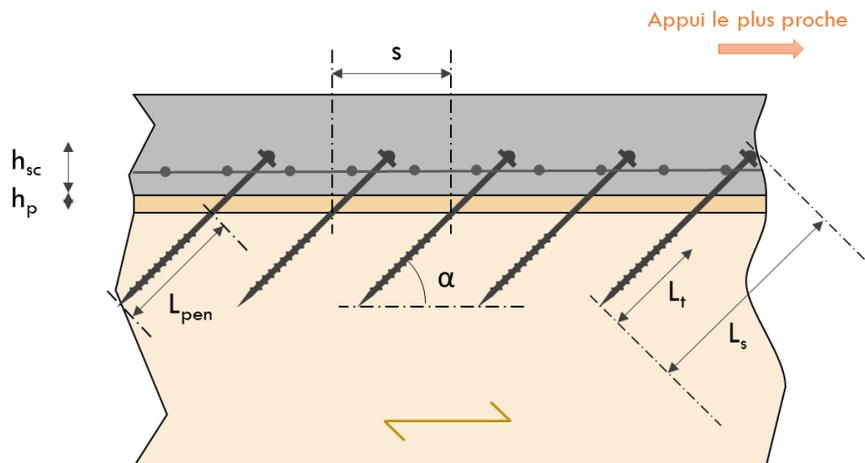


Figure 3 : Arrangement longitudinal des vis – Cas des vis à 45°

NOTE : Dans le cas des vis à 45° , les têtes de vis sont dirigées vers l'appui le plus proche, entraînant un changement d'orientation à mi-portée.

COMMENTAIRE :

A l'instar du choix fait pour le dispositif d'essai en flexion 3 points (à effort tranchant constant en valeur absolue), l'entraxe fixe a été privilégié à l'entraxe variable, afin d'uniformiser l'effort sur chaque organe d'assemblage.

2.2.2 CONFIGURATION DU COFFRAGE PERDU VIS-A-VIS DE L'ASSEMBLAGE

L'objectif sous-jacent de l'étude étant d'évaluer le comportement du coffrage perdu, les paramètres de configuration suivants s'ajoutent à ceux décrits précédemment :

- Panneau de coffrage perdu filant sur la nervure bois : les vis traversent alors le panneau ;
- Panneau de coffrage perdu interrompu au droit de l'assemblage, néanmoins appuyé sur la nervure bois : le béton est alors au contact du bois, les vis ne traversent pas le panneau.
- Matériaux les plus courants : OSB, contreplaqué, panneau de particules, panneau 3-plis (illustrant la possibilité d'un panneau apparent en service) ; épaisseur adaptée à la portée du panneau (entraxe des nervures).
- Interface entre le béton et le panneau : présence ou non de film PE ; utilisation de panneaux filmés ou revêtus.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Les choix suivants ont été retenus en accord avec le comité de pilotage :

- Les deux configurations d'appui du panneau de coffrage (filant et interrompu) sont retenues.
- Matériaux retenus : OSB et contreplaqué (non filmés) de 18 mm ; panneau de particules et 3-plis (non filmés) de 19 mm.
- Un film PE (entre le béton et le panneau) est mis en place dans certaines configurations, et omis dans d'autres.

Les figures ci-dessous (coupes transversales) illustrent les deux configurations, et indiquent également les définitions des dimensions utilisées plus loin dans le présent rapport.

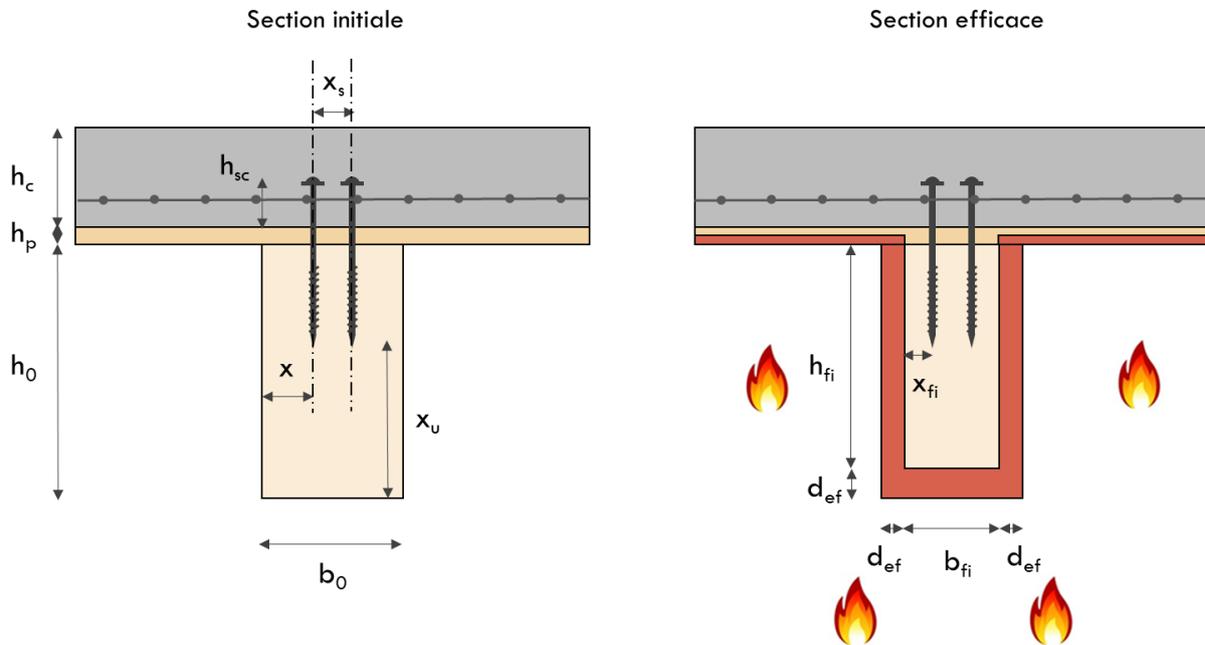


Figure 4 : Section de plancher mixte bois-béton – 2 rangées de vis – Cas du panneau filant au-dessus de la poutre

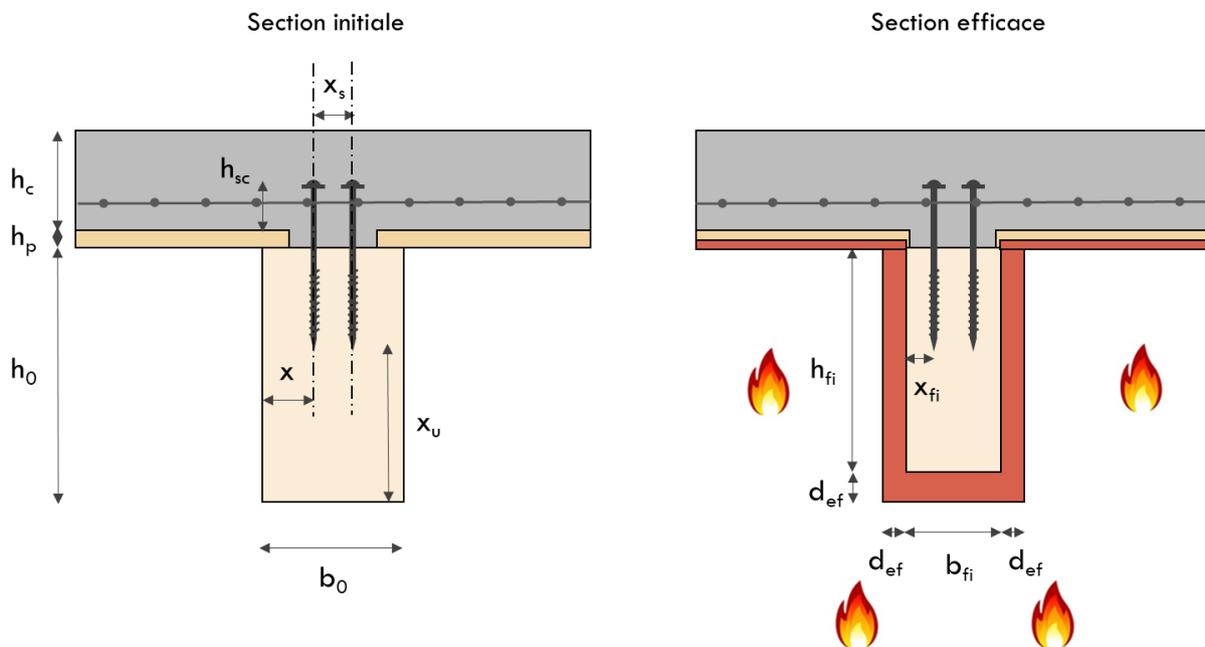


Figure 5 : Section de plancher mixte bois-béton – 2 rangées de vis – Cas du béton au contact de la poutre

COMMENTAIRE :

Pour des raisons pratiques de mise en œuvre des vis inclinées à 45°, il a été choisi de combiner cette orientation à la configuration de panneau interrompu.

Pour les mêmes raisons, cette combinaison (vis inclinées à 45° et panneau de coffrage interrompu) n'est pas pourvue d'un film PE.

Par contraste, les vis à 90° sont combinées à un panneau filant avec présence d'un film PE.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.2.3 ORGANES D'ASSEMBLAGE

L'objectif de l'étude étant d'évaluer le comportement (et l'applicabilité de la méthode FIT) aux organes de fixation de type tige non propriétaires conformes à l'EN 14592 ou sous ETE, le choix des organes de fixation s'est fait selon les paramètres suivants :

- Les vis ont été privilégiées puisque étant un choix naturel et permettant de couvrir les orientations d'organes souhaitées.
- La résistance dans le béton dépend avant tout de la capacité de blocage de forme de la tête de l'organe : le filetage dans le béton n'est donc pas nécessaire.
- La résistance dans le bois étant pilotée (à 45°) ou influencée (à 90°) par la résistance à l'arrachement elle-même dépendante de la longueur de filetage, la longueur de filetage maximale dans le bois est à privilégier.
- Le dimensionnement nécessite de connaître de manière fiable l'ensemble des propriétés :
 - Module de glissement axial ;
 - Paramètre d'arrachement $f_{ax,k}$
 - Paramètre de traversée de la tête $f_{head,k}$
 - Résistance à l'arrachement à un angle α avec le fil du bois $F_{ax,\alpha,k}$
 - Moment d'écoulement plastique $M_{y,Rk}$ce qui tend à se concentrer sur des vis sous ETE (Evaluation technique Européenne).

Les choix suivants ont été retenus en accord avec le comité de pilotage :

- Vis à filetage partiel et tête plate « du commerce » sous ETE
- Choix de deux types/fabricants de vis différents pour augmenter la représentativité des essais.
- Dans la mesure du possible privilégier des fabricants qui ne disposent pas par ailleurs d'un système propriétaire pour l'assemblage bois-béton.
- Vis de diamètre identique et de longueur adaptée à l'orientation en recherchant une longueur de filetage proche pour les deux orientations et afin d'avoir le même recouvrement de bois à $t = 0$.

Les deux vis ainsi retenues en fonction de ces critères sont :

- Vis ESCR 10.0 x 160 mm de Simpson Strong-Tie en acier au carbone électrozinguée visée par l'ETA-13/0796
- Vis SPAX 10.0 x 180 mm de SPAX en acier inoxydable A2 visée par l'ETA-12/0114

COMMENTAIRE :

De par la forme adaptée de leurs pointes et de leurs filetages, les ETA-12/0114 pour SPAX et ETA-13/0796 pour Simpson ESCR autorisent des pinces plus resserrées que celles permises par défaut par l'EN 1995-1-1, ce qui permet à la fois d'augmenter le nombre d'organes pour maximiser les efforts et réduire au maximum l'entraxe des vis, et de s'adapter à des sections standards de nervure lamellé-collé (cf. §2.2.4) compte-tenu de la durée d'exposition recherchée et de l'optimisation du recouvrement à $t = 0$.

Les vis pour les corps d'épreuve ont été gracieusement mis à disposition par Simpson Strong-Tie et SPAX, qui en sont ici à nouveau remerciés.

2.2.4 NERVURES BOIS

Compte-tenu de la durée d'exposition visée, la section (et notamment la largeur) des nervures est relativement importante.

En accord avec le comité de pilotage, le choix des nervures c'est donc porté sur des nervures en bois lamellé-collé GL24h, qui à la fois reflètent la pratique majoritaire du marché et permettent une flexibilité de sélection de section parmi des sections standards.

La section de nervure en bois est déterminée pour satisfaire aux principes suivants :

- Epaisseur standard la plus proche pour découvrir les vis sur le(s) côté(s) exposé(s) à $t_{fi} = 60$ minutes en tenant compte de la vitesse de combustion de l'EN 1995-1-2 ;
- Hauteur standard la plus proche pour :
 - atteindre la portée théorique en situation normale et en situation d'incendie ;
 - être la plus proche de découvrir les pointes des vis en partie basse de la nervure à $t_{fi} = 60$ minutes en tenant compte de la vitesse de combustion de l'EN 1995-1-2.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Le détail de la détermination des sections de bois est décrit au §2.3.

Les deux sections de poutre retenues sont :

- $b_0 \times h_0 = 112 \times 215$ mm pour les configurations de vis à une seule rangée
- $b_0 \times h_0 = 162 \times 215$ mm pour les configurations de vis à deux rangées

COMMENTAIRE :

Ces sections permettent un recouvrement à $t = 0$ identique et une uniformité facilitatrice de la fabrication des corps d'épreuve.

Les poutres lamellé-collé (ainsi que les autres éléments à base de bois) nécessaires à la réalisation des corps d'épreuve ont été fournis et usinés par l'entreprise Mathis, qui est remerciée ici pour avoir facilité cette préparation et aidé au montage des corps d'épreuve.

2.2.5 DALLE DE COMPRESSION BETON

Les critères de définition de la dalle de compression béton sont les suivants :

- Privilégier une épaisseur et une constitution de dalle de compression identique pour toutes les configurations.
- Assurer que l'épaisseur de la dalle correspond au critère de résistance au feu EI 60, pour assurer la fonction écran dans tous les cas et conserver son intégrité mécanique dans le fonctionnement mixte bois-béton.
- Utiliser une classe de béton selon EN 206/CN qui soit courante et représentative du marché.
- Armer la dalle de compression d'un treillis soudé en nappe basse pour mobiliser la section tendue de la dalle béton, avec un produit courant du marché.

Les choix suivants ont été retenus en accord avec le comité de pilotage :

- Dalle de compression béton d'épaisseur 80 mm (critère EI 60 selon EN 1992-1-2) ;
- Béton C25/30 selon EN 206/CN et ce classe XC1
- Treillis soudé ST10 (maille 200 x 200 mm ; fils de $\varnothing 4,5$ mm) positionné à 30 mm du panneau en fond de coffrage.

COMMENTAIRE :

L'épaisseur de 80 mm permet de positionner la tête des vis à mi-hauteur et le treillis soudé 10 mm plus bas, ce qui à la fois satisfait aux règles d'enrobage de l'EN 1992-1-1 et son AN, et permet de positionner le treillis sous les têtes de vis assurant ainsi un renfort d'armature bienvenu dans le béton pour reprendre le flux de cisaillement dans la rangée de vis.

On rappelle que l'épaisseur minimale de la dalle de compression béton est de 50mm selon EN 1992-1-1 pour que le plancher puisse assurer un rôle de diaphragme dans l'ouvrage, et que lorsque le bâtiment concerné nécessite la prise en compte du risque sismique au sens de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié, une épaisseur minimale de 70 mm est requise par l'EN 1998-1. Le choix de 80 mm permet d'y satisfaire dans tous les cas.

On rappelle également que l'augmentation de section et/ou de la classe de résistance du béton induit en général une sollicitation plus importante des connecteurs bois-béton et augmente la rigidité de la poutre composite avec un effet favorable en général plus rapide que l'effet défavorable de l'augmentation du poids propre.

2.2.6 AUTRES PARAMETRES

On présente la détermination des paramètres suivants de manière détaillée dans la suite du rapport :

- § 2.3 pour la détermination de la section de bois ;
- § 0 pour la détermination des pinces et de l'entraxe des vis ;
- § 2.6 pour la détermination de la portée maximale théorique ;
- § 2.7 pour la détermination des efforts de chargement équivalent pour les essais.

Les autres paramètres définis en accord avec le comité de pilotage sont :

- Durée d'exposition au feu de l'étude : $t_{fi} = 60$ minutes (avec une marge de 15 minutes pour le calcul théorique)
- Temps de séchage des corps d'épreuve béton : 90 jours
- Charges à prendre en compte pour refléter un cas réel :
 - Charge d'exploitation : $Q_k = 2,5$ kN/m² (catégorie d'usage B selon EN 1991-1-1 et son AN)
 - Surcharge permanente correspondant aux revêtements de sols : $G_1 = 0,5$ kN/m²

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.3 Configurations retenues

NOTE : Les définitions des dimensions du corps d'épreuve sont données dans les Figures 2 à 5.

Le détail des configurations retenues est décrit au Tableau 1 ci-après.

Le détail des calculs de la section de bois est décrit au § 2.3, celui et des pinces et entraxes des vis au § 0 ci-après.

Tableau 1 : Description détaillée des configurations de chaque corps d'épreuve

| Configuration | | Corps d'épreuve | | | |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|--------------|
| | | GL01 | GL02 | GL03 | GL04 |
| Dalle béton ⁽¹⁾ | h_c | 80 mm | | | |
| | Treillis Soudé | ST10 | | | |
| | Film PE | Largeur complète | Sur 1/2 largeur | Sans | Sans |
| Panneau de coffrage | Type | 3 plis (SWP) | OSB/3 | P. particules P5 | Contreplaqué |
| | h_p | 19 mm | 18 mm | 19 mm | 18 mm |
| Interface | | Panneau filant ⁽²⁾ | | Béton/bois ⁽³⁾ | |
| Connecteur / Vis ⁽⁴⁾ | Type | Simpson ESCR 10.0x160 | | SPAX 10.0x180 inox A2 | |
| | d | 10.0 mm | | 10.0 mm | |
| | L_s | 160 mm | | 180 mm | |
| | L_t ⁽⁴⁾ | 100 mm | | 80 mm | |
| Configuration des vis | α | 90° | | 45° | |
| | h_{sc} | 40 mm | | | |
| | n_{90} ⁽⁵⁾ | 1 | 2 | 1 | 2 |
| | S | 150 mm | | 100 mm | |
| | x_s | - | 50 mm | - | 50 mm |
| Poutre GL24h | b_0 | 112 mm | 162 mm | 112 mm | 162 mm |
| | h_0 | 215 mm | | | |
| Autres dimensions | x | 56 mm | | | |
| | x_u | 114 mm | | 145 mm | |
| | L_{pen} | 101 mm | | 98 mm | |
| | L_{ef} ⁽⁶⁾ | 100 mm | | 80 mm | |

⁽¹⁾ Béton : C25/30 ; granulométrie ≤ 16 mm ; classe S4

⁽²⁾ Panneau de largeur 1,0 m séparant intégralement le béton de la poutre bois

⁽³⁾ Le béton au droit des connecteurs est au contact direct de la poutre bois, sur laquelle le panneau repose de part et d'autre de 30 mm uniquement (fixation par vis à entraxe minimum de 500 mm).

⁽⁴⁾ Les vis sont en acier au carbone, à tête plate (disque), filetage partiel et de longueur de filetage L_t .

⁽⁵⁾ Nombre de rangées de vis parallèles

⁽⁶⁾ $L_{ef} = \min \{ L_{pen} ; L_t \}$ est la longueur de filetage efficace des vis.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.4 Détermination de la section de bois

Afin de conserver une marge d'erreur expérimentale et de borner les sections standards de nervure bois à retenir, on détermine les sections réduites selon EN 1995-1-2 et son AN pour $t_{fi} = 60$ minutes (cible) et $t_{fi} = 75$ minutes (REI 60 + une marge expérimentale de 15 minutes).

Les sections standards des nervures bois sont choisies :

- pour s'approcher au maximum du cas limite $x_{fi} = 0$ pour $t_{fi} = 60$ min et $t_{fi} = 75$ min en situation d'incendie, en respectant $x_{u,fi} \geq x_{fi} + 20\text{ mm}$
- sous hypothèse de section réduite de l'EN 1995-1-2 avec :

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad \text{avec : } d_0 = 7 \text{ mm ; } k_0 = 1,0 \text{ pour } t \geq 20 \text{ min ; } \beta_n = 0,7 \text{ mm/min pour le lamellé-collé}$$

$$d_{ef} = 0,7 \cdot t_{fi} + 7,0 = 49,0 \text{ mm pour } t_{fi} = 60 \text{ min ; } 59,5 \text{ mm pour } t_{fi} = 75 \text{ min}$$

$$\text{on a donc recherché } b_0 = 2 \cdot x + x_s \quad \text{tel que } x \approx d_{ef} \quad \text{pour } t_{fi} \text{ entre 60 et 75 min}$$

$$\text{on retient : } x = 56 \text{ mm} \quad \text{compris entre 49,0 et 59,5 mm}$$

Les tableaux ci-dessous détaillent les calculs pour les 4 configurations et les sections standards (approchantes) retenues.

Tableau 2 : Définition de la largeur de section standard la plus proche du cas limite en situation d'incendie

| Corps d'épreuve | | GL01 / GL03 | | GL02 / GL04 | |
|--------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Durée d'exposition | | $t_{fi} = 60$ min | $t_{fi} = 75$ min | $t_{fi} = 60$ min | $t_{fi} = 75$ min |
| Carbonisation | d_{ef} | 49 mm | 59,5 mm | 49 mm | 59,5 mm |
| Rangées de vis | x_s | - | | 50 mm | |
| Largeur | $b_{0,min} = 2 \cdot d_{ef} + x_s$ | 98 mm | 119 mm | 148 mm | 169 mm |
| | b_0 | 112 mm | | 162 mm | |

Tableau 3 : Définition de la hauteur de section standard la plus proche du cas limite en situation d'incendie

| Corps d'épreuve | | GL01 / GL02 | | GL03 / GL04 | |
|--------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Durée d'exposition | | $t_{fi} = 60$ min | $t_{fi} = 60$ min | $t_{fi} = 75$ min | $t_{fi} = 75$ min |
| Carbonisation | d_{ef} | 49 mm | 59,5 mm | 49 mm | 59,5 mm |
| Vis | L_{pen} | 101 mm | | 98 mm | |
| | $h_{pen} = L_{pen} \cdot \sin\alpha$ | 101 mm | | 71,4 mm | |
| Hauteur | $h_{0,min} = h_{pen} + 20 + d_{ef}$ | 170 mm | 180,5 mm | 140,4 mm | 150,9 mm |
| | h_0 | 215 mm ⁽¹⁾ | | | |
| Vérification | x_u | 114 mm | | 145 mm | |
| | $x_{u,fi} = x_u - d_{ef}$ | 65 mm | 54,5 mm | 96 mm | 85,5 mm |

⁽¹⁾ Les hauteurs standards sont égales à : $n \cdot 44 - 5 \text{ mm}$ avec n le nombre de lamelles de 44mm, et 5 mm de rabotage. La hauteur standard correspondant à 4 lamelles est 171 mm, celle correspondant à 5 lamelles est 215mm. Il est apparu pertinent de conserver une hauteur unique pour des raisons pratiques.

On retient donc les sections de poutres en bois lamellé-collé suivantes :

$$b_0 \times h_0 = 112 \times 215 \text{ mm pour les configurations à une seule rangée de vis (90° et 45°)}$$

$$b_0 \times h_0 = 162 \times 215 \text{ mm pour les configurations à deux rangées de vis (90° et 45°)}$$

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.5 Détermination de l'entraxe des vis

2.5.1 ESPACEMENT LONGITUDINAL

L'espacement longitudinal minimal $a_{1,min}$ dépend du type de sollicitation et du diamètre d des vis :

- Vis à 90° : les vis sont sollicitées au cisaillement :
 - selon EN 1995-1-1 pour les vis de diamètre $d > 6$ mm $a_{1,min} = 12d$ (sans avant-trou) ou $5d$ (avec avant-trou)
 - ces valeurs sont reprises dans les ETE des vis (ETA-12/0114 pour SPAX et ETA-13/0796 pour Simpson ESCR)
- ⇒ on retiendra un espacement (usuel) de l'ordre de $s \approx 15d$
- ⇒ pour les vis de diamètre $d = 10$ mm : $s = a_1 = 150$ mm
- Vis à 45° : les vis sont sollicitées axialement :
 - selon EN 1995-1-1 pour les vis, l'espacement mesuré perpendiculairement à l'axe de vis vérifie $a_{1,min} = 7d$
 - de par la forme adaptée des pointes, les ETA-12/0114 pour SPAX et ETA-13/0796 pour Simpson ESCR autorisent une valeur plus resserrée $a_{1,min} = 5d$
- ⇒ on retiendra un espacement de l'ordre de $7d$ mesuré perpendiculairement à l'axe, et donc un espacement horizontal $s \geq a_{1,min} / \sin \alpha$
- ⇒ pour les vis de diamètre $d = 10$ mm : $s = a_1 = 70 / \sin 45^\circ = 99$ mm arrondi à 100 mm par simplification

On retient donc un espacement longitudinal $a_1 = 100$ mm pour les vis à 45° et $a_1 = 150$ mm pour les vis à 90° .

2.5.2 ESPACEMENT TRANSVERSAL

L'espacement transversal minimal $a_{2,min}$ entre deux rangées dépend du type de sollicitation et du diamètre d des vis :

- Vis à 90° : les vis sont sollicitées au cisaillement :
 - selon EN 1995-1-1 pour les vis de diamètre $d > 6$ mm $a_{2,min} = 4d$ (avec avant-trou)
 - ces valeurs sont reprises dans les ETE des vis (ETA-12/0114 pour SPAX et ETA-13/0796 pour Simpson ESCR)
- ⇒ pour les vis de diamètre $d = 10$ mm : $a_{2,min} = 40$ mm
- Vis à 45° : les vis sont sollicitées axialement :
 - selon EN 1995-1-1 pour les vis, l'espacement mesuré perpendiculairement à l'axe de vis vérifie $a_{2,min} = 5d$
 - de par la forme adaptée des pointes, les ETA-12/0114 pour SPAX et ETA-13/0796 pour Simpson ESCR autorisent une valeur plus resserrée $a_{2,min} = 2,5d$ à condition que $a_1 \cdot a_2 \geq 25 d^2$ (ce qui n'est pas toujours vérifié ci-dessus)
- ⇒ pour les vis de diamètre $d = 10$ mm : $a_{2,min} = 50$ mm

Afin de permettre une uniformisation des distances au bord (dimensions critiques en situation d'incendie) on retient une seule et même valeur de l'espacement transversal pour les vis à 90° et à 45° :

$$x_s = a_2 = 50 \text{ mm} \geq a_{2,min}$$

2.5.3 DISTANCES MINIMALES AU BORD

Il résulte des dimensions du Tableau 1 que la distance des vis au bord (non chargé) de la poutre est $x = a_4 = 56$ mm dans tous les cas étudiés, soit $5,6d$ pour des vis de diamètre 10mm.

On vérifie que la distance au bord (non chargé) notée $a_{4,c}$ (cisaillement) ou $a_{2,CG}$ (axial) dans l'EN 1995-1-1 est respectée par la largeur standard des poutres :

- Vis à 90° : les vis sont sollicitées au cisaillement :
 - selon EN 1995-1-1 pour les vis de diamètre $d > 6$ mm, la distance minimale au bord non chargé est $a_{4,c,min} = 5d$ (sans avant-trou) ou $3d$ (avec avant-trou)
- Vis à 45° : les vis sont sollicitées axialement :
 - selon EN 1995-1-1 pour les vis, la distance minimale du bord non chargé au centre de gravité de la vis est $a_{2,CG,min} = 4d$.

Il résulte des dimensions retenues que les distances minimales au bord non chargé définies dans l'EN 1995-1-1 sont vérifiées aussi bien pour les vis à 90° que pour les vis à 45° .

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.6 Détermination de la portée maximale théorique des poutres

Afin de pouvoir déterminer les charges équivalentes pour les essais qui génèrent un effort sur les vis similaire à celui rencontré dans un cas réel, on détermine la portée maximale théorique des poutres dans les quatre configurations.

2.6.1 HYPOTHESES

Les hypothèses de dimensionnement sont les suivantes :

- Entraxe des poutres : $e = 1,00 \text{ m}$ (identique à celui des essais)
- Charges permanentes : (avec $e = 1,00\text{m}$, les charges par m^2 sont également des charges par ml de poutre)
 - Poids propre de la poutre : $0,099 \text{ kN/m}$ pour 112×215 ; $0,144 \text{ kN/m}$ pour 162×215
 - Poids propre du panneau : $0,115 \text{ kN/m}$
 - Poids propre du béton sec (épaisseur nominale) : $1,962 \text{ kN/m}$Soit un poids propre total moyen : $G_0 \approx 2,20 \text{ kN/m}$
- Auquel on ajoute une surcharge (revêtement de sol) : $G_1 = 0,50 \text{ kN/m}$
- Charges d'exploitation : $Q = 2,50 \text{ kN/m}$ (cat. d'usage B)
- Classe de service 1.

2.6.2 DIMENSIONNEMENT

La poutre est modélisée et vérifiée selon la méthode de l'Annexe B de l'EN 1995-1-1 (dite « méthode des gammas »), et conformément aux dispositions de la XP CEN/TS 19103, ainsi que de l'AN de l'EN 1995-1-1.

La raideur de l'assemblage est déterminée conformément à l'ETA de la vis considérée.

Le calcul en situation d'incendie est réalisé en application de la méthode de la section réduite de l'EN 1995-1-2 et son AN, en appliquant la méthode FIT pour la détermination de la raideur et de la résistance de l'assemblage au temps d'exposition t_{fi} permettant le calcul de la rigidité efficace de la section résiduelle.

On recherche de la portée de calcul maximum L_{\max} pilotée :

- soit par la résistance de l'assemblage (des vis), vérifié :
 - en situation normale à l'ELU court terme ;
 - en situation normale à l'ELU long terme ;
 - en situation d'incendie à l'ELU ;
- soit par la résistance (flexion) de la section réduite de la nervure en bois lamellé-collé en situation d'incendie à l'ELU, les contraintes étant déterminées à partir de la rigidité efficace de la section composée ;
- soit par la flèche en situation normale à l'ELS sur la base des critères suivants :
 - $w_{\text{inst},Q} \leq L/300$ flèche instantanée sous charges variables
 - $w_{\text{fin}} \leq L/125$ flèche totale long terme
 - $w_{\text{net},\text{fin}} \leq L/250$ flèche nette totale long terme $w_{\text{net},\text{fin}} = w_{\text{fin}} - w_c$ (où $w_c =$ contreflèche, nulle ici)
 - $w_{\text{fin}} - w_{\text{inst},G0} \leq L/350$ flèche active pour $L \leq 7,0\text{m}$; $10\text{mm} + L/1000$ pour $L > 7,0\text{m}$

Une fois les portées maximales déterminées pour $t_{fi} = 60$ minutes, on poursuit le calcul en situation d'incendie minute par minute pour déterminer la durée de résistance théorique du corps d'épreuve.

COMMENTAIRE :

L'objectif étant de maximiser les efforts sur l'assemblage, on ne vérifie pas ici le critère vibratoire à l'ELS.

Les limites de flèche indiquées sont celles retenues par le GS 3.1 pour les DTA et Avis Techniques de la famille de procédé de plancher mixte bois-béton, en application de l'AN de l'EN 1995-1-1.

La limite de flèche active $L/350$ correspond aux éléments non fragiles, plus favorable que la flèche pour éléments fragiles ($L/500$). Le choix a été fait afin de maximiser la possibilité de voir la résistance des connecteurs/vis piloter le dimensionnement.

Pour les poutres GL01 et GL02, le dimensionnement tient compte de l'effet du coffrage perdu sur la rigidité et la résistance de la vis.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.6.3 PORTEES MAXIMALES THEORIQUES

Le Tableau 4 ci-dessous présente de manière synthétique pour chacun des 4 corps d'épreuve la portée maximale théorique ainsi déterminée, et les résultats clés du dimensionnement permettant d'identifier les vérifications décisives et les taux de travail ou durée d'exposition au feu associés.

Tableau 4 : Portées maximales théoriques et synthèse des résultats du dimensionnement

| Configuration | | Corps d'épreuve | | | |
|--|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | GL01 | GL02 | GL03 | GL04 |
| Portée maximale | L_{max} | 3,84 m | 4,65 m | 3,29 m | 5,09 m |
| Situation normale | | | | | |
| ELU Assemblage | Court terme | 100 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| Flèche active | | L / 531 | L / 538 | L / 1486 | L / 824 |
| Situation d'incendie – Durée d'exposition au feu cible | | | | | |
| ELU Bois (flexion) | à $t_{fi,d} = 60$ min | 35 % | 29 % | 36 % | 35 % |
| ELU Assemblage | | 38 % | 49 % | 42 % | 62 % |
| Situation d'incendie – Durée d'exposition maximale théorique atteignable | | | | | |
| ELU Bois (flexion) | Rupture / Taux de travail | $t_{fi,max} = 69$ min | 45 % | $t_{fi,max} = 69$ min | 48 % |
| ELU Assemblage | | 41 % | $t_{fi,max} = 91$ min | 44 % | $t_{fi,max} = 74$ min |

COMMENTAIRE :

L'objectif étant de maximiser les efforts sur l'assemblage, on voit que c'est bien la vérification à l'ELU Court terme de celui-ci qui détermine a priori la portée maximale théorique. Cet objectif a notamment pu être atteint du fait de l'effet des choix ou hypothèses suivant :

- ⇒ Le fait de retenir la limite de flèche active pour éléments non fragiles ($L/350$ jusqu'à 7 m) et non celle pour éléments fragiles ($L/500$ jusqu'à 5 m, $5\text{ mm} + L/1000$ au-delà) aurait pu permettre notamment pour les systèmes moins raides (poutres GL01 et GL02) d'atteindre le taux de travail de 100% de l'assemblage avant que la flèche active ne devienne décisive. En l'espèce, cette situation ne s'est pas présentée.
- ⇒ La faible hauteur de la poutre bois choisie pour atteindre une section réduite défavorable (minimale) lors de l'essai et ainsi augmenter la température au droit des vis, induit une sollicitation élevée de l'assemblage, dont il résulte des portées qui ne sont pas forcément représentatives des cas plus courants.

Un lecteur rapide pourrait tirer des conclusions biaisées en comparant directement les portées limites obtenues pour les poutres GL01/GL02 (vis à 90°) et celles obtenues pour les poutres GL03/GL04 (vis à 45°). Il faut conserver à l'esprit que :

- ⇒ L'augmentation de la rigidité de l'assemblage conduit à augmenter la sollicitation sur les vis et à réduire très significativement la flèche (ceci est bien illustré ci-dessus), et vice versa. Le calcul étant été optimisé pour être piloté par la résistance de l'assemblage, il ne l'est pas d'un point de vue global.
- ⇒ Les vis à 45° retenues sont d'une part en acier inoxydable A2 (réduisant ainsi leur résistance par rapport à des vis en acier au carbone) et ont une longueur de filetage (80 mm) qui mobilise moins des 2/3 de la longueur de pénétration de la vis dans le bois, ce qui pénalise aussi bien la résistance que la rigidité. Il est donc tout à fait envisageable d'optimiser la conception.
- ⇒ L'optimisation est également possible pour les vis à 90°, dont la résistance et la rigidité sont ici impactée par la présence du panneau de coffrage filant, et qui sont disposées à un entraxe plus important.

2.7 Efforts de chargement équivalent pour les essais

2.7.1 APPROCHE INITIALE ET EVOLUTION

Afin de déterminer les efforts de chargement pour les essais, on procède habituellement comme suit : des portées maximales théoriques des poutres déterminées dans les quatre configurations, on peut extraire les efforts agissants correspondants, qui servent de référence pour la détermination des charges équivalentes pour les essais, afin que ces dernières génèrent un effort sur les vis similaire à celui rencontré dans le cas réel théorique.

C'est cette approche qui a été utilisée dans un premier temps et qui est décrite aux §0 et 2.7.3, et a permis de définir la charge à appliquer lors du premier essai (poutre GL01).

L'essai de la poutre GL01 (cf. observations au §3.1.1) a débouché sur une rupture prématurée laquelle a fait l'objet d'une analyse (dans un temps court compte-tenu du planning de réalisation) pour mettre en lumière les points suivants :

- Le calcul théorique avec les portées théoriques maximale conduit à prendre en compte le traînage de cisaillement par le biais d'une largeur efficace b_{ef} qui est dépendante de la portée (cf. NF EN 1994, §5.4.1.2) et qui entre directement dans le calcul de la rigidité efficace EI_{eff} et donc dans le calcul des efforts et contraintes.

Pour la portée maximale théorique de 3,84 m, il s'avère que b_{ef} est égale à la largeur de la dalle béton (ici 940 mm), alors que pour la portée de réalisation de l'essai de 3,20 m, $b_{ef} = 800$ mm.

⇒ Cette différence crée un biais dans le calcul d'une charge équivalente. En outre, la réduction de la rigidité efficace induit une augmentation des efforts sur l'assemblage (notamment)

- La méthode dite des gammas (NF EN 1995-1-1, Annexe B) est basée sur un diagramme des moments sinusoïdal, et donc raisonnablement applicable aux poutres sous chargement uniforme dans les conditions habituelles (portée de l'ordre de 18 fois leur hauteur). Son application aux configurations de chargement sous charge concentrée fait apparaître des écarts importants avec des modèles plus fins (mais aussi plus complexes), et devient de plus en plus problématique au fur et à mesure que le rapport de la portée sur la hauteur diminue.

⇒ L'essai est réalisé à une portée de l'ordre de 10 fois la hauteur et sous une unique charge concentrée avec un diagramme de moment linéaire et un tranchant constant en valeur absolu. L'application de la méthode des gammas crée donc un autre biais dans le calcul d'une charge équivalente.

- Il avait dans un premier temps été considéré approprié de positionner la charge équivalente au niveau de la résistance moyenne estimée de l'assemblage, calculée sous hypothèse d'un COV de 15% à partir de la résistance caractéristique théorique (§0). Les configurations et portées maximales théoriques ont en outre été déterminées de sorte que la vérification de résistance de l'assemblage soit décisive (Tableau 4). Ceci revient à augmenter la charge de l'essai par rapport au chargement théorique d'un coefficient 1,328 (§2.7.3).

Le chargement théorique à l'ELU en situation normale est obtenu par la combinaison caractéristique $F_{ed} = 1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k$ alors qu'en situation d'incendie le chargement s'obtient par application de la combinaison accidentelle avec le coefficient partiel fréquent $F_{ed,fi} = G_k + \psi_1 \cdot Q_k$ (AN des NF EN 1991-1-2 et NF EN 1995-1-2).

Pour la catégorie d'usage B visée, $\psi_1 = 0,5$ et le rapport $F_{ed,fi} / F_{ed} = 0,534$ avec les charges du §2.6.1, ce qui revient à réduire la charge d'un coefficient 0,534.

⇒ L'approche initialement retenue conduit à surestimer la charge de l'essai par rapport aux conditions de calcul théorique et donc à l'objectif poursuivi.

Il a été conclu de ce qui précède, que l'approche initiale n'était finalement pas adaptée et conduisait à une surestimation disproportionnée de la charge équivalente de l'essai, incohérente avec l'objectif poursuivi dans cette campagne expérimentale.

Il a donc été décidé, pour les poutres GL02 à GL04, de redéfinir les charges des essais selon une approche consistant à s'approcher par le calcul théorique de la rupture de l'assemblage en situation d'incendie à $t_{fi} = 60$ minutes.

L'observation du corps d'épreuve GL01 après l'essai (voir les conditions particulières décrites au §3.1) semble indiquer une rupture de cisaillement à l'extrémité de la poutre dans l'axe des vis, ressemblant au faciès de rupture d'un cisaillement de bloc.

⇒ Cette observation faite a posteriori de la décision décrite ci-dessus est venu conforter la conclusion et la nouvelle orientation.

COMMENTAIRE :

Il est aisé de considérer a posteriori l'approche initiale comme erronée. Ce choix a été influencé par les pratiques usuelles en termes d'essais de caractérisation en résistance au feu, afin de s'en éloigner le moins possible, et poussé par le souhait de ne pas sous-solliciter les assemblages au vu de l'objectif de cette campagne expérimentale. Il était considéré comme raisonnable par les différentes parties jusqu'à la survenance de la rupture anticipée de la poutre GL01.

Seule la remise en question au travers de l'analyse a permis de pointer les biais de l'approche initiale.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.7.2 PRINCIPE DE L'APPROCHE INITIALE

On considère que la valeur de calcul des efforts agissants E_d est proportionnelle à la charge totale issue de la combinaison de charge ad hoc F_{Ed} :

$$E_d = f(L, E, \dots) \cdot F_{Ed} \quad \text{où :} \quad F_{Ed} = 1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k$$

Dans le cas présent on décompose les charges permanentes en poids propre du plancher G_0 et surcharge rapportée ultérieurement G_1 , et on rappelle la charge d'exploitation Q :

- Poids propre total moyen (poutre + panneau + béton sec) : $G_0 \approx 2,20 \text{ kN/m}$
- Surcharge permanente (revêtement de sol) : $G_1 = 0,50 \text{ kN/m}$
- Charges d'exploitation : $Q = 2,50 \text{ kN/m}$ (cat. d'usage B)

On peut donc réécrire : $F_{Ed} = 1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_1 + 1,5 \cdot Q$

On peut estimer le coefficient de passage de la résistance caractéristique à la résistance moyenne en émettant une hypothèse sur le coefficient de variation (COV) de cette résistance et en se positionnant dans le cas (statistique) d'une population infinie. En effet, pour une loi normale :

$$F_{Rk} = F_{Rmean} \cdot (1 - k_s \cdot COV) \quad \text{et donc :} \quad F_{Rk} = \frac{F_{Rmean}}{k_{adj,mean}} \quad \text{en posant :} \quad k_{adj,mean} = \frac{1}{1 - k_s \cdot COV}$$

La valeur de calcul de la résistance (du bois ou du connecteur) F_{Rd} s'écrit à partir de la résistance caractéristique F_{Rk} :

$$F_{Rd} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot F_{Rk} \quad \text{ou encore à partir de la résistance moyenne } F_{Rmean} : \quad F_{Rd} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot \frac{F_{Rmean}}{k_{adj,mean}}$$

En se positionnant dans le cas limite où $E_d = F_{Rd}$ on a :

$$f(L, E, \dots) \cdot F_{Ed} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot \frac{F_{Rmean}}{k_{adj,mean}} \quad \text{que l'on peut réarranger :} \quad f(L, E, \dots) \cdot \left[F_{Ed} \cdot \frac{\gamma_M \cdot k_{adj,mean}}{k_{mod}} \right] = F_{Rmean}$$

La charge $\left[F_{Ed} \cdot \frac{\gamma_M \cdot k_{adj,mean}}{k_{mod}} \right]$ permet donc d'approcher la charge de rupture moyenne estimée.

Dans le cas de l'essai à réaliser, il faut encore distinguer (déduire) l'effort agissant induit directement par le poids propre nominal de l'éprouvette G_0 de la charge $q_{equiv,essai}$ qui est appliquée sur l'éprouvette pour simuler le chargement correspondant au cas pratique théorique élevé au niveau de la rupture moyenne estimée :

$$q_{equiv,essai} = \left[F_{Ed} \cdot \frac{\gamma_M}{k_{mod}} \cdot k_{adj,mean} \right] - G_0 \quad \text{charge linéique uniformément répartie sur la portée théorique } L_{max} \text{ de calcul}$$

Enfin, il convient d'ajuster le chargement réel de l'éprouvette au modèle mécanique de chargement expérimental, et à la portée réelle de l'essai.

A cet effet, on passe par le Moment et le Tranchant agissant calculés sur la portée théorique L_{max} de calcul sous charge linéique uniformément répartie $q_{equiv,essai}$, que l'on transpose ensuite en charge de vérin p.ex. en flexion 3 points ou 4 points (ici en flexion 3 points) sur la portée d'essai L_{essai} .

COMMENTAIRE :

Il est d'usage pour les essais de résistance au feu de se positionner au niveau des résistances moyennes plutôt qu'à celui des résistances caractéristiques, étant donné qu'il n'est pas possible de prédéterminer de quel côté de la courbe de distribution statistique se trouveront les résistances des divers composants des corps d'épreuve.

Cette approche n'est pas forcément sécuritaire puisqu'elle conduit à augmenter les charges équivalentes pour les essais par rapport à une approche basée sur la résistance caractéristique.

Il faut également conserver à l'esprit que le calcul de la rigidité efficace par la méthode des gammas est basé sur une hypothèse de diagramme du moment sinusoïdal, et n'est donc qu'imparfaitement adapté à une situation de flexion 3 points.

2.7.3 APPLICATION NUMERIQUE

Pour une population infinie, un fractile à 5% et un niveau de confiance de 75% (Eurocode 5) le coefficient statistique $k_s = 1,645$.

On peut raisonnablement poser l'hypothèse d'un COV de 15% à 20% pour la résistance d'assemblages bois par organes métalliques de type tige.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Ceci donne les valeurs suivantes du coefficient $k_{adj,mean}$:

- Résistance caractéristique : $k_{adj,mean} = 1,0$
- Moyenne sous hypothèse COV 15% : $k_{adj,mean} = 1,328$
- Moyenne sous hypothèse COV 20% : $k_{adj,mean} = 1,490$

Dans le cas présent :

- Coefficient partiel matériaux $\gamma_M = 1,30$ pour les assemblages
- Coefficient de modification : $k_{mod} = 0,80$ classe de service 1 ou 2 à Moyen terme

On a ensuite : $F_{Ed} = 1,35 \cdot G_0 + 1,35 \cdot G_1 + 1,5 \cdot Q = 1,35 \cdot 2,20 + 1,35 \cdot 0,50 + 1,5 \cdot 2,50 = 7,395 \text{ kN} / \text{m}$

Ce qui donne donc une charge linéique uniformément répartie $q_{equiv,essai}$ selon le niveau considéré de :

$$q_{equiv,essai} = F_{Ed} \cdot \frac{\gamma_M}{k_{mod}} \cdot k_{adj,mean} - G_0 = 7,395 \cdot \frac{1,30}{0,80} \cdot \begin{bmatrix} 1,0 \\ 1,328 \\ 1,490 \end{bmatrix} - G_0 = \begin{bmatrix} (caract.) & 9,82 \\ (cov 15\%) & 13,75 \\ (cov 20\%) & 15,71 \end{bmatrix} \text{ kN} / \text{m}$$

On considère que la portée de calcul de l'essai est calculée sur la base d'une portée libre de 3,00 m et de deux appuis de longueur 20 cm chacun : $L_{essai} = 3,00 + 2 \cdot (0,20/2) = 3,20$

Le tableau ci-dessous donne la charge totale vérin équivalente pour un chargement de type flexion 3-points (charge P sous hypothèse de COV 15%, sur la base d'une portée de calcul de l'essai $L_{essai} = 3,20$ m pour une poutre.

Tableau 5 : Charge totale vérin sous hypothèse COV 15% et portée d'essai de 3,20m pour une poutre

| Configuration | | Corps d'épreuve | | | |
|---|---|-----------------|--------|--------|--------|
| | | GL01 | GL02 | GL03 | GL04 |
| Cas pratique théorique (COV = 15%) | $L_{max,theorique}$ | 3,84 m | 4,65 m | 3,29 m | 5,09 m |
| | $M_{max,moyen}$ | 25,35 | 37,17 | 18,61 | 44,54 |
| | $V_{max,moyen}$ | 26,41 | 31,98 | 22,62 | 35,00 |
| Charge pour effort équivalent pour une poutre | Flexion 3-points [1 x P] – Charge totale P [kN] | | | | |
| | Pour $M_{max,moyen}$ équivalent et COV = 15% | 31,69 | 46,47 | 23,26 | 55,68 |

COMMENTAIRE :

Il est d'usage pour les essais de résistance au feu de retenir les charges équivalentes permettant d'atteindre un Moment agissant équivalent, ce dernier étant mieux corrélé à la rigidité (et donc la déformation) de la poutre, et moins sensible aux différences entre configurations de chargement réelles et configurations de chargement de l'essai.

L'expérience de l'essai de la poutre GL01 a montré que dans le cas présent, cette approche n'était pas adaptée.

Sur la base du calcul ci-dessus, la charge vérin de 31,0 kN a été retenue pour l'essai GL01.

2.7.4 CHARGES EQUIVALENTES SELON LE CALCUL EN SITUATION D'ESSAI

Suite à l'analyse consécutive à la rupture prématurée de la outre GL01 lors de l'essai (§2.7.1) il a été conclu que l'approche initiale n'était finalement pas adaptée et conduisait à une surestimation disproportionnée de la charge équivalente de l'essai, incohérente avec l'objectif poursuivi dans cette campagne expérimentale.

Il a donc été décidé, pour les poutres GL02 à GL04, de redéfinir les charges des essais selon une approche consistant à s'approcher par le calcul théorique de la rupture de l'assemblage en situation d'incendie à $t_{fi} = 60$ minutes.

Le calcul est donc mené en prenant en compte les paramètres suivants :

- Largeur efficace calculée pour la portée de l'essai (et non la portée maximale théorique)
- Détermination de la charge concentrée par un calcul en flexion 3 points, uniquement en situation d'incendie (en application de la méthode FIT), visant à rendre la résistance de l'assemblage décisive à $t_{fi} = 60$ minutes.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

- Le calcul théorique est basé sur le module d'élasticité moyen du béton à 28 jours d'un béton de classe C25/30. Le jour de l'essai le béton était en réalité âgé respectivement de 102, 105, 116 et 119 jours pour les poutres GL01, GL02, GL03 et GL04. En appliquant les formules (3.1) et (3.2) de la NF EN 1992-1-1 pour un béton de classe C25/30 et un ciment de classe S, la résistance moyenne entre 100 et 120 jours atteint 40 MPa, situé entre les propriétés d'un béton de classe C30/37 et celles d'un béton de classe C35/45. On retient la classe C35/45 (légèrement plus favorable) pour le calcul.

Le tableau ci-dessous indique le taux de travail de l'assemblage (FvRk) et de la nervure bois (V et M) calculé avec la méthode FIT, minute par minute pour le temps d'exposition (t_{fi}).

Les charges concentrées utilisées sont indiquées dans la ligne (P).

La colonne (d_ef) indique la profondeur de carbonisation de la poutre bois calculée selon NF EN 1995-1-2.

Tableau 6 : Calcul en situation d'incendie en conditions d'essai avec charges concentrées – Valeurs ELU assemblage décisif

| P (kN) | | 26.00 | | | 37.50 | | | 19.00 | | | 26.00 | | |
|-----------------|-----------------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| t _{fi} | d _{ef} | GL01 | | | GL02 | | | GL03 | | | GL04 | | |
| | | V | M | FvRk |
| 0 | 0.0 | 11.5% | 33.0% | 65% | 11.9% | 33.5% | 56% | 10.0% | 21.5% | 72% | 9.6% | 20.1% | 51% |
| 0 | 0.0 | 11% | 33% | 65% | 12% | 33% | 56% | 10% | 21% | 72% | 10% | 20% | 51% |
| 30 | 28.0 | 19% | 53% | 79% | 17% | 49% | 69% | 19% | 39% | 77% | 15% | 32% | 58% |
| 31 | 28.7 | 19% | 54% | 82% | 18% | 50% | 71% | 20% | 40% | 79% | 16% | 33% | 59% |
| 32 | 29.4 | 20% | 55% | 84% | 18% | 51% | 73% | 20% | 41% | 80% | 16% | 33% | 61% |
| 33 | 30.1 | 20% | 56% | 85% | 18% | 52% | 74% | 21% | 42% | 82% | 16% | 34% | 62% |
| 34 | 30.8 | 21% | 58% | 86% | 18% | 53% | 75% | 21% | 43% | 83% | 16% | 35% | 63% |
| 35 | 31.5 | 21% | 59% | 87% | 18% | 54% | 76% | 22% | 44% | 84% | 16% | 35% | 64% |
| 36 | 32.2 | 21% | 60% | 88% | 19% | 55% | 77% | 22% | 46% | 85% | 17% | 36% | 65% |
| 37 | 32.9 | 22% | 62% | 89% | 19% | 56% | 79% | 23% | 47% | 87% | 17% | 37% | 67% |
| 38 | 33.6 | 22% | 63% | 90% | 19% | 57% | 80% | 23% | 48% | 88% | 17% | 37% | 68% |
| 39 | 34.3 | 23% | 65% | 91% | 19% | 58% | 81% | 24% | 49% | 89% | 17% | 38% | 69% |
| 40 | 35.0 | 23% | 66% | 92% | 20% | 59% | 82% | 25% | 51% | 90% | 18% | 39% | 71% |
| 41 | 35.7 | 24% | 68% | 93% | 20% | 60% | 84% | 25% | 52% | 92% | 18% | 40% | 72% |
| 42 | 36.4 | 24% | 70% | 94% | 20% | 61% | 85% | 26% | 54% | 93% | 18% | 40% | 74% |
| 43 | 37.1 | 25% | 71% | 95% | 20% | 62% | 86% | 27% | 55% | 94% | 18% | 41% | 75% |
| 44 | 37.8 | 26% | 73% | 96% | 21% | 63% | 88% | 27% | 57% | 95% | 19% | 42% | 77% |
| 45 | 38.5 | 26% | 75% | 97% | 21% | 65% | 89% | 28% | 59% | 97% | 19% | 43% | 78% |
| 46 | 39.2 | 27% | 77% | 98% | 21% | 66% | 90% | 29% | 61% | 98% | 19% | 44% | 80% |
| 47 | 39.9 | 28% | 80% | 99% | 21% | 67% | 91% | 30% | 63% | 99% | 20% | 45% | 82% |
| 48 | 40.6 | 28% | 82% | 100% | 22% | 69% | 93% | 31% | 65% | 100% | 20% | 46% | 83% |
| 49 | 41.3 | 29% | 84% | 101% | 22% | 70% | 94% | 32% | 67% | 101% | 20% | 47% | 85% |
| 50 | 42.0 | 30% | 87% | 101% | 22% | 72% | 95% | 33% | 70% | 102% | 20% | 48% | 87% |
| 51 | 42.7 | 31% | 89% | 101% | 23% | 73% | 96% | 34% | 72% | 102% | 21% | 49% | 88% |
| 52 | 43.4 | 32% | 92% | 101% | 23% | 74% | 97% | 36% | 75% | 103% | 21% | 50% | 90% |
| 53 | 44.1 | 33% | 94% | 101% | 23% | 76% | 98% | 37% | 77% | 103% | 21% | 51% | 91% |
| 54 | 44.8 | 34% | 97% | 101% | 23% | 77% | 99% | 38% | 80% | 103% | 21% | 52% | 93% |
| 55 | 45.5 | 35% | 100% | 100% | 23% | 79% | 100% | 40% | 83% | 102% | 22% | 53% | 95% |
| 56 | 46.2 | 36% | 103% | 100% | 24% | 80% | 100% | 41% | 86% | 102% | 22% | 54% | 96% |
| 57 | 46.9 | 37% | 106% | 99% | 24% | 82% | 101% | 43% | 90% | 101% | 22% | 55% | 98% |
| 58 | 47.6 | 38% | 110% | 97% | 24% | 83% | 101% | 45% | 93% | 100% | 23% | 56% | 100% |
| 59 | 48.3 | 40% | 114% | 96% | 24% | 85% | 101% | 47% | 98% | 98% | 23% | 58% | 101% |
| 60 | 49.0 | 41% | 118% | 94% | 25% | 86% | 101% | 49% | 102% | 96% | 23% | 59% | 103% |
| 61 | 49.7 | 43% | 122% | 91% | 25% | 88% | 101% | 52% | 107% | 93% | 23% | 60% | 104% |
| 62 | 50.4 | 46% | 127% | 89% | 25% | 90% | 101% | 54% | 112% | 90% | 24% | 61% | 105% |
| 63 | 51.1 | 48% | 133% | 85% | 25% | 92% | 100% | 58% | 118% | 86% | 24% | 63% | 107% |
| 64 | 51.8 | 52% | 140% | 81% | 25% | 93% | 100% | 62% | 125% | 81% | 24% | 64% | 108% |
| 65 | 52.5 | 56% | 148% | 77% | 25% | 95% | 100% | 66% | 133% | 76% | 24% | 66% | 111% |

COMMENTAIRE :

Cette approche conduit à retenir les charges concentrées suivantes pour l'essai :

- GL01 : P = 26,0 kN à comparer aux 31,0 kN de l'essai réalisé (rupture anticipée)
- GL02 : P = 37,5 kN
- GL03 : P = 19,0 kN
- GL04 : P = 26,0 kN

On vérifie ici le principe de définition des largeurs de section (ou épaisseurs de recouvrement des vis par le bois des nervures) puisque le calcul théorique indique une rupture de la nervure entre 55 et 60 minutes pour les poutres GL01 et GL03 à rangée de vis unique.

On note que ce n'est pas le cas pour les poutres GL02 et GL04 à 2 rangées de vis : on voit ici un effet direct de la méthode FIT, développée pour ce type de configuration et calibrée pour prédire la rupture de l'assemblage lorsque le recouvrement par le bois approche de zéro.

- ⇒ Les calculs ci-dessus n'ayant pu être réalisés de manière complète et sûre entre le jour de réalisation de l'essai sur la poutre GL01 et celui pour la poutre GL02, les charges finalement retenues diffèrent et sont décrites ci-après.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.7.5 CHARGES DES ESSAIS EFFECTIVEMENT APPLIQUEES ET CALCULS CORRESPONDANTS

Le planning des essais prévoyait la réalisation de l'essai sur la poutre GL02 trois jours après celui sur la poutre GL01 au cours duquel le questionnement sur la charge à appliquer est apparu. Ce délai court n'a pas permis de mener à son terme la réflexion et l'analyse décrite au §2.7.1 et d'appliquer les charges calculées selon le §2.7.4 pour le reste des poutres.

Il a par conséquent fallu définir une charge à appliquer à l'essai GL02 sur la base d'une première approximation. Le choix, teinté d'une marge de sécurité, s'est porté sur une charge de 31,0 kN.

Pour les essais GL03 et GL04, programmés 10 jours plus tard, les valeurs issues du calcul selon le §2.7.4 ont été retenues.

Les valeurs effectivement appliquées pour les 4 essais sont donc :

- GL01 : P = 31,0 kN à comparer aux 26,0 kN de l'approche modifiée
- GL02 : P = 31,0 kN choix fait dans une certaine urgence, à comparer aux 37,5 kN de l'approche modifiée
- GL03 : P = 19,0 kN
- GL04 : P = 26,0 kN

Le tableau ci-dessous indique le taux de travail de l'assemblage (FvRk) et de la nervure bois (V et M) calculé avec la méthode FIT, minute par minute pour le temps d'exposition (t_{fi}).

Les charges concentrées utilisées sont indiquées dans la ligne (P).

La colonne (d_ef) indique la profondeur de carbonisation de la poutre bois calculée selon NF EN 1995-1-2.

Tableau 7 : Calcul en situation d'incendie en conditions d'essai avec charges concentrées – Valeurs effectivement appliquées

| P (kN) | | 31.00 | | | 31.00 | | | 19.00 | | | 26.00 | | |
|-----------------|-----------------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| f _{fi} | d _{ef} | GL01 | | | GL02 | | | GL03 | | | GL04 | | |
| | | V | M | FvRk |
| 0 | 0.0 | 13.2% | 38.6% | 75% | 10.1% | 28.2% | 48% | 10.0% | 21.5% | 72% | 9.6% | 20.1% | 51% |
| 0 | 0.0 | 13% | 39% | 75% | 10% | 28% | 48% | 10% | 21% | 72% | 10% | 20% | 51% |
| 30 | 28.0 | 22% | 62% | 91% | 15% | 42% | 59% | 19% | 39% | 77% | 15% | 32% | 58% |
| 31 | 28.7 | 22% | 63% | 94% | 15% | 42% | 61% | 20% | 40% | 79% | 16% | 33% | 59% |
| 32 | 29.4 | 23% | 65% | 96% | 15% | 43% | 62% | 20% | 41% | 80% | 16% | 33% | 61% |
| 33 | 30.1 | 23% | 66% | 98% | 15% | 44% | 63% | 21% | 42% | 82% | 16% | 34% | 62% |
| 34 | 30.8 | 24% | 67% | 99% | 16% | 44% | 64% | 21% | 43% | 83% | 16% | 35% | 63% |
| 35 | 31.5 | 24% | 69% | 100% | 16% | 45% | 65% | 22% | 44% | 84% | 16% | 35% | 64% |
| 36 | 32.2 | 25% | 70% | 101% | 16% | 46% | 66% | 22% | 46% | 85% | 17% | 36% | 65% |
| 37 | 32.9 | 25% | 72% | 103% | 16% | 47% | 67% | 23% | 47% | 87% | 17% | 37% | 67% |
| 38 | 33.6 | 26% | 74% | 104% | 16% | 48% | 68% | 23% | 48% | 88% | 17% | 37% | 68% |
| 39 | 34.3 | 26% | 76% | 105% | 17% | 48% | 69% | 24% | 49% | 89% | 17% | 38% | 69% |
| 40 | 35.0 | 27% | 77% | 106% | 17% | 49% | 70% | 25% | 51% | 90% | 18% | 39% | 71% |
| 41 | 35.7 | 27% | 79% | 107% | 17% | 50% | 71% | 25% | 52% | 92% | 18% | 40% | 72% |
| 42 | 36.4 | 28% | 81% | 109% | 17% | 51% | 73% | 26% | 54% | 93% | 18% | 40% | 74% |
| 43 | 37.1 | 29% | 83% | 110% | 17% | 52% | 74% | 27% | 55% | 94% | 18% | 41% | 75% |
| 44 | 37.8 | 29% | 86% | 111% | 18% | 53% | 75% | 27% | 57% | 95% | 19% | 42% | 77% |
| 45 | 38.5 | 30% | 88% | 112% | 18% | 54% | 76% | 28% | 59% | 97% | 19% | 43% | 78% |
| 46 | 39.2 | 31% | 90% | 113% | 18% | 56% | 77% | 29% | 61% | 98% | 19% | 44% | 80% |
| 47 | 39.9 | 32% | 93% | 114% | 18% | 57% | 78% | 30% | 63% | 99% | 20% | 45% | 82% |
| 48 | 40.6 | 33% | 96% | 115% | 19% | 58% | 79% | 31% | 65% | 100% | 20% | 46% | 83% |
| 49 | 41.3 | 34% | 99% | 116% | 19% | 59% | 80% | 32% | 67% | 101% | 20% | 47% | 85% |
| 50 | 42.0 | 35% | 102% | 117% | 19% | 60% | 81% | 33% | 70% | 102% | 20% | 48% | 87% |
| 51 | 42.7 | 36% | 104% | 117% | 19% | 61% | 82% | 34% | 72% | 102% | 21% | 49% | 88% |
| 52 | 43.4 | 36% | 107% | 117% | 19% | 63% | 83% | 36% | 75% | 103% | 21% | 50% | 90% |
| 53 | 44.1 | 38% | 110% | 117% | 20% | 64% | 84% | 37% | 77% | 103% | 21% | 51% | 91% |
| 54 | 44.8 | 39% | 113% | 116% | 20% | 65% | 84% | 38% | 80% | 103% | 21% | 52% | 93% |
| 55 | 45.5 | 40% | 117% | 116% | 20% | 66% | 85% | 40% | 83% | 102% | 22% | 53% | 95% |
| 56 | 46.2 | 41% | 120% | 115% | 20% | 67% | 86% | 41% | 86% | 102% | 22% | 54% | 96% |
| 57 | 46.9 | 42% | 124% | 114% | 20% | 69% | 86% | 43% | 90% | 101% | 22% | 55% | 98% |
| 58 | 47.6 | 44% | 128% | 112% | 21% | 70% | 86% | 45% | 93% | 100% | 23% | 56% | 100% |
| 59 | 48.3 | 46% | 133% | 110% | 21% | 71% | 87% | 47% | 98% | 98% | 23% | 58% | 101% |
| 60 | 49.0 | 48% | 138% | 108% | 21% | 73% | 87% | 49% | 102% | 96% | 23% | 59% | 103% |
| 61 | 49.7 | 50% | 143% | 105% | 21% | 74% | 87% | 52% | 107% | 93% | 23% | 60% | 104% |
| 62 | 50.4 | 53% | 149% | 102% | 21% | 76% | 86% | 54% | 112% | 90% | 24% | 61% | 105% |
| 63 | 51.1 | 56% | 156% | 98% | 21% | 77% | 86% | 58% | 118% | 86% | 24% | 63% | 107% |
| 64 | 51.8 | 59% | 164% | 93% | 22% | 79% | 85% | 62% | 125% | 81% | 24% | 64% | 108% |
| 65 | 52.5 | 64% | 173% | 89% | 22% | 80% | 86% | 66% | 133% | 76% | 24% | 66% | 111% |

COMMENTAIRE :

La charge appliquée à la poutre GL02 correspond à la charge initialement prévue de 46,0 kN, ramenée à la charge caractéristique (annulation de l'augmentation de 1,33 pour aller à la résistance moyenne) de 33,2 kN, puis réduite de manière arbitraire à 31,0 kN.

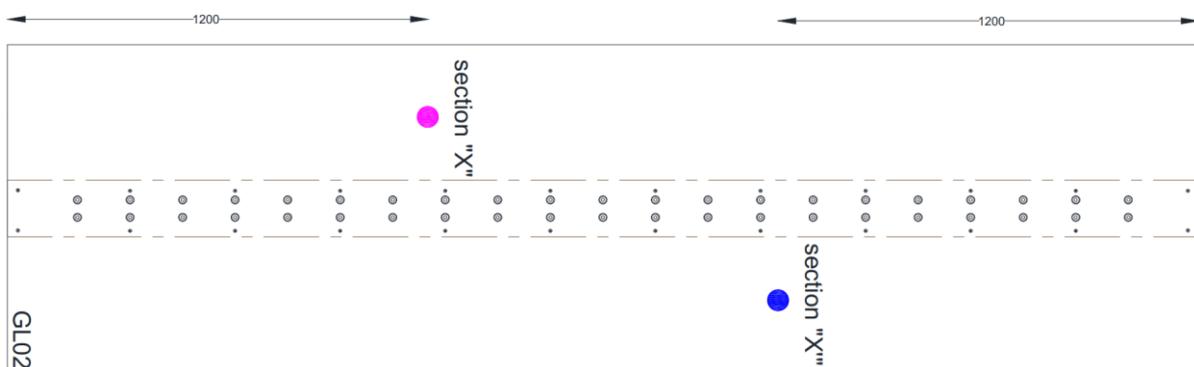
On note que la rupture prédite pour la poutre GL01 par le calcul dans les conditions d'essai se situe autour de 35 minutes, pour une rupture effective observée à $t_{fi} = 27$ minutes.

2.8 Instrumentation de l'essai

L'instrumentation de l'essai en termes de suivi de l'évolution des températures dans les composants au cours du temps a été définie en s'appuyant sur les principes suivants :

- 2 nappes complètes de thermocouples par poutre (Figure 6)
 - 1 nappe sur un 1/2 côté positionnée à 1200 mm d'une extrémité de la poutre
 - 1 nappe sur le 1/2 côté opposé positionnée à 1200 mm de l'autre extrémité de la poutre
 selon le détail ci-après (pour chaque nappe) :
- A l'interface béton – panneau : 1 thermocouple
- Dalle béton partie courante :
 - 1 thermocouple à mi-hauteur de l'enrobage
 - 1 thermocouple au niveau du treillis soudé
 - 1 thermocouple à hauteur de la tête des vis ($h_{sc} = 40$ mm) = mi-hauteur de la dalle
 - 1 thermocouple sur le dessus (non exposé) de la dalle
- Poutres bois :
 - 1 thermocouple tous les 10mm en épaisseur, et tous les 20mm en hauteur à partir de la sous-face
- Zone de l'assemblage :
 - 2 thermocouples (1 dans le bois, 1 dans le béton) à proximité de la vis, à mi-hauteur de pénétration, côté extérieur
 - 1 thermocouple sur la tête de vis
 - 1 thermocouple à l'interface bois-béton (poutre bois – béton ou panneau de coffrage – béton selon la configuration)
 - 1 thermocouple dans l'angle exposé à l'interface poutre-panneau de coffrage
 - 1 thermocouple entre les deux rangées de vis (lorsqu'applicable)

Le détail d'instrumentation de chacune des configurations est donné dans les Figures 7 à 10 ci-après (coupes transversales).



Vue de dessus (ici pour la poutre GL02 – principe identiques pour toutes les poutres)

Figure 6 : Instrumentation de l'essai – Principe de positionnement des deux nappes de thermocouples

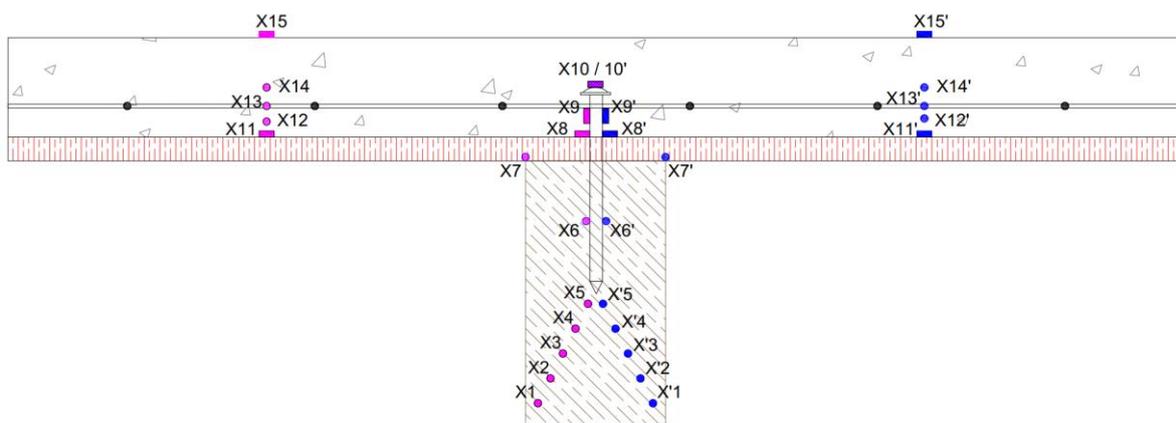


Figure 7 : Instrumentation de l'essai – Poutre GL01

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

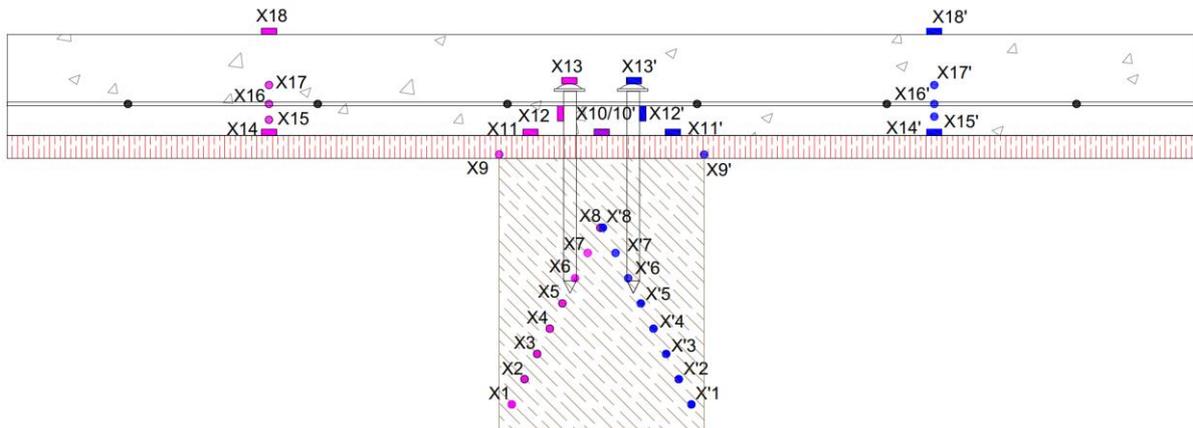


Figure 8 : Instrumentation de l'essai – Poutre GL02

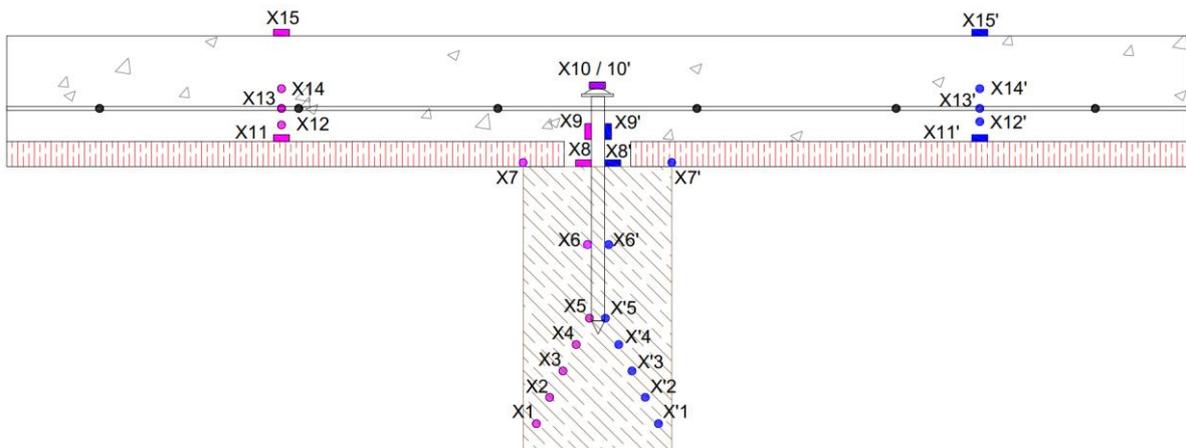


Figure 9 : Instrumentation de l'essai – Poutre GL03

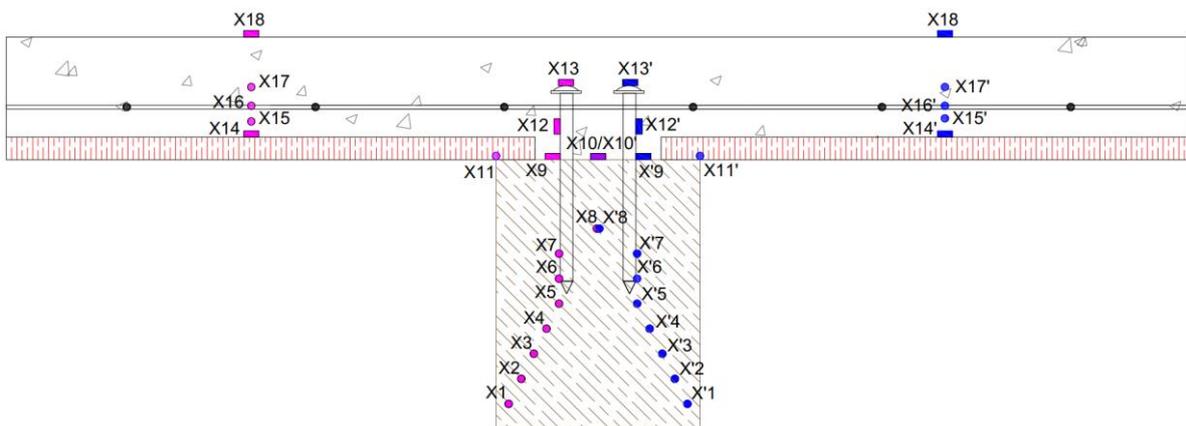


Figure 10 : Instrumentation de l'essai – Poutre GL04

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.9 Préparation des corps d'épreuve

Les figures 11 à 16 ci-après illustrent la préparation des corps d'épreuve.



Poutre et entretoises provisoires de soutien du coffrage
(ici GL01)



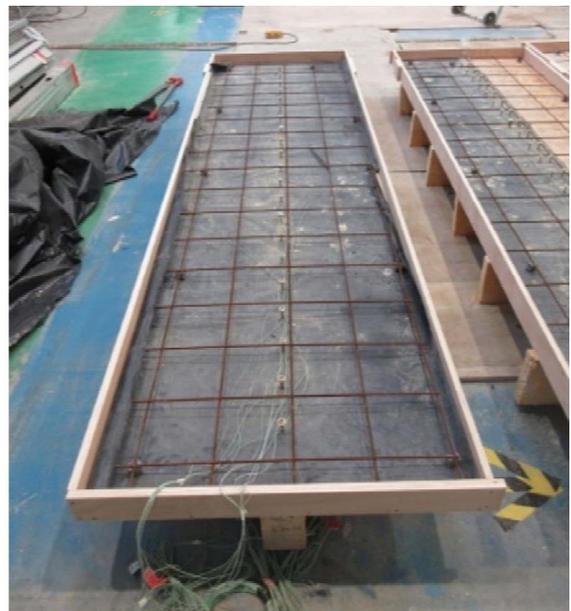
Pose des panneaux de coffrage
GL01 (panneau 3 plis) et GL02 (OSB – à droite)

Figure 11 : Préparation des corps d'épreuve – Poutre et panneau de coffrage



Pose du film PE (le cas échéant) et des vis
GL01 : film complet et 1 rangée de vis à 90°

GL02 (à droite) : film partiel et 2 rangées de vis à 90°



Instrumentation, pose du treillis, coffrage de la dalle
GL01 et (à droite) GL02

Figure 12 : Préparation des corps d'épreuve – Film PE, vis, instrumentation, treillis soudé, coffrage de la dalle

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



Coulage de la dalle béton



Levage pour mise en place sur le four

Figure 13 : Préparation des corps d'épreuve – Coulage de la dalle béton et levage



Mise en place sur le four

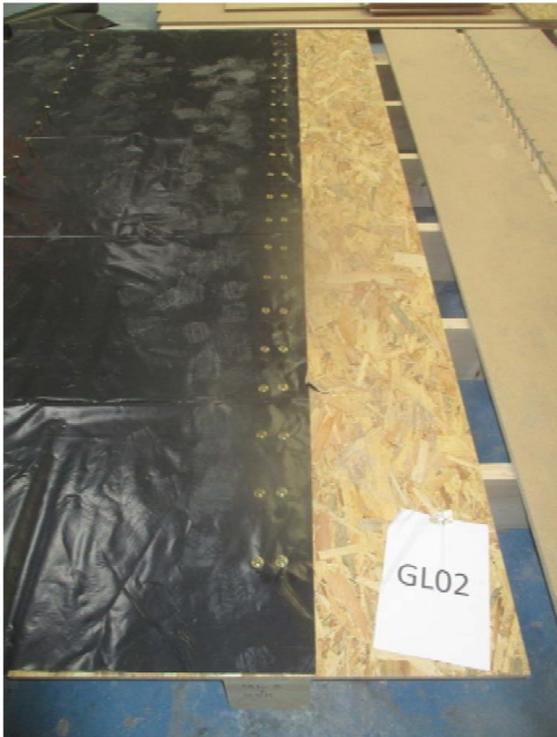


Mise en place du système de chargement

Figure 14 : Préparation des corps d'épreuve – Mise en place sur le four et mise ne place du système de chargement

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



GL02 : Film PE partiel
et 2 rangées de vis à 90°



GL03 et (sur la droite) GL04 : panneau interrompu

Figure 15 : Préparation des corps d'épreuve – Vues des panneaux et vis (GL02, GL03 et GL04)



GL03 : panneau de particules interrompu
et 1 rangée de vis à 45°



GL04 : panneau contreplaqué interrompu
et 2 rangées de vis à 45°

Figure 16 : Préparation des corps d'épreuve – Vue des vis à 45° avec panneau interrompu (GL03 et GL04)

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.10 Dispositif de l'essai sur le four

La charge est appliquée en flexion 3 points par un vérin équipé d'un capteur de force (FN3000-100kN).

La Figure 17 ci-dessous décrit les autres dispositifs de mesure (mesure de la déformation, température du four).

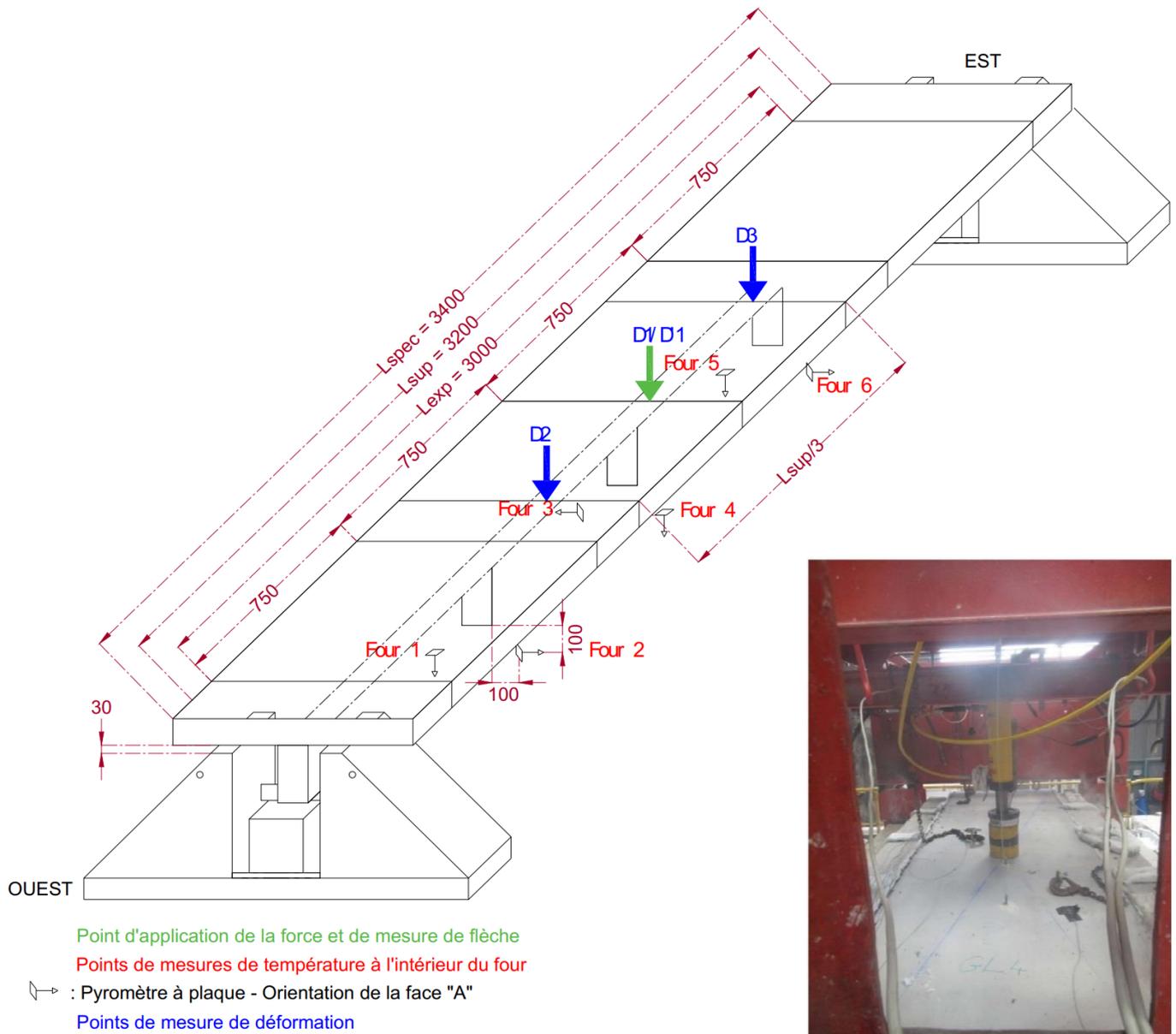


Figure 17 : Dispositif de l'essai sur le four – Instrumentation – Application de la charge

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

3 OBSERVATIONS ET ANALYSE DES RESULTATS DES ESSAIS

On ne présente ici que les observations marquantes. Il convient de se référer aux rapports d'essais en annexe pour le détail des observations. Pour mémoire :

- L'essai sur la poutre GL01 fait l'objet du rapport N° DSSF 21-02350/**A**
- L'essai sur la poutre GL02 fait l'objet du rapport N° DSSF 21-02350/**B**
- L'essai sur la poutre GL03 fait l'objet du rapport N° DSSF 21-02350/**C**
- L'essai sur la poutre GL04 fait l'objet du rapport N° DSSF 21-02350/**D**

3.1 Observations lors des essais

3.1.1 POUTRE GL01

Rappel des éléments clés de la configuration de l'essai :

- Poutre GL24h 112 x 215 mm avec 1 rangée de vis Simpson ESCR 10.0x160 à 90° (e = 150 mm)
- Panneau de coffrage perdu en panneau 3 plis (SWP) de 19 mm filant avec film PE sur la largeur complète
- Flexion 3 points avec charge vérin de 31,0 kN

Les principales observations faites lors de l'essai sont :

- $t_{fi} = 17$ minutes : apparition d'une fissure longitudinale à l'axe de la poutre (en sous face)
- $t_{fi} = 27$ minutes : fracture audible et chute brutale du niveau de chargement
 - ⇒ *Il est décidé de retirer le chargement, mais de poursuivre l'essai jusqu'à 60 minutes afin de pouvoir récolter les données sur les autres paramètres (panneau de coffrage, évolutions de température, ...)*
- $t_{fi} = 33$ à 36 minutes : décollement partiel et début de chute de parties du panneau de coffrage ; dalle béton visible
- $t_{fi} = 45$ minutes : apparition des premières lignes de suintement sur la dalle béton en face non exposée
- $t_{fi} = 62$ minutes : arrêt de l'essai

La carbonisation de la poutre s'est poursuivie après l'extinction du four rendant le retrait de la maquette difficile à réaliser en sécurité. En conséquence, le retrait et l'arrosage de la maquette n'ont été réalisés qu'environ 2 heures après l'arrêt de l'essai.

- ⇒ *En conséquence, les mesures de section résiduelles visées dans le rapport ont été réalisées après retrait, arrosage et refroidissement, soit après une carbonisation de l'ordre de 3 heures (au lieu de 62 minutes d'exposition dans le four). Ces données ne sont donc pas directement exploitables.*

La Figure 18 ci-dessous illustre la fissure longitudinale à l'axe de la poutre (en sous face) observée à $t_{fi} = 17$ minutes.

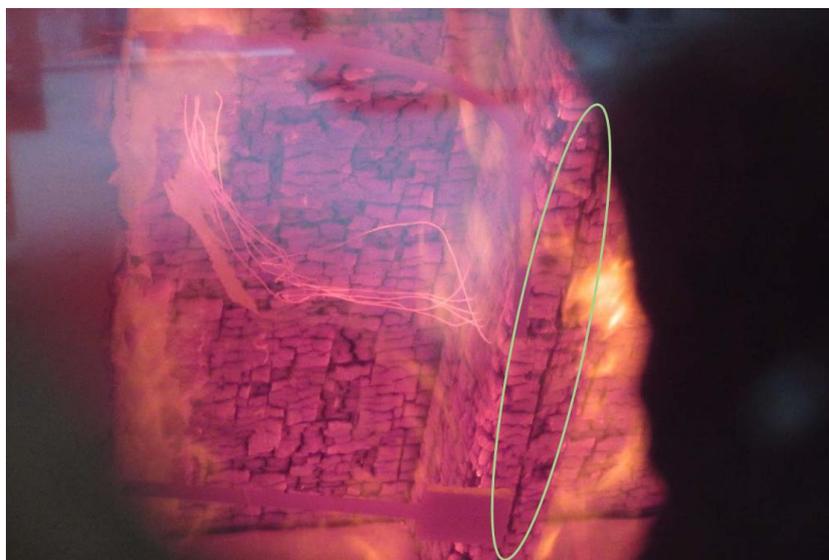


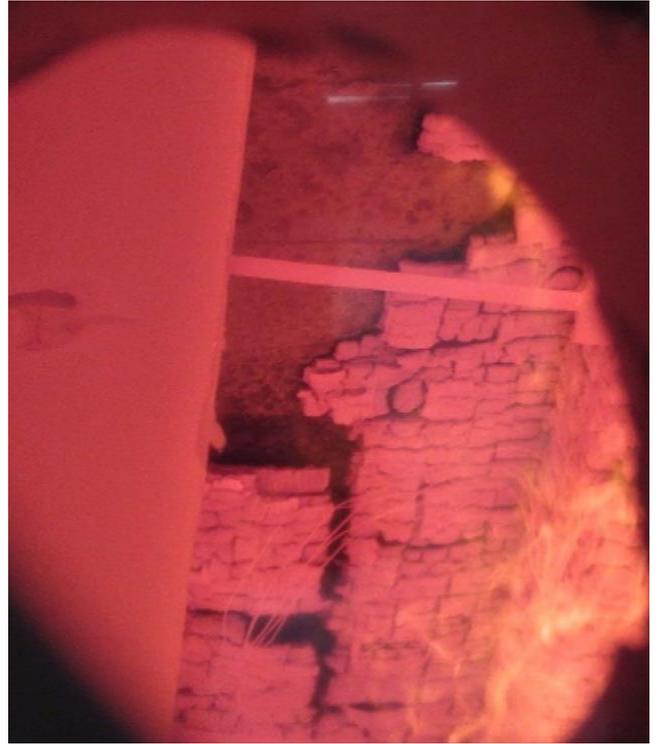
Figure 18 : Essai GL01 – Vue à $t_{fi} = 17$ minutes

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



Décollement du panneau ($t_{fi} = 33$ min)

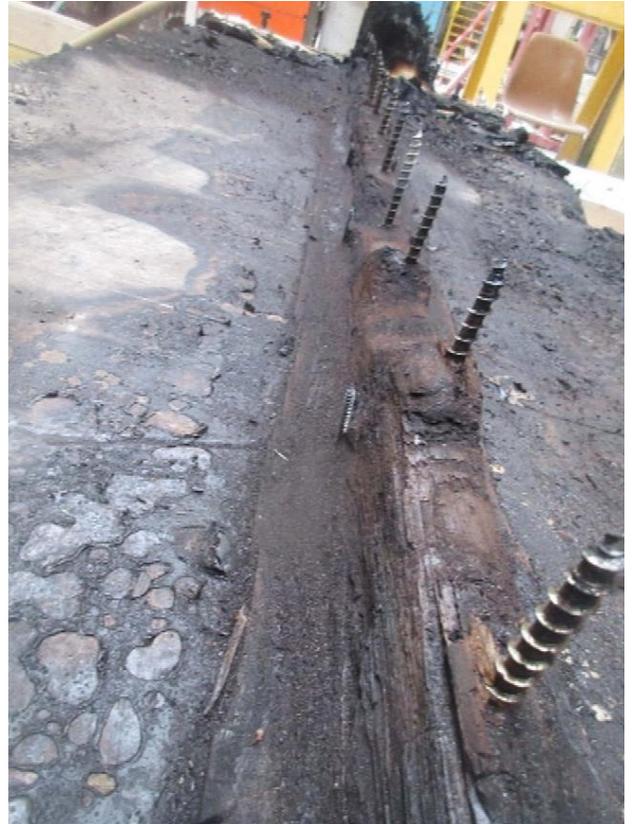


Chute de parties du panneau ($t_{fi} = 36$ min)

Figure 19 : Essai GL01 – Vues à $t_{fi} = 33$ et 36 minutes



Après retrait et arrosage (2hrs après arrêt de l'essai)



Poutre après retrait du bois carbonisé (2hrs après arrêt de l'essai)

Figure 20 : Essai GL01 – Vues après retrait et arrosage de la maquette

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

La rupture fortement prématurée de la poutre a conduit à une analyse des raisons possibles et une remise en question de la charge appliquée qui sont décrites au §2.7.1.

Compte-tenu des contraintes temporelles de réalisation des essais, l'analyse du corps d'épreuve après retrait et arrosage n'a pu être réalisé que dans un second temps.

Compte-tenu de la poursuite de la carbonisation pendant 2 heures après extinction du four, cette analyse n'a pas été facilitée, la section résiduelle étant fortement réduite par rapport à la section à l'arrêt de l'essai.

S'il est difficile de déterminer si la fissure longitudinale observée à $t_{fi} = 17$ min était un signe avant-coureur de la rupture à $t_{fi} = 27$ min ou simplement un faïençage de carbonisation fortuitement linéaire et axé sur la poutre, l'observation des deux extrémités de la poutre a été plus instructive.

Il apparaît clairement (partie gauche de la Figure 21) une fissure longitudinale à l'axe des vis sur la hauteur de la poutre dans l'épaisseur saine (non carbonisée) du bois à une extrémité de la poutre. Cette situation contraste significativement avec la situation à l'autre extrémité (partie droite de la Figure 21). Ce faciès de rupture s'apparente à celui d'une rupture par cisaillement de bloc.

On note que cette fissure s'étend sur plus d'une lamelle de bois lamellé-collé, excluant ainsi une fissure localisée dans une seule lamelle. On rappelle que la profondeur de pénétration de la vis est de 120 mm, et pénètre ainsi intégralement ou significativement 3 lamelles successives. Néanmoins, une amorce de fissure localisée peut avoir été un facteur aggravant. De même, une éventuelle rotation de la poutre peut avoir induit des efforts de traction transversales venant aggraver le phénomène.

La proximité de la vis avec l'extrémité de la poutre (qui respecte cependant la distance minimale définie de la NF N 1995-1-1) peut avoir un effet amplificateur du phénomène.

- ⇒ Ces observations tendent à confirmer une rupture par excès de chargement, potentiellement aggravée par une amorce de fissure localisée ou une variabilité de résistance défavorable, et ainsi la pertinence de remise en question de la charge appliquée lors de l'essai.



Après retrait et arrosage (2hrs après arrêt de l'essai)



Poutre après retrait du bois carbonisé (2hrs après arrêt de l'essai)

Figure 21 : Essai GL01 – Vue des extrémités de la poutre bois après retrait et arrosage

COMMENTAIRE :

On note que la rupture prédite pour la poutre GL01 par le calcul dans les conditions d'essai se situe autour de 35 minutes, pour une rupture effective observée à $t_{fi} = 27$ minutes. Si l'écart est encore important, l'ordre de grandeur est tout à fait parlant.

On note le faciès arrondi de la section de bois non carbonisé dans l'angle avec la dalle béton. Ceci illustre un phénomène connu d'effet « moignon » dans les angles qui traduit une vitesse de combustion plus faible au droit des angles droits que celle observée en partie courante.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

3.1.2 POUTRE GL02

Rappel des éléments clés de la configuration de l'essai :

- Poutre GL24h 162 x 215 mm avec 2 rangées de vis Simpson ESCR 10.0x160 à 90° (e = 150 mm)
- Coffrage perdu en OSB/3 de 18 mm filant avec film PE sur la 1/2 largeur uniquement
- Flexion 3 points avec charge vérin de 31,0 kN

Les principales observations faites lors de l'essai sont :

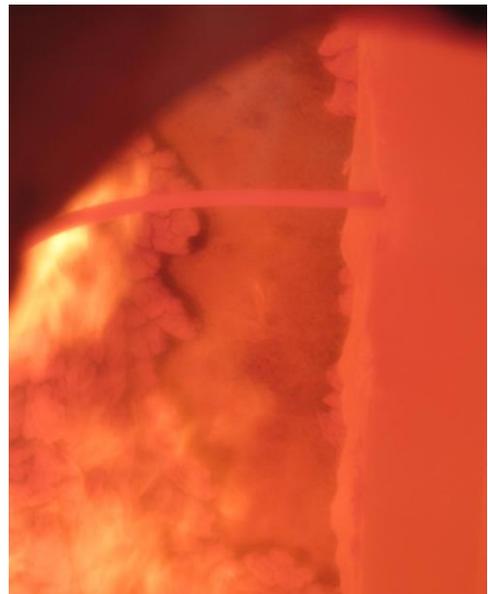
- $t_{fi} = 30$ minutes : aucune évolution notable (le panneau et la poutre sont intégralement faïencés depuis $t_{fi} = 10$ min)
- $t_{fi} = 35$ à 41 minutes : décollement partiel et début de chute de parties du panneau de coffrage ; dalle béton visible
- $t_{fi} = 43$ minutes : apparition de tâches de condensation et de fissures transversales sur la dalle béton en face non exposée
- $t_{fi} = 52$ minutes : écaillage du béton dans la zone où le panneau a chuté en premier
- $t_{fi} = 62$ minutes : arrêt de l'essai

La carbonisation de la poutre s'est poursuivie après l'extinction du four rendant le retrait de la maquette difficile à réaliser en sécurité. En conséquence, le retrait et l'arrosage de la maquette n'ont été réalisés qu'environ 3 heures après l'arrêt de l'essai.

⇒ En conséquence, les mesures de section résiduelles visées dans le rapport ont été réalisées après retrait, arrosage et refroidissement, soit après une carbonisation de l'ordre de 4 heures (au lieu de 62 minutes d'exposition dans le four). Ces données ne sont donc pas directement exploitables.



Décollement du panneau ($t_{fi} = 35$ min)



Chute de parties du panneau ($t_{fi} = 41$ min)

Figure 22 : Essai GL02 – Vues à $t_{fi} = 35$ et 41 minutes



Tâches de condensation ($t_{fi} = 43$ min)



Fissures transversales ($t_{fi} = 43$ min)

Figure 23 : Essai GL02 – Vues à $t_{fi} = 43$ minutes

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



Ecaillage du béton ($t_{fi} = 52$ min)



Ecaillage du béton ($t_{fi} = 52$ min)

Figure 24 : Essai GL02 – Vues à $t_{fi} = 52$ minutes

Lors des trois heures séparant l'arrêt de l'essai du retrait et de l'arrosage de la maquette, la carbonisation des extrémités de la poutre s'est poursuivie jusqu'à être intégrale, ne laissant de bois qu'au niveau du tiers central de la portée.



Après retrait et arrosage (3hrs après arrêt de l'essai)



Poutre après retrait du bois carbonisé (3hrs après arrêt de l'essai)

Figure 25 : Essai GL02 – Vues après retrait et arrosage de la maquette

Aucune rupture n'a été observée durant les 62 minutes d'exposition au feu, satisfaisant ainsi à l'objectif visé.

COMMENTAIRE :

On rappelle que la rupture prédite pour la poutre GL02 par le calcul dans les conditions d'essai se situe autour de 60 minutes pour une charge de 37,5 kN et non de 31 kN. Le même calcul réalisé avec une charge de 31 kN donne un taux de travail maximum de l'ordre de 90% à 60 minutes pour l'assemblage. Il convient donc de relativiser l'observation de non rupture.

On note ici (comme pour la poutre GL01 d'ailleurs) la confirmation de l'effet « moignon » dans les angles qui traduit une vitesse de combustion plus faible au droit des angles droits que celle observée en partie courante.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

3.1.3 POUTRE GL03

Rappel des éléments clés de la configuration de l'essai :

- Poutre GL24h 112 x 215 mm avec 1 rangée de vis SPAX 10.0x180 à 45° (e = 100 mm)
- Coffrage perdu en panneau de particules de 19 mm interrompu (contact direct bois-béton) sans film PE
- Flexion 3 points avec charge vérin de 19,0 kN

Les principales observations faites lors de l'essai sont :

- $t_{fi} = 3$ à 17 minutes : apparition de deux lignes de faïençage longitudinales prononcées
- $t_{fi} = 25$ minutes : chute d'éléments de poutre faïencés ; faïençage prononcé du panneau qui ne chute pas
- $t_{fi} = 38$ à 49 minutes : épaissement du faïençage du panneau puis chute de parties du panneau de coffrage à 49 min.
- $t_{fi} = 54$ minutes : dépassement du critère de vitesse de déplacement (flèche augmentant de manière de plus en plus rapide)
- $t_{fi} = 57$ minutes : fracture audible et chute brutale du niveau de chargement
- ⇒ *Il est décidé de retirer le chargement, mais de poursuivre l'essai jusqu'à 60 minutes afin de pouvoir récolter les données sur les autres paramètres (panneau de coffrage, évolutions de température, ...)*
- $t_{fi} = 62$ minutes : arrêt de l'essai

La carbonisation de la poutre s'est poursuivie après l'extinction du four rendant le retrait de la maquette difficile à réaliser en sécurité. En conséquence, le retrait et l'arrosage de la maquette n'ont été réalisés qu'environ 2 heures après l'arrêt de l'essai.

- ⇒ *En conséquence, les mesures de section résiduelles visées dans le rapport ont été réalisées après retrait, arrosage et refroidissement, soit après une carbonisation de l'ordre de 3 heures (au lieu de 62 minutes d'exposition dans le four). Ces données ne sont donc pas directement exploitables.*

La dalle béton, bien que fléchie après l'essai, ne présente aucune fissure apparente.

La Figure 26 ci-dessous illustre les lignes de faïençage longitudinales observée dès $t_{fi} = 3$ minutes et se poursuivant ensuite.

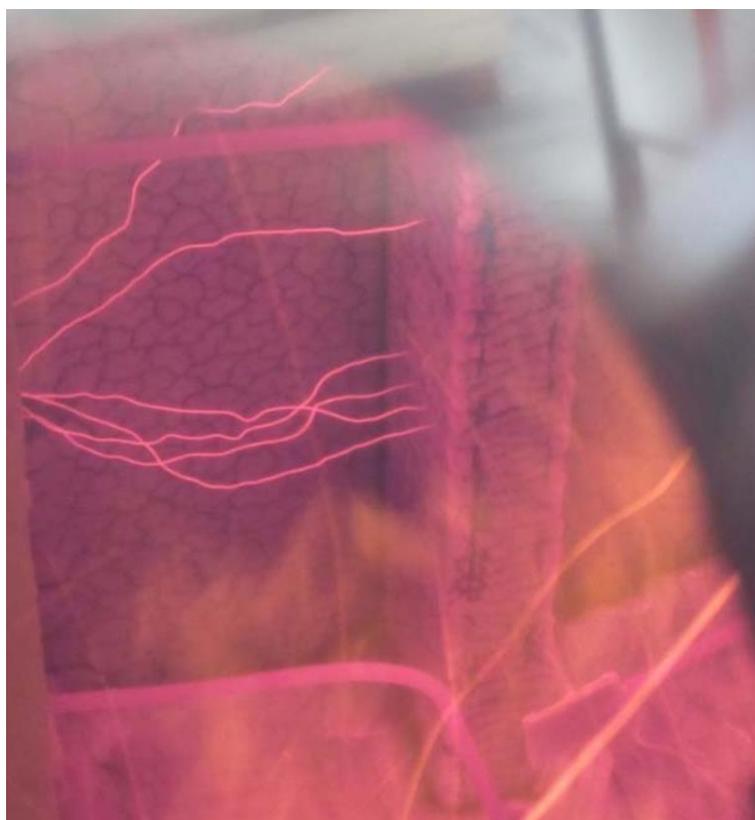


Figure 26 : Essai GL03 – Vue à $t_{fi} = 3$ minutes

- ⇒ *Ceci vient confirmer l'impression lors de l'essai GL01 que la ligne faïençage n'est pas une fissure structurale et n'a pas de lien avec la rupture prématurée de la poutre GL01.*

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



Faïençage du panneau sans chute ($t_{fi} = 25$ min)



Faïençage du panneau sans chute ($t_{fi} = 38$ min)

Figure 27 : Essai GL03 – Vues à $t_{fi} = 25$ et 38 minutes



Après retrait et arrosage (2hrs après arrêt de l'essai)



Poutre après retrait du bois carbonisé (2hrs après arrêt de l'essai)

Figure 28 : Essai GL03 – Vues après retrait et arrosage de la maquette

La rupture n'a été observée après 57 minutes d'exposition au feu, à proximité de l'objectif visé.

COMMENTAIRE :

On rappelle que la rupture de l'assemblage prédite pour la poutre GL03 par le calcul dans les conditions d'essai avec une charge de 19 kN pouvait se produire entre la 50^{ème} et 60^{ème} minutes. Le résultat peut donc être considéré comme satisfaisant.

On note ici également l'effet « moignon » dans les angles qui traduit une vitesse de combustion plus faible au droit des angles droits que celle observée en partie courante.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

3.1.4 POUTRE GL04

Rappel des éléments clés de la configuration de l'essai :

- Poutre GL24h 162 x 215 mm avec 2 rangées de vis SPAX 10.0x180 à 45° (e = 100 mm)
- Coffrage perdu en contreplaqué de 18 mm interrompu (contact direct bois-béton) sans film PE
- Flexion 3 points avec charge vérin de 26,0 kN

Les principales observations faites lors de l'essai sont :

- $t_{fi} = 30$ minutes : aucune évolution notable (le panneau et la poutre sont intégralement faïencés depuis $t_{fi} = 13$ min)
- $t_{fi} = 34$ à 35 minutes : chute de parties du panneau de coffrage ; dalle béton visible
- $t_{fi} = 45$ minutes : apparition de fissures en arc de cercle et d'une fissure longitudinale sur la dalle béton en face non exposée
- $t_{fi} = 48$ à 58 minutes : poursuite des chutes de parties de panneau et de poutre
- $t_{fi} = 62$ minutes : arrêt de l'essai

La carbonisation de la poutre s'est poursuivie après l'extinction du four rendant le retrait de la maquette difficile à réaliser en sécurité. En conséquence, le retrait et l'arrosage de la maquette n'ont été réalisés qu'environ 1,5 heures après l'arrêt de l'essai.

⇒ En conséquence, les mesures de section résiduelles visées dans le rapport ont été réalisées après retrait, arrosage et refroidissement, soit après une carbonisation de l'ordre de 3,5 heures (au lieu de 62 minutes d'exposition dans le four). Ces données ne sont donc pas directement exploitables.

La dalle béton ne présente aucune fissure apparente et présente une flèche résiduelle peu visible.



Faïencage du panneau sans chute ($t_{fi} = 19$ min)



Faïencage du panneau sans chute ($t_{fi} = 32$ min)

Figure 29 : Essai GL04 – Vues à $t_{fi} = 19$ et 32 minutes

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



Chute de parties du panneau de coffrage ($t_{fi} = 34$ min)



Chute de parties du panneau de coffrage ($t_{fi} = 48$ min)

Figure 30 : Essai GL04 – Vues à $t_{fi} = 34$ et 48 minutes



Fissure longitudinale
située à mi-largeur

Fissures en arc
de cercle

Fissures en arc de cercle et longitudinale sur la dalle béton en face non exposée

Figure 31 : Essai GL04 – Vue à $t_{fi} = 45$ minutes

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



Poutre au retrait du four (1h30 après arrêt de l'essai)

Figure 32 : Essai GL04 – Vues au retrait de la maquette



Après arrosage et retrait du bois carbonisé (1hr 30 après arrêt de l'essai)

Figure 33 : Essai GL04 – Vues après arrosage de la maquette et retrait du bois carbonisé

Aucune rupture n'a été observée durant les 62 minutes d'exposition au feu, satisfaisant ainsi à l'objectif visé.

COMMENTAIRE :

On rappelle que la rupture de l'assemblage prédite pour la poutre GL04 par le calcul dans les conditions d'essai avec une charge de 26 kN pouvait se produire autour de la 60^{ème} minutes. Le résultat peut donc être considéré comme satisfaisant.

On note ici également l'effet « moignon » dans les angles qui traduit une vitesse de combustion plus faible au droit des angles droits que celle observée en partie courante.

Sans surprise, le retrait de la maquette du four plus tôt que pour les autres poutres, permis par une continuation de carbonisation moins longue, permet d'observer une section uniforme de bois non carbonisé où mes vis ne sont pas (ou à peine) découvertes.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

3.1.5 SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS

Le tableau ci-dessous présente de manière synthétique les observations réalisées lors des 4 essais.

Tableau 8 : Synthèse des observations lors des essais

| Configuration | GL01 | GL02 | GL03 | GL04 |
|-------------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| Panneau de coffrage | 3 plis (19 mm) | OSB (18 mm) | P. Particules (19 mm) | Contreplaqué (18 mm) |
| | Filant | | Interrompu | |
| | Film PE | Film PE partiel | Sans film PE | |
| Poutre GL24h | 112 x 215 mm | 162 x 215 mm | 112 x 215 mm | 162 x 215 mm |
| Assemblage | Simpson ESCR 10.0x160 @ 150 mm à 90° | | SPAX 10.0x180 inox A2 @ 100 mm à 45° | |
| | 1 rangée | 2 rangées | 1 rangée | 2 rangées |
| Charge appliquée | 31,0 kN | 31,0 kN | 19,0 kN | 26,0 kN |
| Observations clés | | | | |
| $t_{fi} = 10$ à 17min | Faïencage intégral de la poutre et du panneau | | | |
| $t_{fi} = 27$ min | Fracture Retrait de la charge | | | |
| $t_{fi} = 30$ min | Aucune évolution notable | | | |
| $t_{fi} = 33$ min | Décollement panneau | | | |
| $t_{fi} = 34$ min | | Décollement panneau | | Chute de panneau |
| $t_{fi} = 36$ min | Chute de panneau | | | |
| $t_{fi} = 41$ min | | Chute de panneau | | |
| $t_{fi} = 43$ min | | Tâches de condensation Fissures transversales (face non exposée) | | |
| $t_{fi} = 45$ min | Suintement (face non exposée) | | | Fissures en arc de cercle (face non exposée) |
| $t_{fi} = 49$ min | | | Chute de panneau | |
| $t_{fi} = 52$ min | | Ecaillage du béton | | |
| $t_{fi} = 54$ min | | | Déplacement excessif | |
| $t_{fi} = 57$ min | | | Fracture Retrait de la charge | |
| $t_{fi} = 62$ min | Arrêt de l'essai | Arrêt de l'essai | Arrêt de l'essai | Arrêt de l'essai |
| Synthèse | | | | |
| Chute de panneau | 33 (36) min | 34 (41) min | 49 min | 34 min |
| Rupture | 27 min | - | 54 (57) min | - |

Note : On retient pour la chute de panneau ou la rupture le premier phénomène assimilable à une chute ou rupture. On indique entre parenthèse le temps auquel a été observé précisément la chute ou la rupture.

COMMENTAIRE :

La rupture prématurée de la poutre GL01 est à mettre en relation avec une surestimation de la charge appliquée (cf. §2.7 et 3.1.1).

On note les observations générales suivantes :

- ⇒ Le panneau de coffrage joue (visiblement) un rôle de protection de la dalle béton pendant 30 à 40 minutes.
- ⇒ La chute du panneau de coffrage intervient au-delà de 30 minutes (33 à 41) et même à 49 minutes pour le panneau de particules, indiquant une vitesse de combustion sur support béton 1,5 à 2 fois inférieure à celle de la NF EN 1995-1-1.
- ⇒ L'objectif de l'essai a été atteint pour les poutres GL02 à GL04. Avant étude plus précise, il semble que le modèle FIT soit raisonnablement applicable.
- ⇒ Aucune incidence de la présence ou non du film PE n'a été relevée.

4 ANALYSE DES MESURES ET RESULTATS

Dans ce qui suit, on s'intéressera notamment :

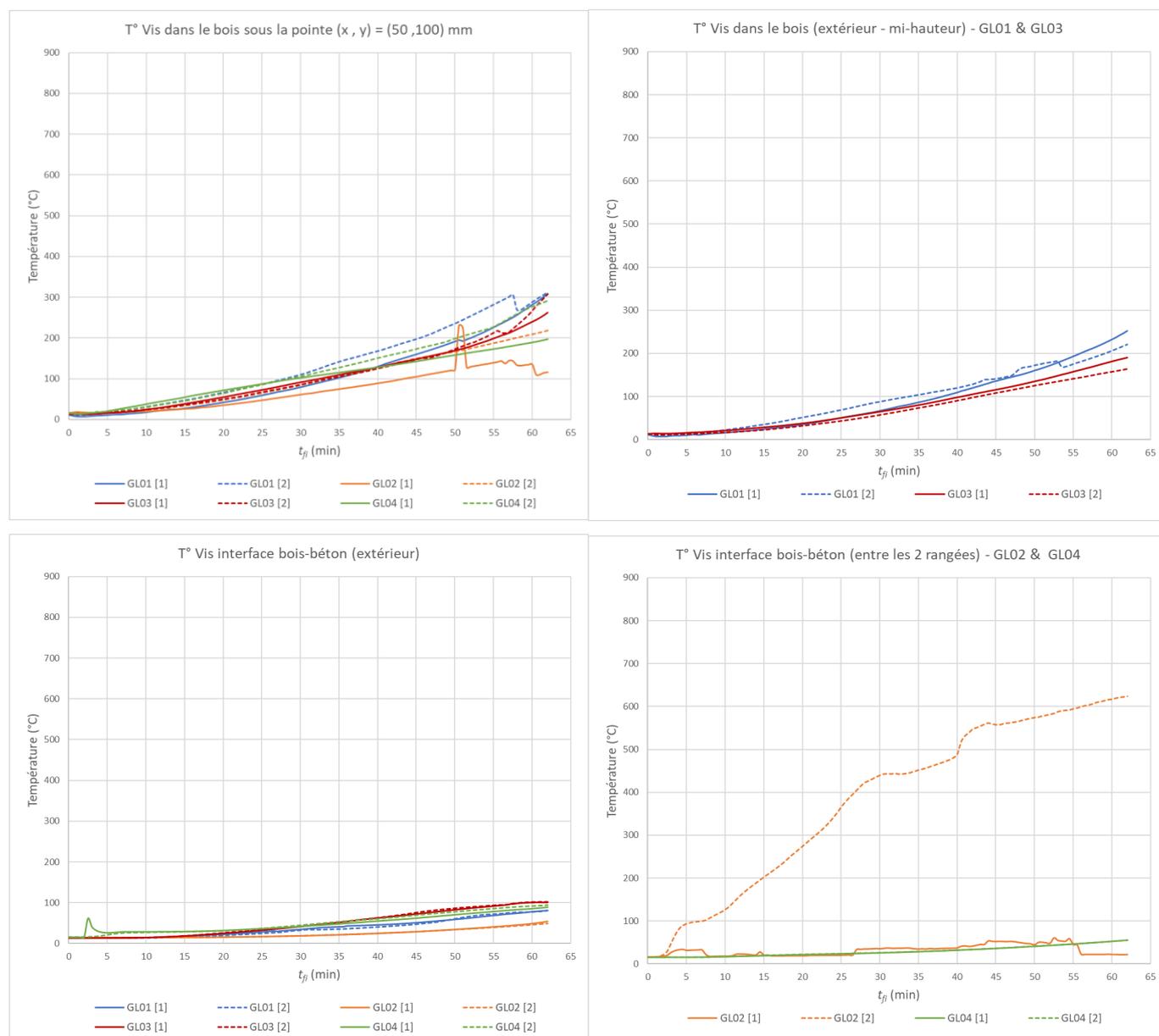
- A l'isotherme 100°C pour lequel la perte de résistance et de raideur de l'acier selon NF EN 1993-1-2 est négligeable ; et
- A l'isotherme 300°C retenu par le §3.4.1(4) de la NF EN 1995-1-2 comme ligne de carbonisation du bois.

4.1.1 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU DROIT DES VIS

Les graphes ci-dessous présentent les courbes de température relevées par les thermocouples d'intérêt pour les vis.

On observe (Figure 34 ci-après) que :

- La température sous la pointe de la vis dans le bois reste inférieure à 300°C, en s'en approchant autour de $t_{fi} = 60$ min.
- La température à mi-hauteur des vis dans le bois (poutres GL01 et GL03) reste nettement inférieure à 300°C.
- La température à l'interface entre le bois (panneau ou poutre) et le béton côté extérieur de la poutre, ainsi qu'à mi-hauteur de la vis dans le béton reste inférieure à 100°C, en s'en approchant autour de $t_{fi} = 60$ min.
- La température de la vis entre les 2 rangées (poutres GL02 et GL04) et en tête de vis dans le béton reste nettement inférieure à 100°C.



NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

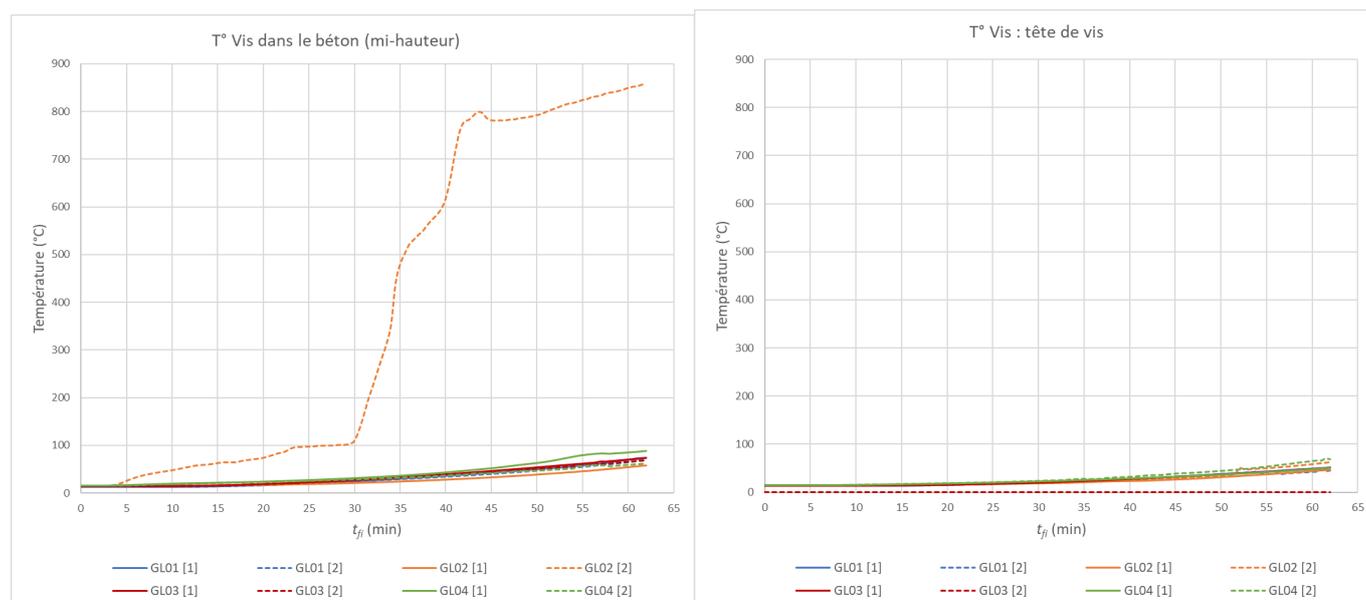


Figure 34 : Evolution de la température au droit des vis

Ces évolutions sont conformes à ce qui était attendu.

⇒ L'évolution de la température au droit des vis est essentiellement liée à l'évolution de la protection apportée par le bois non carbonisé, la partie dans le béton étant protégée par ce dernier.

COMMENTAIRE :

Les courbes GL02 [2] qui divergent fortement du faisceau cohérent de courbes ont été ignorées pour l'analyse, relevant de manière évidente d'un dysfonctionnement du thermocouple correspondant.

A l'exception de ces dysfonctionnements (et de quelques autres anomalies ponctuelles) le faisceau de courbes à chaque point de mesure est très cohérent, montrant la répétabilité du comportement dans le temps à configuration/localisation identique.

4.1.2 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS LE BETON

Les graphes ci-dessous présentent les courbes de température relevées par les thermocouples d'intérêt pour la dalle béton.

Les graphes sont présentés à échelle identique afin de permettre une comparaison directe entre les différents points de mesure.

On observe (Figure 35 ci-après) que :

- La température à 0 mm (interface entre le panneau de coffrage et le béton) reste inférieure à 100°C jusqu'au tour de $t_{fi} = 33 - 35$ min, qui correspond à peu près au début de chute de parties de panneau de coffrage observées lors des essais, et augmente plus rapidement ensuite.
- L'évolution observée à 0 mm l'est également à 15 mm (mi-hauteur d'enrobage du treillis soudé) et 30 mm (au droit du treillis soudé) avec respectivement un décalage d'environ 7 à 10 et 15 à 18 minutes.
- L'évolution à 40 mm (mi-hauteur de la dalle) est très similaire à celle au droit du treillis soudé, ce qui s'explique notamment par la proximité réelle entre les deux points de mesure, compte-tenu notamment de l'épaisseur réelle du treillis.
- La température de la face non exposée reste nettement inférieure à 100°C, sauf dans certains cas où elle est atteinte après environ 50 minutes.

Ces évolutions sont conformes à ce qui était attendu.

⇒ L'évolution de la température du béton est essentiellement liée à la durée de protection apportée par la carbonisation du panneau de coffrage.

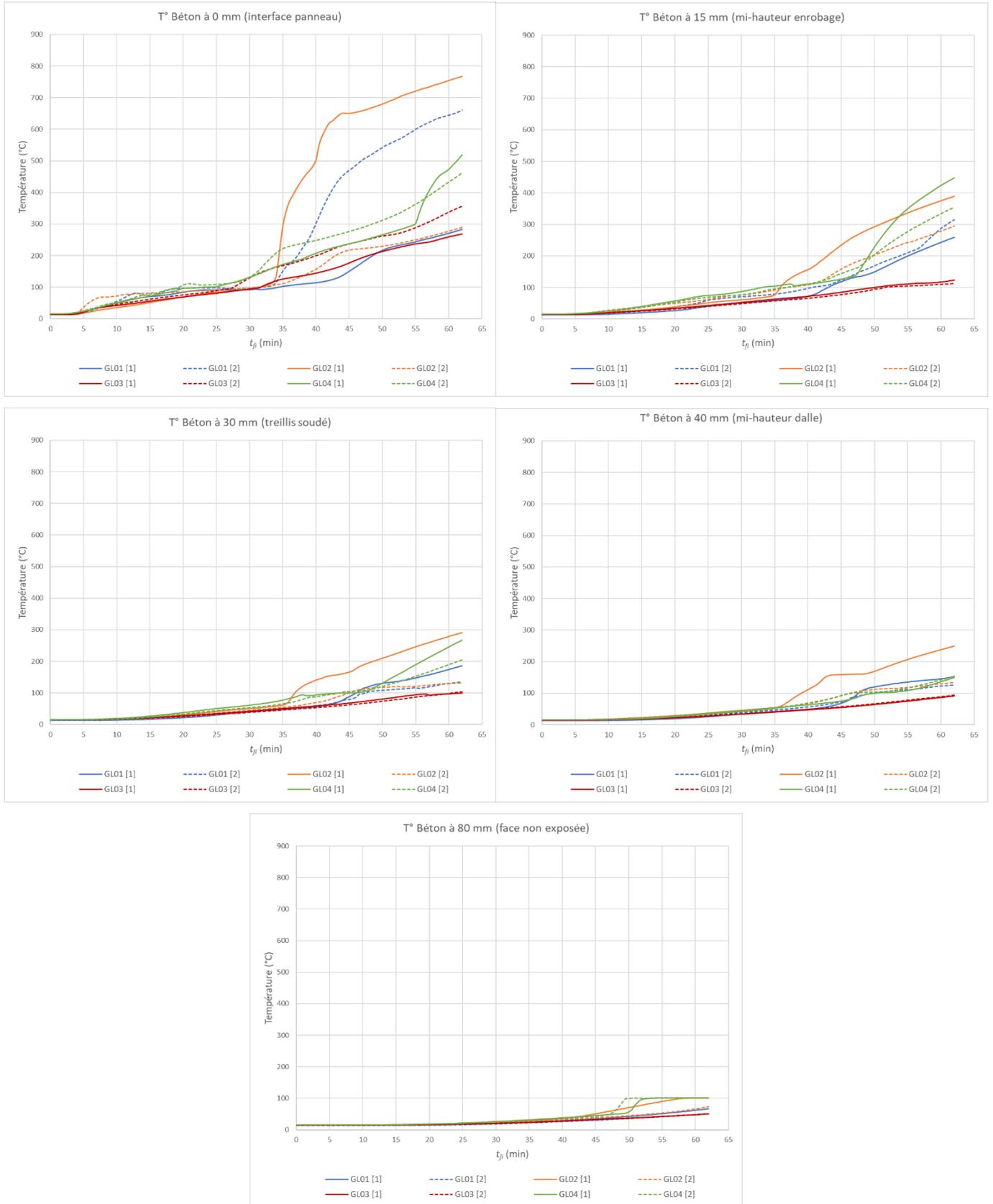
COMMENTAIRE :

La température à 0 ou 15 mm peut être impactée par une chute de parties de panneau localisée à proximité du thermocouple. Ceci explique notamment les fortes variations des courbes GL01 [2] et GL02 [1] à 0 mm après un peu plus de 30 minutes.

De même, la température de la face non exposée peut être impactée par la présence d'une fissure localisée à proximité du thermocouple et le suintement de vapeur d'eau qui se propage par celle-ci. Ceci explique notamment les courbes GL04 [1] et [2].

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



(ces graphes sont également disponibles en grand format en Annexe A.2)

Figure 35 : Evolution de la température dans le béton

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

4.1.3 VITESSE DE COMBUSTION DU PANNEAU

Compte-tenu de la faible épaisseur du panneau de coffrage (19 ou 19 mm) il n'est pas apparu opportun d'instrumenter ce dernier dans son épaisseur.

L'évaluation de la vitesse de combustion du panneau de coffrage peut donc se faire par l'analyse conjuguée :

- Des observations faites lors de l'essai (faïençage, chutes de parties de panneau), et
- De l'analyse des courbes de température du béton à 0 mm (interface du béton avec le panneau) et à 15 mm voire 30 mm.

On rappelle les observations issues de la synthèse des observations (§3.1.5 et Tableau 8) :

- Le panneau de coffrage joue (visiblement) un rôle de protection de la dalle béton pendant 30 à 40 minutes.
- La chute du panneau de coffrage intervient au-delà de 30 minutes (33 à 41) et même à 49 minutes pour le panneau de particules, indiquant une vitesse de combustion sur support béton 1,5 à 2 fois inférieure à celle de la NF EN 1995-1-1.
- Aucune incidence de la présence ou non du film PE n'a été relevée.

L'analyse des courbes de température dans le béton confirme les observations visuelles :

- La température à 0 mm (interface entre le panneau de coffrage et le béton) reste inférieure à 100°C jusqu'au début de chute de parties de panneau de coffrage observées lors des essais, et augmente plus rapidement ensuite.
- L'évolution observée à 0 mm l'est également à 15 mm (mi-hauteur d'enrobage du treillis soudé) et 30 mm (au droit du treillis soudé) avec respectivement un décalage d'environ 7 à 10 et 15 à 18 minutes.

Le Tableau 9 ci-dessous indique :

- La vitesse de combustion des panneaux concernés déterminée selon NF EN 1995-1-2 ;
- Le temps d'exposition relevé lors de l'observation du premier phénomène de perte de cohésion du panneau avec le béton ;
- Le temps d'exposition correspondant à l'inflexion de la courbe de température du béton à 0 mm (interface avec le panneau) ;
- Le temps de protection retenu et la vitesse de combustion qui en découle.

Tableau 9 : Vitesse de combustion unidimensionnelle du panneau de coffrage observée lors des essais

| Configuration | GL01 | GL02 | GL03 | GL04 |
|---|---|-------------|-----------------------|----------------------------------|
| Panneau de coffrage | 3 plis (19 mm) | OSB (18 mm) | P. Particules (19 mm) | Contreplaqué (18 mm) |
| Observations clés | | | | |
| $t_{fi} = 10$ à 17min | Faïençage intégral de la poutre et du panneau | | | |
| Chute de panneau ¹⁾ | 33 (36) min | 34 (41) min | 49 min | 34 min |
| Inflexion de la courbe de T° ²⁾ | 34 (43) min | 34 (36) min | 28 (32) min | 31 (54) min |
| Vitesse de combustion | | | | |
| NF EN 1995-1-2 | 1,05 – 1,09 mm/min ³⁾ | 0,86 mm/min | 0,80 mm/min | 1,05 – 1,12 mm/min ³⁾ |
| Vitesse observée $t_f = 33$ min ⁴⁾ | 0,58 mm/min | 0,55 mm/min | 0,58 mm/min | 0,55 mm/min |
| Ratio Essai (33 min) / EC5 | 1,81 – 1,88 | 1,55 | 1,34 | 1,91 – 2,02 |
| Vitesse observée $t_f = 30$ min ⁴⁾ | 0,63 mm/min | 0,60 mm/min | 0,63 mm/min | 0,60 mm/min |
| Ratio Essai (30 min) / EC5 | 1,67 – 1,73 | 1,42 | 1,27 | 1,75 – 1,85 |

¹⁾ On retient pour la chute de panneau ou la rupture le premier phénomène assimilable à une chute ou rupture. On indique entre parenthèse le temps auquel a été observé précisément la chute ou la rupture.

²⁾ On indique la valeur des deux courbes pour chaque poutre, la valeur entre parenthèse étant la plus élevée.

³⁾ Selon l'hypothèse de masse volumique caractéristique retenue (320 à 350 kg/m³ pour le 3 plis ; 400 à 450 kg/m³ pour le contreplaqué)

⁴⁾ Le temps de rupture moyen observé est de 33 minutes. Retenir 30 minutes représente une sécurité supplémentaire de 10%.

La vitesse de combustion unidimensionnelle observée se situe entre 0,55 et 0,58 mm/min sur la base des temps de référence décrits plus haut qui sont de 33 à 34 minutes.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Pour le panneau de particules, compte-tenu de l'écart entre le moment de la chute de parties de panneau à 49 minutes et le point d'inflexion de la courbe de température entre 28 et 32 minutes, il apparaît raisonnable de retenir un temps de référence du même ordre que pour les autres panneaux (33 minutes en moyenne).

Compte-tenu des incertitudes liées notamment à la représentativité des panneaux effectivement utilisés, il paraît raisonnable de retenir un temps de référence réduit à 30 minutes (soit une marge de sécurité de 10% par rapport aux observations des essais).

La vitesse de combustion unidimensionnelle déduite sur la base d'un temps de référence de 30 minutes se situe entre 0,60 et 0,63 mm/min.

Ces vitesses sont significativement inférieures à celles déterminées par l'application de la NF EN 1995-1-1, §3.4.2(8) et (9).

Compte-tenu de la vitesse de combustion unidimensionnelle du LVL (0,65 mm/min) et du contreplaqué (1,0 mm/min) selon le Tableau 3.1 de la NF EN 1995-1-2 et de celle observée pour ce dernier lors des essais, il paraît raisonnable (voire sécuritaire) d'étendre au LVL les observations faites pour le contreplaqué.

En outre, il est remarquable que la durée de protection soit quasiment identique pour les 4 panneaux testés dont l'épaisseur est proche (entre 18 et 19 mm).

Cette durée de protection joue un rôle dans la détermination de la durée d'exposition de la dalle béton pour son calcul selon NF EN 1992-1-2, et sur l'évaluation de l'évolution du module d'élasticité du béton pour le calcul de la rigidité efficace à la durée de résistance visée t_{fi} .

Il semble donc raisonnable de considérer l'une des approches suivantes pour définir le temps de protection de la dalle béton apporté par un panneau de coffrage en SWP, OSB, contreplaqué, LVL ou de particules :

- (a) Définir une vitesse de combustion unidimensionnelle de référence $\beta_{0,c}$ sur substrat béton pour ces panneaux en lieu et place des valeurs du Tableau 3.1 d) de la NF EN 1995-1-2 – la formule (3.4) devient alors :

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_{0,c} \cdot k_\rho \cdot k_h = \beta_{0,c} \cdot \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \cdot \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad \text{avec } \beta_{0,c} \text{ tel que proposé dans le Tableau 10 ci-dessous ; ou}$$

- (b) Définir une vitesse de combustion unidimensionnelle $\beta_{0,\rho,c}$ sur substrat béton indépendante de la masse volumique du panneau et variant uniquement avec son épaisseur – la formule (3.4) devient alors :

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_{0,\rho,c} \cdot k_h = \beta_{0,\rho,c} \cdot \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad \text{avec } \beta_{0,\rho,c} \text{ tel que proposé dans le Tableau 10 ci-dessous ; ou}$$

- (c) Considérer qu'un panneau à base de bois (SWP, OSB, contreplaqué, LVL ou de particules) d'épaisseur minimale 18 mm apporte une protection de 30 minutes.

Tableau 10 : Vitesse de combustion unidimensionnelle du panneau de coffrage proposée (mm/min)

| Panneau de coffrage | SWP 3 plis (19 mm) | OSB (18 mm) | P. Particules (19 mm) | Contreplaqué ou LVL (18 mm) |
|--|-----------------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|
| NF EN 1995-1-2 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 |
| qui donne $\beta_{0,\rho,t} = ^1$ | 1,05 – 1,09 | 0,86 | 0,80 | 1,05 – 1,12 |
| Vitesse observée $t_f = 30$ min | 0,63 | 0,60 | 0,63 | 0,60 |
| (a) Valeur proposée $\beta_{0,c}$ | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,60 |
| qui donne $\beta_{0,\rho,t} = ^1$ | 0,64 – 0,67 | 0,62 | 0,67 | 0,63 – 0,67 |
| (b) Valeur proposée $\beta_{0,\rho,c}$ | 0,60 | | | |
| qui donne $\beta_{0,\rho,t} = ^1$ | 0,62 | 0,63 | 0,62 | 0,63 |

¹⁾ Valeur obtenue pour les épaisseurs de panneau de l'essai (18 ou 19 mm) et selon l'hypothèse de masse volumique caractéristique retenue (320 à 350 kg/m³ pour le 3 plis ; 400 à 450 kg/m³ pour le contreplaqué)

⇒ La durée de protection du béton par le panneau de coffrage est de 30 minutes pour un panneau (SWP, OSB, contreplaqué, LVL ou de particule) d'épaisseur minimale 18 mm.

⇒ Afin de permettre la prise en compte d'autres épaisseurs, il est proposé de nouvelles valeurs de vitesse de combustion unidimensionnelle de ces panneaux à base de bois sur substrat béton de l'ordre de 0,55 à 0,75 mm/min, différenciées ou non en fonction de la masse volumique caractéristique (Tableau 10).

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

COMMENTAIRE :

La proposition (a) ne modifie pas le principe d'application de la formule (3.4) de la NF EN 1995-1-2. Les données sur les masses volumiques caractéristiques des panneaux utilisés lors des essais ne sont cependant pas connues, et la correction correspondante ne peut donc être confirmée par les essais réalisés ici.

La proposition (c) a le mérite de la simplicité et de refléter exactement les observations et mesures des essais. Il n'est cependant pas rare que le panneau de coffrage aie une épaisseur supérieure à 18-19 mm. Cette approche peut donc être réductrice.

La proposition (b) combine l'avantage d'une relative simplicité (vitesse de combustion identique pour tous les panneaux visés), de permettre la prise en compte d'épaisseurs différentes, tout en apportant une petite marge de sécurité complémentaire.

4.1.4 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS LE BOIS

Les graphes ci-dessous présentent les courbes de température relevées par les thermocouples d'intérêt pour la poutre bois.

Les graphes sont présentés à échelle identique afin de permettre une comparaison directe entre les différents points de mesure.

On présente tout d'abord les courbes des thermocouples communs à toutes les poutres, positionnés entre les faces (latérale et inférieure) de la poutre et la pointe de la vis (qu'il y ait une ou deux rangées).

On présente dans un second temps les courbes complémentaires concernant les poutres GL02 et GL04 qui sont équipées de thermocouples complémentaires notamment entre les deux rangées de vis.

Thermocouples communs aux poutres GL01 à GL04 (X1 à X5 et X'1 à X'5)

On observe (Figure 36 ci-après) que :

- L'isotherme à 300°C est atteint aux points $(x, y) = (10, 20)$ mm, $(20, 40)$ mm et $(30, 60)$ mm respectivement autour de $t_{fi} = 3 - 6$ min, $15 - 18$ min et $27 - 37$ min.
- L'isotherme à 300°C est atteint aux points $(x, y) = (40, 80)$ mm au-delà de $t_{fi} = 38$ min (allant jusqu'à 55 min).
- La température sous la pointe de la vis dans le bois reste inférieure à 300°C, en s'en approchant autour de $t_{fi} = 60$ min.

Ces évolutions sont conformes à ce qui était attendu.

⇒ Aucune anomalie n'a été relevée concernant la vitesse de combustion du bois.

Thermocouples spécifiques aux poutres GL02 et GL04 à 2 rangées de vis

On observe (Figure 37 ci-après) que :

- La température sous la pointe de la vis dans le bois reste inférieure à 300°C, en s'en approchant autour de $t_{fi} = 60$ min.
- La température entre les deux rangées de vis dans le bois reste majoritairement inférieure à 100°C, et en tout cas inférieure à 150°C.

Ces évolutions sont conformes à ce qui était attendu.

⇒ Aucune anomalie n'a été relevée concernant l'évolution de la température dans le bois entre les rangées de vis.

Thermocouples au droit de l'angle poutre-panneau

On observe (Figure 38 ci-après) que :

- Il y a une forte dispersion des courbes (et un certain nombre de dysfonctionnements de thermocouples) en cette localisation particulièrement complexe à atteindre rendant le positionnement des thermocouples compliqué.
- Les courbes sont décalées par rapport aux courbes des thermocouples dans le bois à $(x, y) = (10, 20)$ mm, ce qui tend à confirmer une vitesse de combustion plus lente dans l'angle, observée également après retrait et arrosage des corps d'épreuve (effet « moignon »).

Cette observation est conforme à ce qui était attendu.

⇒ Le ralentissement de la vitesse de combustion au droit de l'angle poutre-panneau est visible à la lecture des courbes.

COMMENTAIRE :

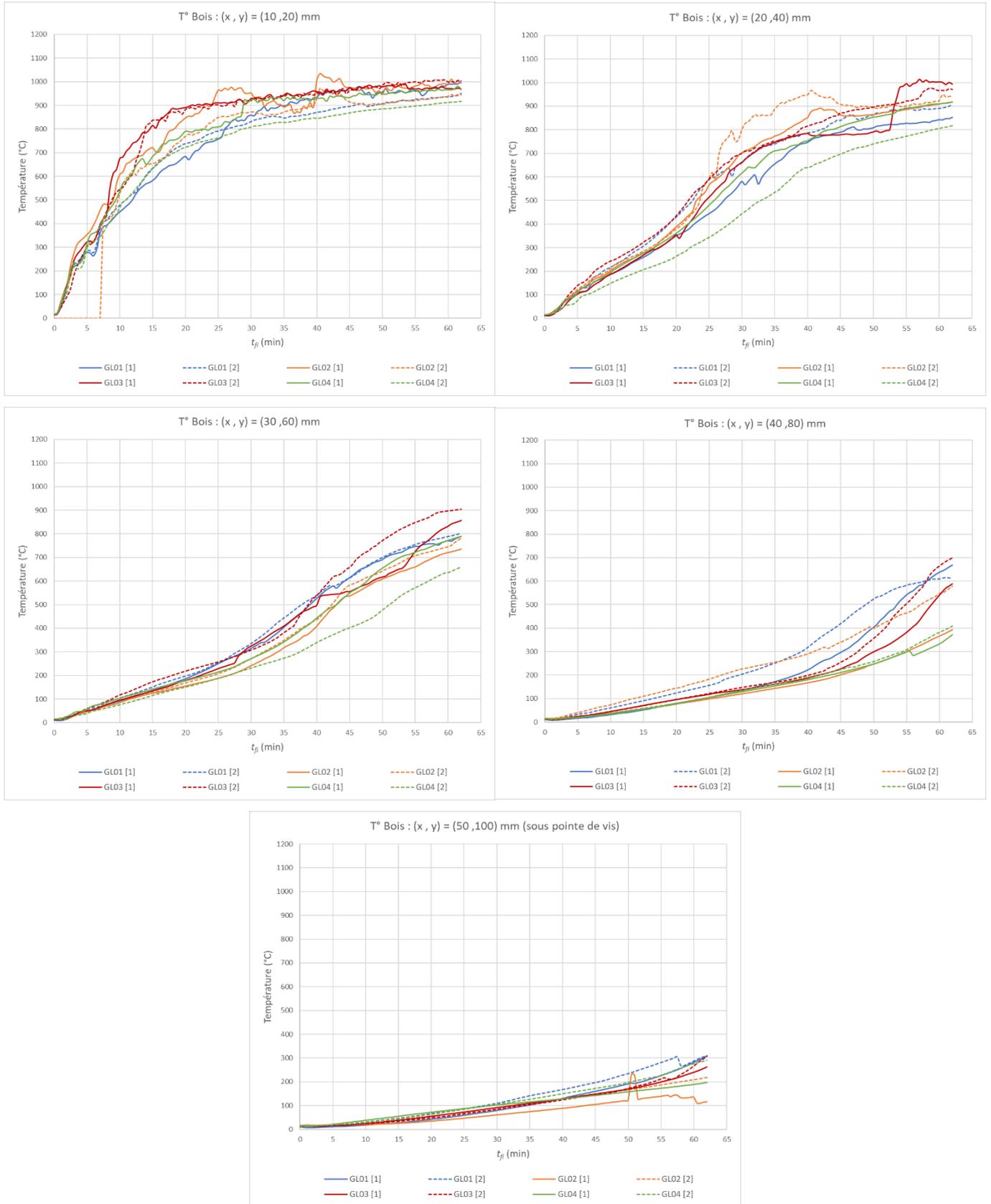
Les courbes GL04 [2] aux points $(x, y) = (70, 140)$ mm et $(80, 160)$ mm, qui divergent fortement du faisceau cohérent de courbes ont été ignorées pour l'analyse, relevant de manière évidente d'un dysfonctionnement du thermocouple correspondant.

A l'exception de ces dysfonctionnements (et de quelques autres anomalies ponctuelles) le faisceau de courbes à chaque point de mesure est cohérent, et de plus en plus cohérent au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'axe de la poutre, montrant la répétabilité du comportement dans le temps à configuration/localisation identique.

De manière générale aucune anomalie n'a été relevée quant à la vitesse de combustion et l'évolution des températures du bois.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

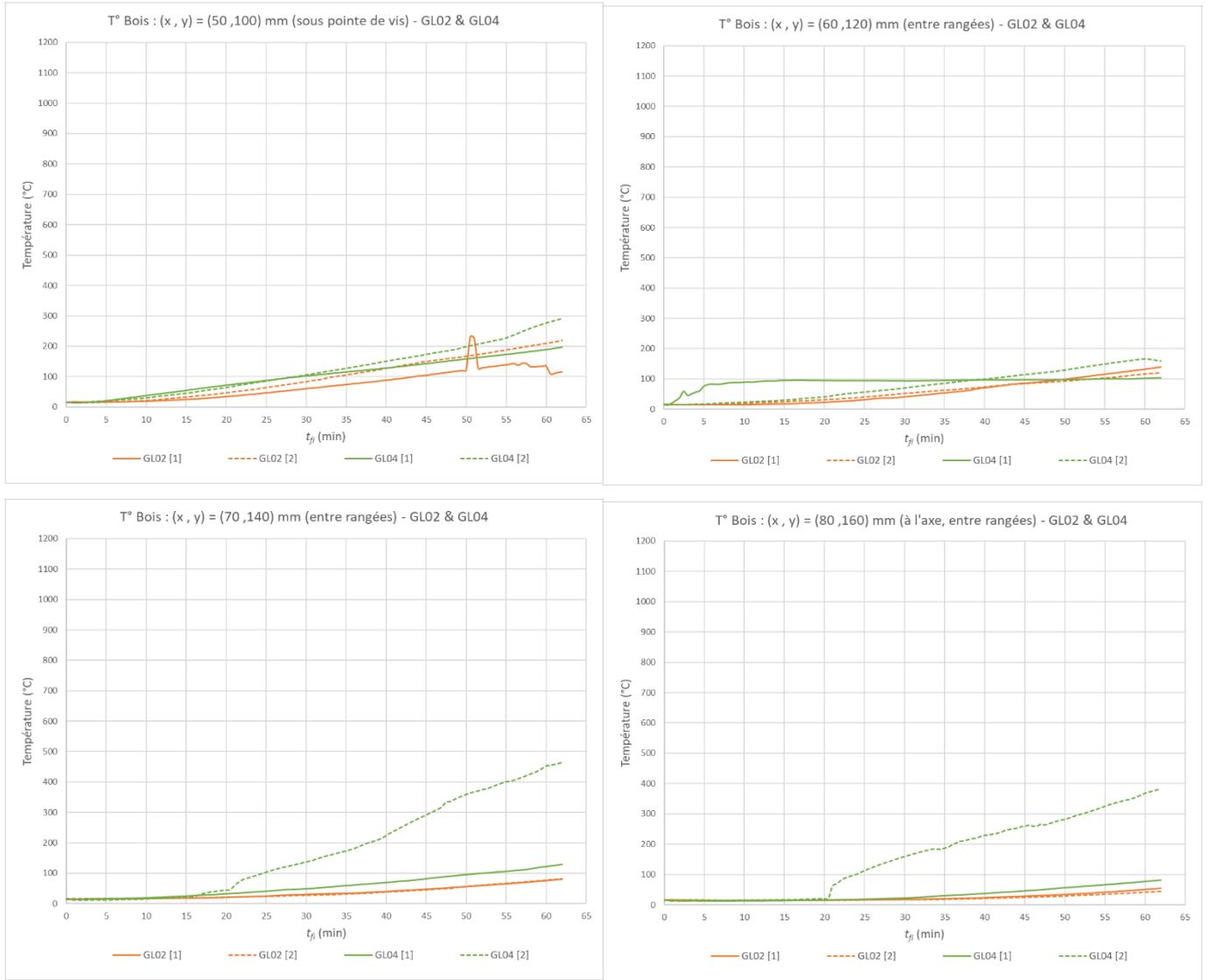


(ces graphes sont également disponibles en grand format en Annexe A.3)

Figure 36 : Evolution de la température dans le bois – Thermocouples communs aux poutres GL01 à GL04

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.



(ces graphes sont également disponibles en grand format en Annexe A.3)

Figure 37 : Evolution de la température dans le bois – Thermocouples spécifiques aux poutres GL02 à GL04

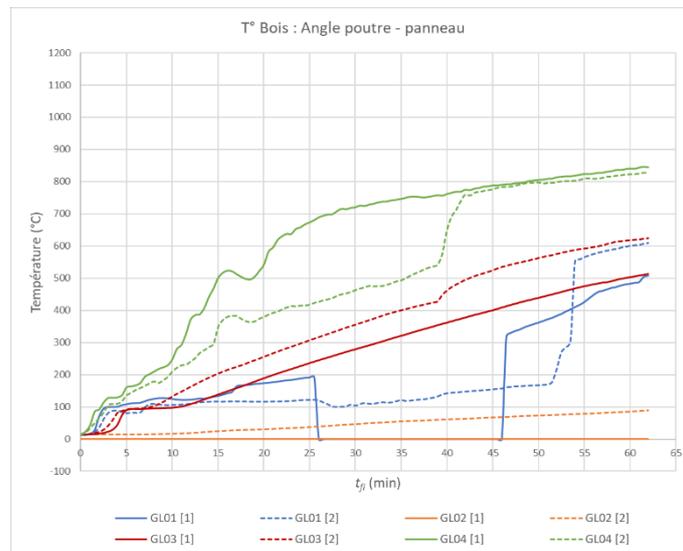


Figure 38 : Evolution de la température dans le bois – Thermocouples au droit de l'angle poutre-panneau

4.1.5 APPLICATION DE LA METHODE FIT AUX VIS A 45°

Rappels concernant la méthode FIT

On rappelle que la méthode FIT a été développée sur la base des travaux d'A. Frangi, en s'appuyant à la fois sur des essais en petit four visant à évaluer l'évolution du comportement des assemblages en fonction de la température et sur des essais de résistance au feu à l'échelle 1:1.

Les solutions d'assemblages étudiées étaient des solutions propriétaires, dont des vis développées spécifiquement pour cet usage (collerette de blocage pour auto positionnement en hauteur au contact du bois, longueur de filetage maximale dans le bois, partie lisse dans le béton, assemblage à 45° et par paires). Les essais à l'échelle 1:1 ont été réalisés sur des poutres avec deux rangées de paires de vis à 45°. La durée d'exposition de ces essais a été limitée autour de 70 minutes.

La méthode FIT propose une correction de la rigidité de l'assemblage et de sa résistance par l'application respective d'un coefficient $k_{mod,E,fi}$ et $k_{mod,R,fi}$ dépendant du temps d'exposition (t_{fi}) et de l'épaisseur de la couverture initiale de bois à $t_{fi} = 0$.

Ces coefficients sont calibrés pour assurer une épaisseur minimale de bois équivalente à $0,6 \cdot t_{fi}$, ce qui correspond à une vitesse de combustion de 0,6 mm/min, inférieure aussi bien à la vitesse unidimensionnelle β_0 qu'à la vitesse fictive β_n respectivement de 0,65 et 0,70 mm/min. Cette vitesse réduite prend en compte l'effet moignon et son influence favorable sur la montée en température des l'assemblage l'interface bois-béton, critique aussi bien pour la rigidité que pour la résistance.

L'augmentation de la protection conduit à la baisse ou au retardement de la montée en température du bois et des vis de l'assemblage. Par conséquent, la méthode est applicable pour des durées d'exposition supérieures à 60 minutes.

Principe d'analyse de l'application de la méthode

L'application de la méthode FIT aux vis à 45° dans les configurations GL03 et GL04 est analysée sur la base des éléments suivants :

- Prédicibilité de la résistance et donc de la rupture à un temps d'exposition t_{fi} donné.
- Similarité des courbes de déformation au cours du temps calculées et observées.
- Vérification qu'il n'y a pas d'anomalie particulière lors de la réalisation des essais.

COMMENTAIRE :

Le critère principal d'analyse est formé par la prédictibilité de la résistance à un temps d'exposition donnée, la vérification en situation d'incendie des éléments structuraux bois étant avant tout une vérification à l'ELU.

Bien que l'évolution de la rigidité en fonction du temps d'exposition influe par principe sur la répartition des efforts, son influence est moindre que celle de la réduction de section de la poutre bois. En outre, dans la méthode FIT, c'est la combinaison de l'utilisation de $k_{mod,E,fi}$ pour le calcul de la section efficace à t_{fi} et de $k_{mod,R,fi}$ pour le calcul de la résistance résiduelle à t_{fi} qui forme la vérification.

En conséquence, la similarité des courbes de déformation calculée et observée est un élément secondaire de l'analyse, jugé non prépondérant.

Analyse

Le Tableau 11 ci-après indique (pour les seules poutres GL03 et GL04) le taux de travail de l'assemblage (FvRk) et de la nervure bois (V et M) calculé avec la méthode FIT, minute par minute pour le temps d'exposition (t_{fi}). La colonne (d_ef) indique la profondeur de carbonisation de la poutre bois calculée selon NF EN 1995-1-2.

La Figure 39 illustre les courbes de déformation obtenue par application de la méthode FIT et observée lors des essais.

On observe que :

- Le calcul prédit une rupture de l'assemblage de la poutre GL03 se situant entre $t_{fi} = 48$ et $t_{fi} = 60$ minutes d'exposition (taux de travail entre 100% et 103%) lorsque l'essai a abouti à une rupture à $t_{fi} = 54$ minutes (dépassement du critère de vitesse de déplacement ; la rupture est survenue 3 minutes plus tard).
- Le calcul prédit une rupture de l'assemblage de la poutre GL04 à partir de $t_{fi} = 59$ minutes d'exposition (taux de travail entre 100% et 103%) lorsque l'essai a été arrêté à $t_{fi} = 62$ minutes sans que la rupture soit atteinte.
- La courbe de déformation du calcul et de l'essai sont raisonnablement proches et similaires pour la poutre GL04.
- La courbe de déformation de l'essai diverge de plus en plus de la courbe du calcul pour la poutre GL03, la déformation observée étant en moyenne 4 à 5 fois supérieure à celle calculée.

⇒ Compte-tenu de la bonne prédictibilité de la durée de résistance, de la marge de sécurité observée et du que l'essai a été calibré pour que la profondeur de carbonisation atteigne les vis (cas particulièrement défavorable pour la poutre GL03 à une seule rangée de fixations), la méthode FIT est jugée raisonnablement applicable aux vis à 45° conformes à l'EN 14592 ou sous ETE, non spécifiquement développées en tant que connecteur bois-béton (propriétaire).

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Tableau 11 : Poutres G03 et GL04 – Application de la méthode FIT

| t_fi | d_ef | GL03 | | | GL04 | | |
|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
| | | V | M | FvRk | V | M | FvRk |
| 0 | 0.0 | 10.0% | 21.5% | 72% | 9.6% | 20.1% | 51% |
| 0 | 0.0 | 10% | 21% | 72% | 10% | 20% | 51% |
| 30 | 28.0 | 19% | 39% | 77% | 15% | 32% | 58% |
| 31 | 28.7 | 20% | 40% | 79% | 16% | 33% | 59% |
| 32 | 29.4 | 20% | 41% | 80% | 16% | 33% | 61% |
| 33 | 30.1 | 21% | 42% | 82% | 16% | 34% | 62% |
| 34 | 30.8 | 21% | 43% | 83% | 16% | 35% | 63% |
| 35 | 31.5 | 22% | 44% | 84% | 16% | 35% | 64% |
| 36 | 32.2 | 22% | 46% | 85% | 17% | 36% | 65% |
| 37 | 32.9 | 23% | 47% | 87% | 17% | 37% | 67% |
| 38 | 33.6 | 23% | 48% | 88% | 17% | 37% | 68% |
| 39 | 34.3 | 24% | 49% | 89% | 17% | 38% | 69% |
| 40 | 35.0 | 25% | 51% | 90% | 18% | 39% | 71% |
| 41 | 35.7 | 25% | 52% | 92% | 18% | 40% | 72% |
| 42 | 36.4 | 26% | 54% | 93% | 18% | 40% | 74% |
| 43 | 37.1 | 27% | 55% | 94% | 18% | 41% | 75% |
| 44 | 37.8 | 27% | 57% | 95% | 19% | 42% | 77% |
| 45 | 38.5 | 28% | 59% | 97% | 19% | 43% | 78% |
| 46 | 39.2 | 29% | 61% | 98% | 19% | 44% | 80% |
| 47 | 39.9 | 30% | 63% | 99% | 20% | 45% | 82% |
| 48 | 40.6 | 31% | 65% | 100% | 20% | 46% | 83% |
| 49 | 41.3 | 32% | 67% | 101% | 20% | 47% | 85% |
| 50 | 42.0 | 33% | 70% | 102% | 20% | 48% | 87% |
| 51 | 42.7 | 34% | 72% | 102% | 21% | 49% | 88% |
| 52 | 43.4 | 36% | 75% | 103% | 21% | 50% | 90% |
| 53 | 44.1 | 37% | 77% | 103% | 21% | 51% | 91% |
| 54 | 44.8 | 38% | 80% | 103% | 21% | 52% | 93% |
| 55 | 45.5 | 40% | 83% | 102% | 22% | 53% | 95% |
| 56 | 46.2 | 41% | 86% | 102% | 22% | 54% | 96% |
| 57 | 46.9 | 43% | 90% | 101% | 22% | 55% | 98% |
| 58 | 47.6 | 45% | 93% | 100% | 23% | 56% | 100% |
| 59 | 48.3 | 47% | 98% | 98% | 23% | 58% | 101% |
| 60 | 49.0 | 49% | 102% | 96% | 23% | 59% | 103% |
| 61 | 49.7 | 52% | 107% | 93% | 23% | 60% | 104% |
| 62 | 50.4 | 54% | 112% | 90% | 24% | 61% | 105% |
| 63 | 51.1 | 58% | 118% | 86% | 24% | 63% | 107% |
| 64 | 51.8 | 62% | 125% | 81% | 24% | 64% | 108% |
| 65 | 52.5 | 66% | 133% | 76% | 24% | 66% | 111% |

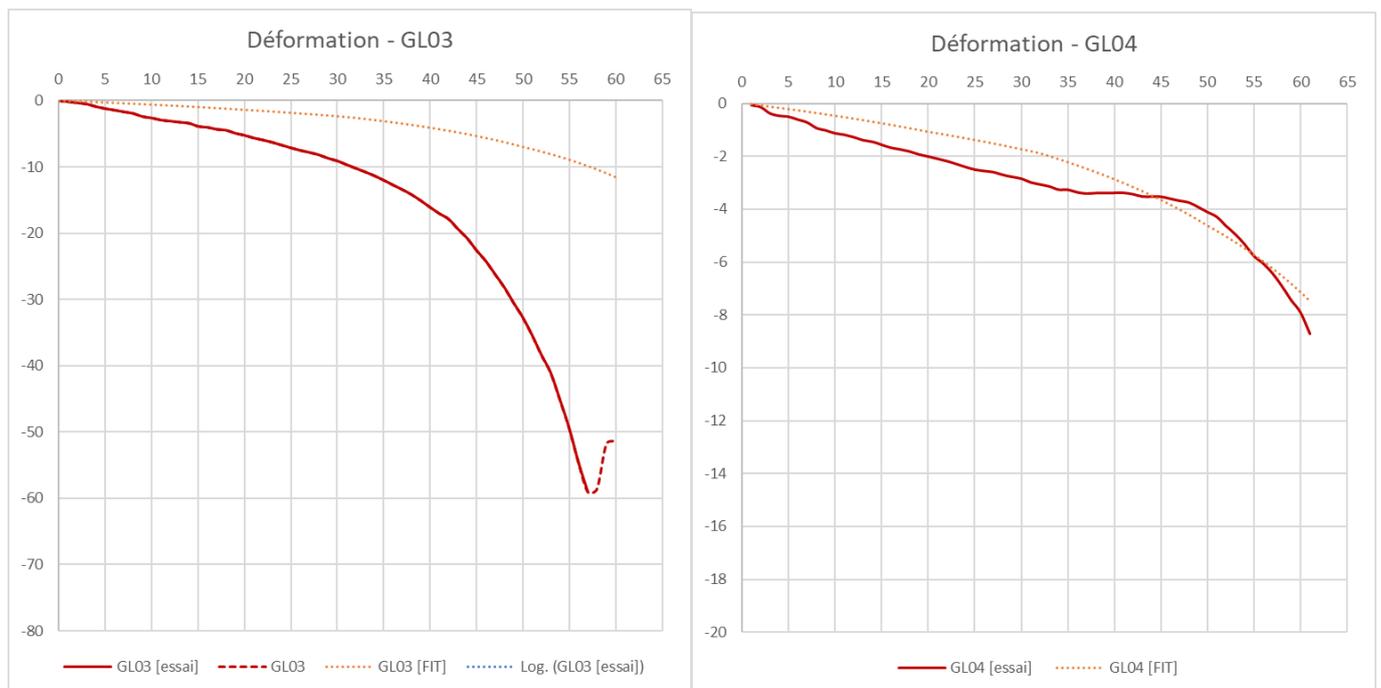


Figure 39 : Courbes de déformation (calcul et essai) – Poutres GL03 et GL04

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

COMMENTAIRE :

Sans surprise, la méthode FIT, calibrée pour des fixations par vis à 45° permet de prédire avec une marge de sécurité la durée de résistance de l'assemblage. La courbe de déformation obtenue pour 2 rangées de vis est également raisonnablement approchée.

L'écart important entre les courbes de déformation pour la poutre GL03 (1 seule rangée) n'est pas jugé prépondérant dès lors que la prédiction de durée de résistance laisse une marge de sécurité de 5 à 8 minutes dans le cas de l'essai réalisé.

Il convient de noter que le modèle de calcul utilisé ne tient pas compte de la déformation due à l'effort tranchant (particulièrement importante pour un chargement en flexion 3 points sur une portée de rapport $L/H = 10$), et ne tient pas non plus compte de l'évolution du module d'élasticité du bois au fur et à mesure de l'augmentation de sa température.

Par ailleurs, on rappelle que l'essai a été calibré pour que la profondeur de carbonisation atteigne les vis à $t_{fi} = 60$ minutes. Dans le cas de la poutre GL03 à une seule rangée de vis, ceci est particulièrement défavorable puisque la section de bois résiduelle est très fortement réduite (théoriquement quasi nulle). Ceci rend d'autant plus rassurant à notre sens la marge de sécurité observée.

La courbe de déformation de l'essai GL03 montre une accélération de la déformation au-delà de 43 minutes pour une rupture prédite par le calcul à partir de 48 minutes, le dépassement du critère de déplacement ayant été observé à 54 minutes (6 minutes plus tard) et la rupture effective 3 minutes plus tard.

⇒ Il pourrait s'avérer judicieux, d'augmenter de manière sécuritaire la vitesse de combustion intégrée au calcul de $k_{mod,E,fi}$ et $k_{mod,R,fi}$ en passant p.ex. de 0,6 mm/min à 0,65 mm/min. Ceci permettrait à la fois d'augmenter la marge de sécurité de près de 10%, et d'utiliser la vitesse de combustion unidimensionnelle de la NF EN 1995-1-2 actuelle pour le bois, le bois lamellé-collé et le LVL plutôt que d'introduire une nouvelle valeur.

4.1.6 APPLICATION DES METHODES DE CALCUL AUX VIS A 90°

Méthodes analysées

On considère dans un premier temps l'application de la méthode FIT, dont on rappelle qu'elle a été développée et calibrée pour des vis à 45°.

Dans un second temps, on compare l'essai aux résultats d'un calcul mené en appliquant les dispositions du prEN1995-1-2:2022-08 pour la correction de rigidité des assemblages de planchers mixtes bois-béton réalisés avec des organes de type tige insérés à 90° et sollicités en cisaillement.

COMMENTAIRE :

Pour les assemblages de plancher mixte bois-béton réalisés avec des organes de type tige sollicités axialement (p.ex. à 45°) le prEN1995-1-2:2022-08 renvoie à l'utilisation de la méthode FIT.

Pour les assemblages de plancher mixte bois-béton réalisés avec des organes de type tige sollicités en cisaillement (à 90°), il renvoie aux dispositions des assemblages bois-bois pour la résistance (globalement identiques à celles de la NF EN 1995-1-2 en vigueur), et à un coefficient de réduction de la rigidité de l'assemblage $k_{mod,E,fi} = 0,20$ indépendant de la durée d'exposition.

Le calcul de la résistance des assemblages bois-bois par vis dans la NF EN 1995-1-2 comme dans le prEN1995-1-2:2022-08 se limite soit à des solutions tabulées (limitées à 15 minutes), soit à la vérification en fonction du taux de travail à froid limitée à 30 minutes, l'augmentation des distances au bord et aux extrémités (et donc de la section de bois) d'une dimension a_{fi} permettant d'étendre l'application jusqu'à 60 minutes. Ces solutions ne couvrent en outre que les assemblages symétriques.

L'épaisseur de référence à 15 minutes est de 28 mm. Le calcul pour atteindre 60 minutes donne une surépaisseur $a_{fi} = 58,5$ mm. La formule donnant la résistance $R_{k,fi}$ en fonction de la durée d'exposition peut donc être appliquée dès lors que l'on a au moins 58,5 mm de surépaisseur par rapport à la distance au bord à froid. La couverture des vis à froid est de 56 mm aussi bien pour GL01 que pour GL02. L'application de ces méthodes à l'assemblage bois-béton des poutres GL01 et GL02 n'est donc pas réellement possible, ou en tout cas peu adapté. On se borne donc par cette analyse à modifier la rigidité de l'assemblage avec $k_{mod,E,fi} = 0,20$ et à calculer la résistance avec la méthode FIT (a priori non développée pour cette situation).

Note : les coefficients de corrections du prEN1995-1-2:2022-08 sont appelés $\eta_{E,fi}$ et $\eta_{R,fi}$ au lieu de $k_{mod,E,fi}$ et $k_{mod,R,fi}$.

Principe d'analyse de l'application des méthodes

L'application de deux méthodes aux vis à 90° dans les configurations GL01 et GL02 est analysée sur la base des mêmes éléments que ceux retenus pour les vis à 45°.

COMMENTAIRE :

On rappelle que :

- L'essai de la poutre GL01 a abouti à une rupture prématurée à $t_{fi} = 27$ minutes, liée notamment à une surestimation de la charge de l'essai (cf. §2.7.1).
- L'essai de la poutre GL02 a, compte-tenu du résultat de l'essai GL01 et du peu de temps disponible pour analyser la situation, été réalisé avec une charge de 31,0 kN sans que la rupture soit atteinte, alors que le calcul réalisé a posteriori (suite à l'analyse du cas de la poutre GL01) indiquait une charge à appliquer de 37,5 kN.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Analyse

Le Tableau 12 ci-après indique (pour les seules poutres GL01 et GL02) le taux de travail de l'assemblage (FvRk) et de la nervure bois (V et M) calculé avec la méthode FIT et selon prEN 1995-1-2 :2022-08, minute par minute pour le temps d'exposition (t_{fi}). La colonne (d_{ef}) indique la profondeur de carbonisation de la poutre bois calculée selon NF EN 1995-1-2.

La Figure 40 illustre les courbes de déformation obtenue par application de la méthode FIT et observée lors des essais.

On observe que :

- L'application de la méthode FIT à la poutre GL01 avec la charge de l'essai de 31,0 kN prédit une rupture de l'assemblage à partir de t_{fi} = 35 minutes d'exposition (taux de travail ≥ 100%) lorsque l'essai a abouti à une rupture à t_{fi} = 27 minutes.
- La vérification de l'assemblage de la poutre GL01 avec la résistance de la méthode FIT, mais une distribution des efforts obtenues à partir de la modification de la rigidité du prEN1995-1-2:2022-08 (k_{modE,fi} = 0,2) abouti à un taux de travail de l'assemblage qui n'excède pas 87% (la rupture en flexion du bois survient après 50 minutes environ, comme pour la méthode FIT intégrale).
- L'application de la méthode FIT à la poutre GL02 avec la charge de l'essai de 31,0 kN (trop faible) prédit un taux de travail de l'assemblage de 87% à t_{fi} = 60 minutes d'exposition, l'essai ayant été arrêté à 62 minutes sans rupture.
- La courbe de déformation de l'essai diverge de plus en plus de la courbe du calcul selon la méthode FIT pour les poutres GL01 et GL02, la déformation observée étant en moyenne 6 à 8 fois supérieure à celle calculée.
- La courbe de calcul selon la rigidité du prEN1995-1-2:2022-08 est légèrement plus défavorable que celle obtenue avec la méthode FIT, mais les divergences précitées demeurent.

- ⇒ La méthode FIT (développée pour des vis à 45°) ne permet pas de prédire raisonnablement la résistance de la poutre GL01, et la faiblesse de la charge de la poutre GL02 ne permet pas de comparer la méthode à l'essai.
- ⇒ Le calcul de résistance selon NF EN 1995-1-2 ou prEN1995-1-2 :2022-08 sont difficilement applicables dans la situation de l'essai. Il n'est donc pas possible de se prononcer sur cette méthode-ci.
- ⇒ Pour les deux méthodes, les courbes de déformation obtenues par le calcul divergent fortement de celles observées lors des essais, ce qui, bien que secondaire, ne permet pas d'améliorer l'analyse ou de conclure positivement.

Tableau 12 : Poutres G01 et GL02 – Application de la méthode FIT et du prEN 1995-1-2:2020-08

| t _{fi} | d _{ef} | GL01 | | | GL02 | | |
|-----------------|-----------------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | | V | M | FvRk | V | M | FvRk |
| 0 | 0.0 | 13.2% | 38.6% | 75% | 10.1% | 28.2% | 48% |
| 0 | 0.0 | 13% | 39% | 75% | 10% | 28% | 48% |
| 30 | 28.0 | 22% | 62% | 91% | 15% | 42% | 59% |
| 31 | 28.7 | 22% | 63% | 94% | 15% | 42% | 61% |
| 32 | 29.4 | 23% | 65% | 96% | 15% | 43% | 62% |
| 33 | 30.1 | 23% | 66% | 98% | 15% | 44% | 63% |
| 34 | 30.8 | 24% | 67% | 99% | 16% | 44% | 64% |
| 35 | 31.5 | 24% | 69% | 100% | 16% | 45% | 65% |
| 36 | 32.2 | 25% | 70% | 101% | 16% | 46% | 66% |
| 37 | 32.9 | 25% | 72% | 103% | 16% | 47% | 67% |
| 38 | 33.6 | 26% | 74% | 104% | 16% | 48% | 68% |
| 39 | 34.3 | 26% | 76% | 105% | 17% | 48% | 69% |
| 40 | 35.0 | 27% | 77% | 106% | 17% | 49% | 70% |
| 41 | 35.7 | 27% | 79% | 107% | 17% | 50% | 71% |
| 42 | 36.4 | 28% | 81% | 109% | 17% | 51% | 73% |
| 43 | 37.1 | 29% | 83% | 110% | 17% | 52% | 74% |
| 44 | 37.8 | 29% | 86% | 111% | 18% | 53% | 75% |
| 45 | 38.5 | 30% | 88% | 112% | 18% | 54% | 76% |
| 46 | 39.2 | 31% | 90% | 113% | 18% | 56% | 77% |
| 47 | 39.9 | 32% | 93% | 114% | 18% | 57% | 78% |
| 48 | 40.6 | 33% | 96% | 115% | 19% | 58% | 79% |
| 49 | 41.3 | 34% | 99% | 116% | 19% | 59% | 80% |
| 50 | 42.0 | 35% | 102% | 117% | 19% | 60% | 81% |
| 51 | 42.7 | 36% | 104% | 117% | 19% | 61% | 82% |
| 52 | 43.4 | 36% | 107% | 117% | 19% | 63% | 83% |
| 53 | 44.1 | 38% | 110% | 117% | 20% | 64% | 84% |
| 54 | 44.8 | 39% | 113% | 116% | 20% | 65% | 84% |
| 55 | 45.5 | 40% | 117% | 116% | 20% | 66% | 85% |
| 56 | 46.2 | 41% | 120% | 115% | 20% | 67% | 86% |
| 57 | 46.9 | 42% | 124% | 114% | 20% | 69% | 86% |
| 58 | 47.6 | 44% | 128% | 112% | 21% | 70% | 86% |
| 59 | 48.3 | 46% | 133% | 110% | 21% | 71% | 87% |
| 60 | 49.0 | 48% | 138% | 108% | 21% | 73% | 87% |
| 61 | 49.7 | 50% | 143% | 105% | 21% | 74% | 87% |
| 62 | 50.4 | 53% | 149% | 102% | 21% | 76% | 86% |
| 63 | 51.1 | 56% | 156% | 98% | 21% | 77% | 86% |
| 64 | 51.8 | 59% | 164% | 93% | 22% | 79% | 85% |
| 65 | 52.5 | 64% | 173% | 89% | 22% | 80% | 86% |

Application de la méthode FIT

| t _{fi} | d _{ef} | GL01 | | | GL02 | | |
|-----------------|-----------------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | | V | M | FvRk | V | M | FvRk |
| 0 | 0.0 | 13.2% | 38.6% | 75% | 10.1% | 28.2% | 48% |
| 0 | 0.0 | 13% | 39% | 75% | 10% | 28% | 48% |
| 30 | 28.0 | 17% | 64% | 33% | 13% | 47% | 24% |
| 31 | 28.7 | 18% | 65% | 34% | 13% | 48% | 25% |
| 32 | 29.4 | 18% | 66% | 35% | 13% | 49% | 25% |
| 33 | 30.1 | 18% | 67% | 36% | 13% | 49% | 26% |
| 34 | 30.8 | 19% | 69% | 37% | 14% | 50% | 27% |
| 35 | 31.5 | 19% | 70% | 39% | 14% | 51% | 28% |
| 36 | 32.2 | 19% | 71% | 40% | 14% | 51% | 29% |
| 37 | 32.9 | 20% | 72% | 41% | 14% | 52% | 30% |
| 38 | 33.6 | 20% | 74% | 43% | 14% | 53% | 31% |
| 39 | 34.3 | 20% | 75% | 44% | 14% | 54% | 32% |
| 40 | 35.0 | 21% | 77% | 46% | 15% | 55% | 33% |
| 41 | 35.7 | 21% | 79% | 47% | 15% | 55% | 34% |
| 42 | 36.4 | 22% | 80% | 49% | 15% | 56% | 35% |
| 43 | 37.1 | 22% | 82% | 51% | 15% | 57% | 36% |
| 44 | 37.8 | 23% | 84% | 52% | 16% | 58% | 38% |
| 45 | 38.5 | 24% | 86% | 54% | 16% | 59% | 39% |
| 46 | 39.2 | 24% | 88% | 56% | 16% | 60% | 40% |
| 47 | 39.9 | 25% | 90% | 58% | 16% | 61% | 42% |
| 48 | 40.6 | 26% | 92% | 60% | 17% | 62% | 43% |
| 49 | 41.3 | 26% | 95% | 62% | 17% | 63% | 45% |
| 50 | 42.0 | 27% | 97% | 65% | 17% | 64% | 47% |
| 51 | 42.7 | 28% | 100% | 67% | 17% | 65% | 48% |
| 52 | 43.4 | 29% | 102% | 68% | 18% | 66% | 50% |
| 53 | 44.1 | 30% | 105% | 70% | 18% | 67% | 51% |
| 54 | 44.8 | 31% | 107% | 72% | 18% | 68% | 53% |
| 55 | 45.5 | 32% | 110% | 74% | 18% | 69% | 55% |
| 56 | 46.2 | 33% | 114% | 76% | 19% | 70% | 57% |
| 57 | 46.9 | 35% | 117% | 78% | 19% | 71% | 59% |
| 58 | 47.6 | 36% | 121% | 80% | 19% | 72% | 61% |
| 59 | 48.3 | 38% | 125% | 82% | 19% | 73% | 63% |
| 60 | 49.0 | 41% | 130% | 83% | 20% | 74% | 65% |
| 61 | 49.7 | 43% | 136% | 84% | 20% | 75% | 68% |
| 62 | 50.4 | 46% | 142% | 85% | 20% | 76% | 70% |
| 63 | 51.1 | 50% | 150% | 85% | 21% | 78% | 73% |
| 64 | 51.8 | 55% | 159% | 85% | 21% | 79% | 76% |
| 65 | 52.5 | 61% | 170% | 84% | 21% | 80% | 80% |

Application du prEN1995-1-2 :2020-08 pour la rigidité

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

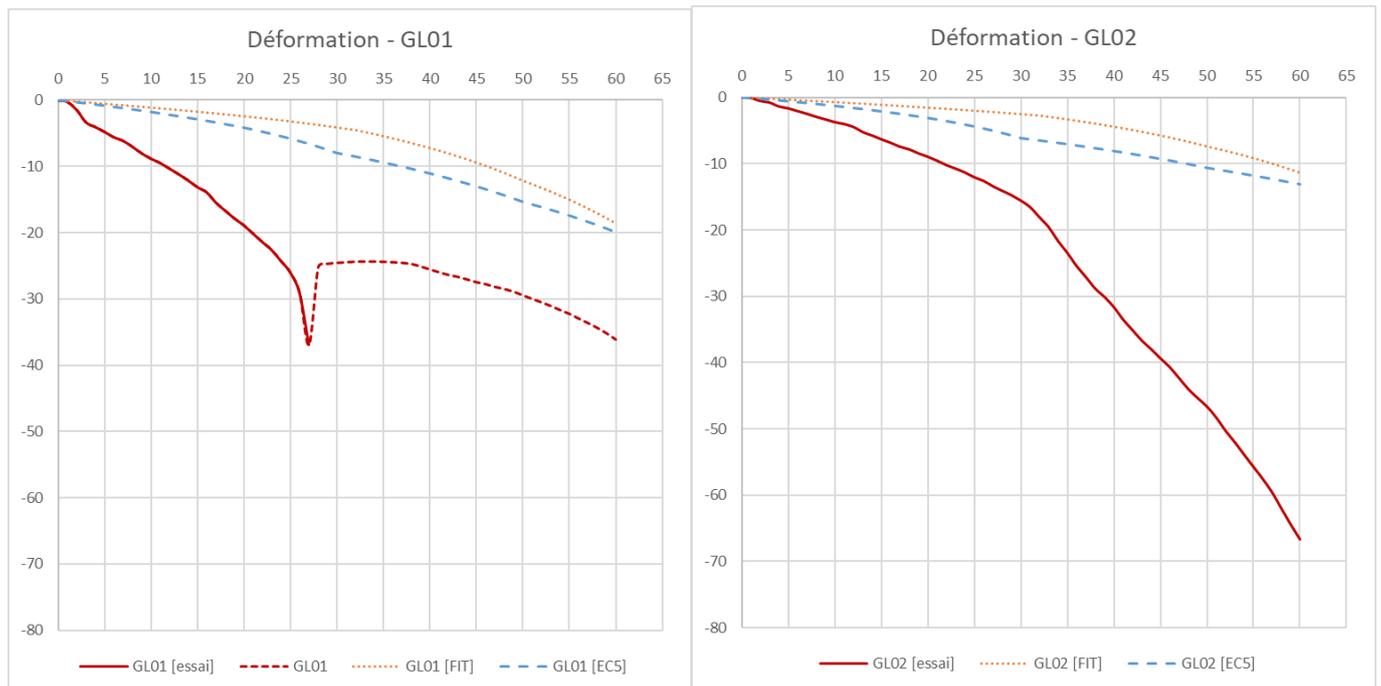


Figure 40 : Courbes de déformation (calcul et essai) – Poutres GL01 et GL02

COMMENTAIRE :

La rupture prématurée de la poutre GL01 et le chargement insuffisant de la poutre GL02 décidé dans un délai court n'ayant pas permis une analyse détaillée du cas de la poutre GL01 rendent les résultats difficilement exploitables. Le mode de rupture exact de la poutre GL01 n'est pas certain, et vient également perturber l'analyse.

L'utilisation de la méthode FIT (développée pour des vis à 45°) semble ne pas être adaptée aux vis à 90° au vu à la fois de l'écart important entre la prédiction de rupture de la poutre GL01 et la rupture observée (près de 10 minutes) et de la forte divergence de courbes de déformation.

L'essai n'a pas été calibré pour permettre l'utilisation de la méthode de calcul (essentiellement forfaitaire) de l'EN 1995-1-2 ou celle du prEN1995-1-2:2022-08 dans des conditions adaptées. La correction de rigidité, elle aussi forfaitaire (et indépendante du temps), bien qu'importante, tend plutôt à réduire les efforts sur l'assemblage et ne permet donc pas de mieux appréhender la durée de résistance.

⇒ On peut en outre s'interroger sur l'adaptation de la méthode de l'EN 1995-1-2 ou celle du prEN1995-1-2:2022-08 à la typologie d'assemblage de plancher mixte bois-béton avec des vis à 90°, par nature dissymétrique, et dont la géométrie et l'orientation diffèrent significativement de la configuration visée par ces textes.

5 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

5.1 Rappel des objectifs

La réalisation de cette seconde étude vise en premier lieu à apporter des éléments de réponse sur le sujet 1. « Etude complémentaire sur les connecteurs métalliques de type tige », tout en ne perdant pas de vue les sujets 3. (vitesse de combustion des panneaux à base de bois sur substrat béton) et 4. (prise en compte de la réduction du module d'élasticité du béton en fonction du temps d'exposition).

L'objectif sous-jacent de cette seconde étude est l'analyse du comportement de connecteurs métalliques de type tige non propriétaires, et plus particulièrement de vis à filetage partiel ou total (conformes à l'EN 14592 ou sous ETE) disponibles sur le marché français pour la réalisation d'assemblages courants de construction bois.

Les principes-objectifs suivants ont donc été retenus, en accord avec le comité de pilotage de l'action :

- L'étude ne vise pas à caractériser une configuration d'assemblage et/ou de plancher mixte bois-béton donné. Elle vise à évaluer l'applicabilité de la méthode FIT à des solutions non propriétaires.
- La durée de résistance cible est de 60 minutes.
- En conséquence les configurations soumises à l'essai ont été définies afin d'atteindre la rupture à proximité des 60 minutes d'exposition, en sur-sollicitant le cas échéant les connecteurs.
- Les configurations soumises à l'essai devaient dans la mesure du possible couvrir une variété de connecteurs, d'arrangements de la connexion bois-béton et de panneaux à base de bois formant coffrage perdu.

5.2 Synthèse des essais et enseignements clés

Quatre poutres / configurations ont été soumises à l'essai, en répondant aux principes et objectifs décrits ci-dessus. Ces configurations sont décrites succinctement dans le tableau ci-dessous, qui précise également les principales durées observées.

Tableau 13 : Synthèse des configurations testées et des durées observées

| Configuration | GL01 | GL02 | GL03 | GL04 |
|---------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|----------------------|
| Panneau de coffrage | 3 plis (19 mm) | OSB (18 mm) | P. Particules (19 mm) | Contreplaqué (18 mm) |
| | Filant | | Interrompu | |
| | Film PE | Film PE partiel | Sans film PE | |
| Poutre GL24h | 112 x 215 mm | 162 x 215 mm | 112 x 215 mm | 162 x 215 mm |
| Assemblage | Simpson ESCR 10.0x160 @ 150 mm à 90° | | SPAX 10.0x180 inox A2 @ 100 mm à 45° | |
| | 1 rangée | 2 rangées | 1 rangée | 2 rangées |
| Charge appliquée | 31,0 kN | 31,0 kN | 19,0 kN | 26,0 kN |
| Synthèse | | | | |
| Chute de panneau | 33 min | 34 min | 49 min | 34 min |
| Rupture | 27 min | - | 54 min | - |

La rupture prématurée de la poutre GL01 est à mettre en relation avec une surestimation de la charge appliquée (cf. §2.7 et 3.1.1) et possiblement un phénomène de cisaillement de bloc dans le prolongement de la file de vis à l'extrémité de la poutre.

La charge de la poutre GL02 a été modifiée dans un temps court avant d'avoir pu analyser complètement le cas de la poutre GL01, conduisant cette fois-ci à une sous-estimation de la charge (qui aurait été plus cohérente à 37,5 kN au lieu de 31,0 kN).

Les observations générales clés sont les suivantes :

- ⇒ Le panneau de coffrage joue (visiblement) un rôle de protection de la dalle béton pendant un peu plus de 30 minutes.
- ⇒ La chute du panneau de coffrage intervient au-delà de 30 minutes (33 à 41) et même à 49 minutes pour le panneau de particules, indiquant une vitesse de combustion sur support béton 1,5 à 2 fois inférieure à celle de la NF EN 1995-1-1.
- ⇒ L'objectif de l'essai a été atteint pour les poutres GL02 à GL04, mais avec une charge sous-estimée pour GL02.
- ⇒ Aucune incidence de la présence ou non du film PE n'a été relevée.
- ⇒ Aucune incidence du type de vis n'a été relevée.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Pour des raisons de sécurité, et du fait de la poursuite de la combustion des poutres, il n'a pas été possible de retirer les corps d'épreuve pour les arroser pendant 1H30 à 3H après l'arrêt de l'essai. En conséquence, la mesure de la section résiduelle n'a pu être exploitée puisque résultant d'une durée de combustion nettement supérieure aux 60 minutes visées.

L'analyse des courbes de température a en outre permis d'observer ou confirmer ce qui suit :

- ⇒ L'évolution de la température au droit des vis est essentiellement liée à l'évolution de la protection apportée par le bois non carbonisé, la partie dans le béton étant protégée par ce dernier.
- ⇒ L'évolution de la température du béton est essentiellement liée à la durée de protection apportée par la carbonisation du panneau de coffrage.
- ⇒ Aucune anomalie n'a été relevée concernant la vitesse de combustion du bois.
- ⇒ Aucune anomalie n'a été relevée concernant l'évolution de la température dans le bois entre les rangées de vis.
- ⇒ Le ralentissement de la vitesse de combustion au droit de l'angle poutre-panneau (effet « moignon » qui conduit à un profil arrondi de la section non carbonisée) est visible à la lecture des courbes comme à l'observation

5.3 Application de la méthode FIT aux vis (conformes à l'EN 14592 ou sous ETE)

On rappelle que la méthode FIT a été développée dans le cadre d'une étude portant sur des assemblages propriétaires par vis à 45° par paires.

Cas des vis à 45° (poutres GL03 et GL04)

Sans surprise, la méthode FIT, calibrée pour des fixations par vis à 45° permet de prédire avec une marge de sécurité la durée de résistance de l'assemblage. La courbe de déformation obtenue pour 2 rangées de vis est également raisonnablement approchée.

- ⇒ Compte-tenu de la bonne prédictibilité de la durée de résistance, de la marge de sécurité observée et du que l'essai a été calibré pour que la profondeur de carbonisation atteigne les vis (cas particulièrement défavorable pour la poutre GL03 à une seule rangée de fixations), la méthode FIT est jugée raisonnablement applicable aux vis à 45° conformes à l'EN 14592 ou sous ETE, non spécifiquement développées en tant que connecteur bois-béton (propriétaire).
- ⇒ Il pourrait s'avérer judicieux, d'augmenter de manière sécuritaire la vitesse de combustion intégrée au calcul de $k_{mod,E,fi}$ et $k_{mod,R,fi}$ en passant p.ex. de 0,6 mm/min à 0,65 mm/min. Ceci permettrait à la fois d'augmenter la marge de sécurité de près de 10%, et d'utiliser la vitesse de combustion unidimensionnelle de la NF EN 1995-1-2 actuelle pour le bois, le bois lamellé-collé et le LVL plutôt que d'introduire une nouvelle valeur.

Cas des vis à 90° (poutres GL01 et GL02)

La rupture prématurée de la poutre GL01 et le chargement insuffisant de la poutre GL02 décidé dans un délai court n'ayant pas permis une analyse détaillée du cas de la poutre GL01 rendent les résultats difficilement exploitables. Le mode de rupture exact de la poutre GL01 n'est pas certain, et vient également perturber l'analyse.

L'utilisation de la méthode FIT (développée pour des vis à 45°) semble ne pas être adaptée aux vis à 90° au vu à la fois de l'écart important entre la prédiction de rupture de la poutre GL01 et la rupture observée (près de 10 minutes) et de la forte divergence de courbes de déformation.

L'essai n'a pas été calibré pour permettre l'utilisation de la méthode de calcul (essentiellement forfaitaire) de l'EN 1995-1-2 ou celle du prEN1995-1-2:2022-08 dans des conditions adaptées. La correction de rigidité, elle aussi forfaitaire (et indépendante du temps), bien qu'importante, tend plutôt à réduire les efforts sur l'assemblage et ne permet donc pas de mieux appréhender la durée de résistance.

- ⇒ La méthode FIT (développée pour des vis à 45°) ne permet pas de prédire raisonnablement la résistance de la poutre GL01, et la faiblesse de la charge de la poutre GL02 ne permet pas de comparer la méthode à l'essai.
- ⇒ Le calcul de résistance selon NF EN 1995-1-2 ou prEN1995-1-2:2022-08 sont difficilement applicables dans la situation de l'essai. Il n'est donc pas possible de se prononcer sur cette méthode-ci.
- ⇒ Pour les deux méthodes, les courbes de déformation obtenues par le calcul divergent fortement de celles observées lors des essais, ce qui, bien que secondaire, ne permet pas d'améliorer l'analyse ou de conclure positivement.
- ⇒ On peut en outre s'interroger sur l'adaptation de la méthode de l'EN 1995-1-2 ou celle du prEN1995-1-2:2022-08 à la typologie d'assemblage de plancher mixte bois-béton avec des vis à 90°, par nature dissymétrique, et dont la géométrie et l'orientation diffèrent significativement de la configuration visée par ces textes.

5.4 Vitesse de combustion des panneaux à base de bois sur substrat béton

La vitesse de combustion unidimensionnelle déduite sur la base d'un temps de référence de 30 minutes se situe entre 0,60 et 0,63 mm/min. Ces vitesses sont significativement inférieures à celles déterminées par l'application de la NF EN 1995-1-1, §3.4.2(8) et (9).

En outre, il est remarquable que la durée de protection soit quasiment identique pour les 4 panneaux testés dont l'épaisseur est proche (entre 18 et 19 mm).

Cette durée de protection joue un rôle dans la détermination de la durée d'exposition de la dalle béton pour son calcul selon NF EN 1992-1-2, et sur l'évaluation de l'évolution du module d'élasticité du béton pour le calcul de la rigidité efficace à la durée de résistance visée.

Il semble donc raisonnable de considérer l'une des approches suivantes pour définir le temps de protection de la dalle béton apporté par un panneau de coffrage en SWP, OSB, contreplaqué, LVL ou de particules :

- (a) Définir une vitesse de combustion unidimensionnelle de référence $\beta_{0,c}$ sur substrat béton pour ces panneaux en lieu et place des valeurs du Tableau 3.1d) de la NF EN 1995-1-2 – la formule (3.4) devient alors :

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_{0,c} \cdot k_{\rho} \cdot k_h = \beta_{0,c} \cdot \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \cdot \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad \text{avec } 0,55 \leq \beta_{0,c} \leq 0,75 \text{ mm/min selon le type de panneau (Tableau 10) ; ou}$$

- (b) Définir une vitesse de combustion unidimensionnelle $\beta_{0,\rho,c}$ sur substrat béton indépendante de la masse volumique du panneau et variant uniquement avec son épaisseur – la formule (3.4) devient alors :

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_{0,\rho,c} \cdot k_h = \beta_{0,\rho,c} \cdot \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad \text{avec } \beta_{0,\rho,c} = 0,60 \text{ mm/min pour les types de panneaux listés ; ou}$$

- (c) Considérer qu'un panneau à base de bois (SWP, OSB, contreplaqué, LVL ou de particules) d'épaisseur minimale 18 mm apporte une protection de 30 minutes.

- ⇒ La durée de protection du béton par le panneau de coffrage est de 30 minutes pour un panneau (SWP, OSB, contreplaqué, LVL ou de particule) d'épaisseur minimale 18 mm.
- ⇒ Afin de permettre la prise en compte d'autres épaisseurs, il est proposé de nouvelles valeurs de vitesse de combustion unidimensionnelle de ces panneaux à base de bois sur substrat béton de l'ordre de 0,55 à 0,75 mm/min, différenciées ou non en fonction de la masse volumique caractéristique (Tableau 10).

COMMENTAIRE :

La proposition (a) ne modifie pas le principe d'application de la formule (3.4) de la NF EN 1995-1-2. Les données sur les masses volumiques caractéristiques des panneaux utilisés lors des essais ne sont cependant pas connues, et la correction correspondante ne peut donc être confirmée par les essais réalisés ici.

La proposition (c) a le mérite de la simplicité et de refléter exactement les observations et mesures des essais. Il n'est cependant pas rare que le panneau de coffrage aie une épaisseur supérieure à 18-19 mm. Cette approche peut donc être réductrice.

La proposition (b) combine l'avantage d'une relative simplicité (vitesse de combustion identique pour tous les panneaux visés), de permettre la prise en compte d'épaisseurs différentes, tout en apportant une petite marge de sécurité complémentaire.

5.5 Conclusions et perspectives

Bilan

L'étude permet de conclure favorablement à l'applicabilité de la méthode FIT aux assemblages bois-béton réalisés au moyen de vis conformes à l'EN 14592 ou sous ETE, non spécifiquement développées en tant que connecteur bois-béton (propriétaire).

L'étude n'a en revanche pas permis de conclure concernant l'usage de ces mêmes vis à 90°, perturbée par la rupture prématurée de la poutre GL01 suivie de la sous-estimation de la charge de la poutre GL02 d'une part, et non aidée d'autre part par la difficile applicabilité de la méthode de la NF EN 1995-1-2 (comme de celle du prEN 1995-1-2:2022-08) à ces configurations d'assemblage dissymétriques qui plus est optimisées pour épuiser la couverture des vis par le bois à 60 minutes d'exposition.

L'étude a permis de mettre en évidence que la vitesse de combustion des panneaux à base de bois sur substrat béton est significativement inférieure à celle définie dans la NF EN 1995-1-2, et que la durée de protection du béton par le panneau de coffrage est de 30 minutes pour un panneau (SWP, OSB, contreplaqué, LVL ou de particule) d'épaisseur minimale 18 mm.

La prise en compte de l'évolution du module d'élasticité du béton dans le temps (au-delà de cette durée de protection par le panneau) est jugée pertinente et permet de rapprocher le calcul du comportement observé expérimentalement.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Evolution de l'Eurocode 5

Ces travaux ont permis de conforter l'orientation du prEN1995-1-2:2022-08 (draft final pour envoi à l'enquête formelle) qui inclut des dispositions relatives au dimensionnement en situation d'incendie des types de plancher mixtes bois-béton courants.

Le projet définitif de norme inclut la méthode FIT, ajustée avec une vitesse de combustion passant de 0,60 à 0,65 mm/min (comme suggéré plus haut) pour le calcul des assemblages par vis sollicitées axialement (donc p.ex. à 45°).

Le projet définitif de norme propose un coefficient de réduction de la rigidité des assemblages par vis sollicités au cisaillement (à 90°) et renvoie au calcul de la résistance par la méthode (essentiellement forfaitaire) des assemblages bois-bois symétriques.

L'étude n'a pas été conçue pour étudier ce cas particulier et a été perturbée dans son déroulement par la rupture prématurée de la poutre GLO1.

Il n'a donc pas été permis de tirer des conclusions solides. On peut cependant s'interroger sur le niveau d'adaptation de la méthode de l'EN 1995-1-2 ou celle du prEN1995-1-2:2022-08 à la typologie d'assemblage de plancher mixte bois-béton avec des vis à 90°, par nature dissymétrique, et dont la géométrie et l'orientation diffèrent significativement de la configuration visée par ces textes.

Protection apportée par le panneau de coffrage

La protection apportée par le panneau de coffrage a été démontrée par cette étude et dépasse significativement le temps calculable en application des vitesses de combustion des panneaux à base de bois de la NF EN 1995-1-2.

Ce type d'information n'a pu être présenté à temps pour permettre son inclusion dans le projet définitif de révision de la norme.

Il convient donc de définir sous quelle forme cette protection peut être transposée dans un document accepté par la réglementation incendie en France. Ce pourrait être une appréciation de laboratoire générique.

La solution recommandée par le rédacteur des présentes est la proposition (b) avec une vitesse unidimensionnelle de 0,60 mm/min indifférenciée selon le type de panneau listé, uniquement ajusté en fonction de son épaisseur.

La solution de repli pouvant être la proposition (c) fixant à 30 minutes la durée de protection pour un panneau d'épaisseur minimale 18 mm.

Cas des vis à 90°

L'étude n'a pas permis de valider l'applicabilité de la méthode FIT aux vis à 90° (ce qui serait d'ailleurs en contradiction avec le futur Eurocode 5), mais n'a pas non plus permis d'évaluer la pertinence d'appliquer la méthode forfaitaire de la NF EN 1995-1-2 ou du prEN 1995-1-2:2022-08 probablement très sécuritaire mais dont la précision et l'adéquation sont sujettes à caution.

Il semble pertinent de développer une méthode spécifique à cette configuration de plancher et d'assemblage.

Ce type de développement peut former le sujet d'un futur projet, qui s'appuierait dans un premier temps sur des essais en petit four pour évaluer l'évolution du comportement des vis dans le bois en fonction de la température et proposer une méthode d'ajustement de la résistance et de la rigidité en fonction du temps de résistance visé avant de réaliser un ou deux essais en vraie grandeur.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

ANNEXE A COURBES D'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU COURS DE L'ESSAI

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

A.1 Evolution de la température au droit des vis

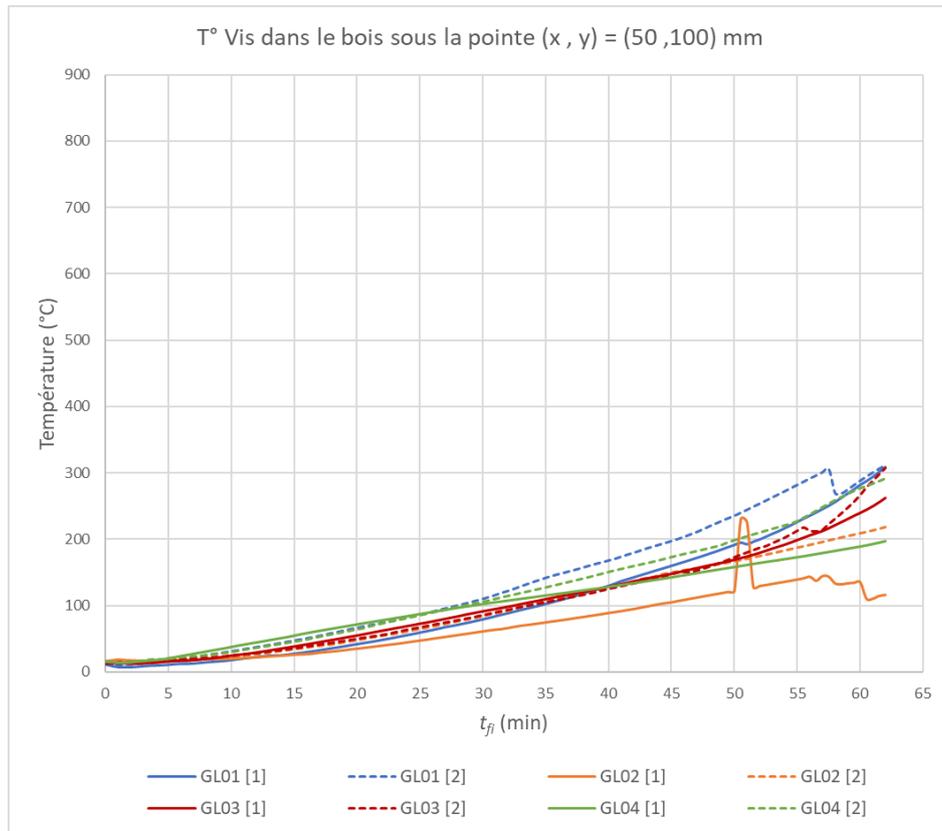


Figure 41 : Evolution de la température au droit des vis – dans le bois sous la pointe (x, y) = (50, 100) mm

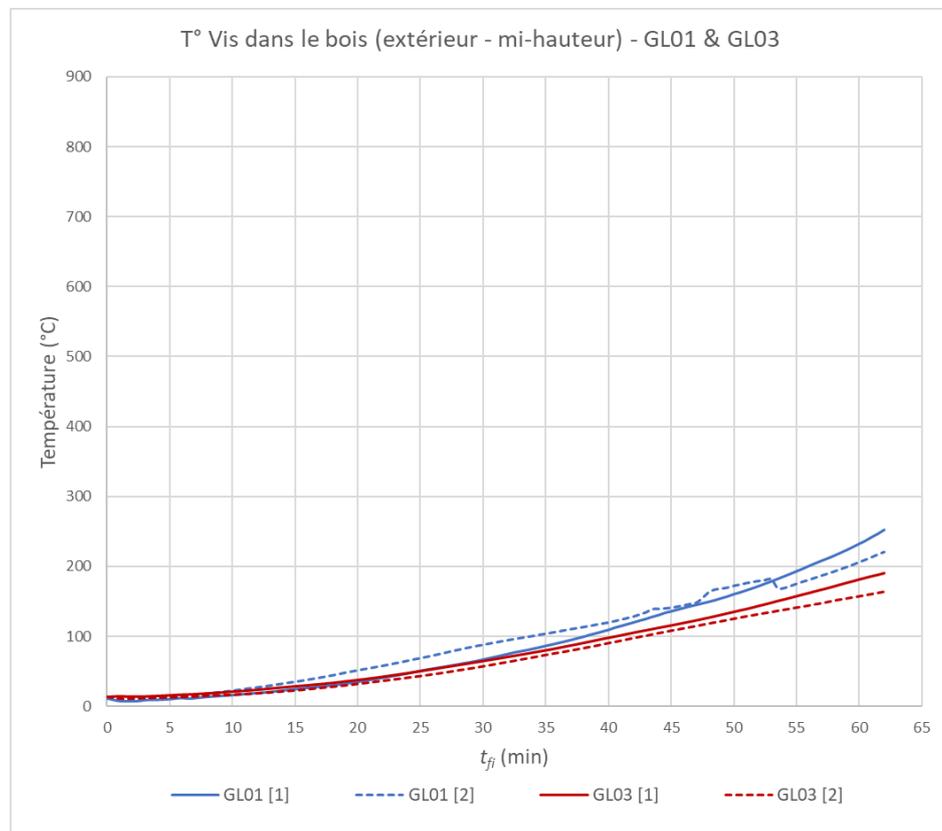


Figure 42 : Evolution de la température au droit des vis – à mi-hauteur de la vis dans le bois côté extérieur (GL01 et GL03)

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

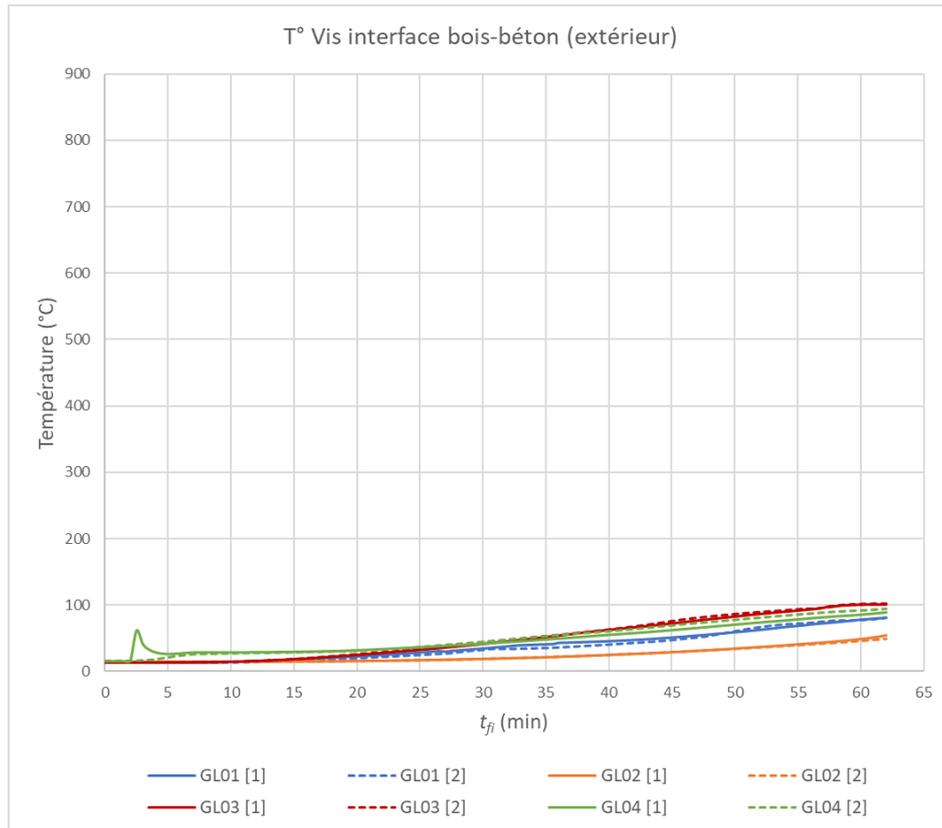


Figure 43 : Evolution de la température au droit des vis – à l'interface bois-béton côté extérieur

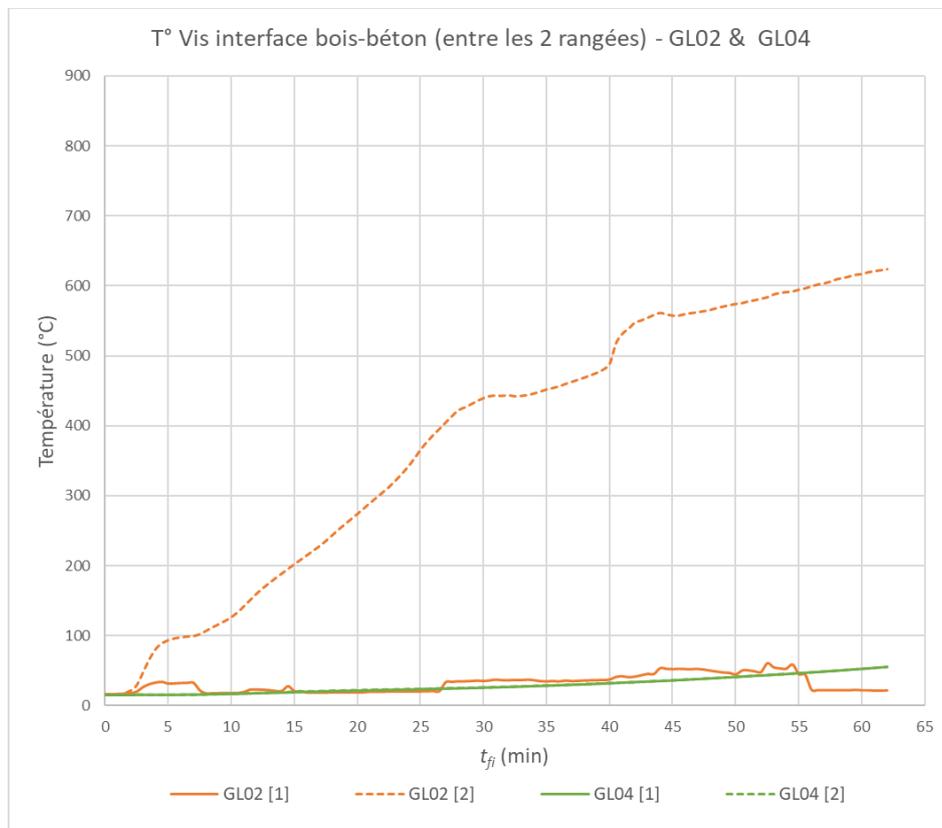


Figure 44 : Evolution de la température au droit des vis – à l'interface bois-béton entre les 2 rangées de vis (GL02 et GL04)

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

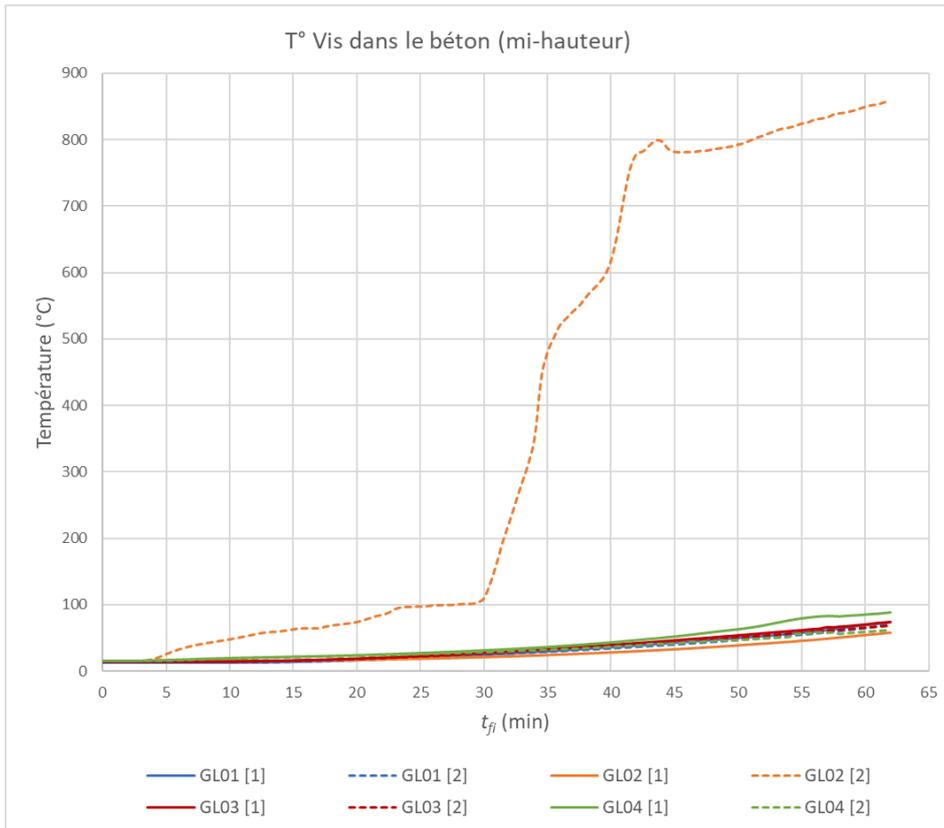


Figure 45 : Evolution de la température au droit des vis – à mi-hauteur de la vis dans le béton

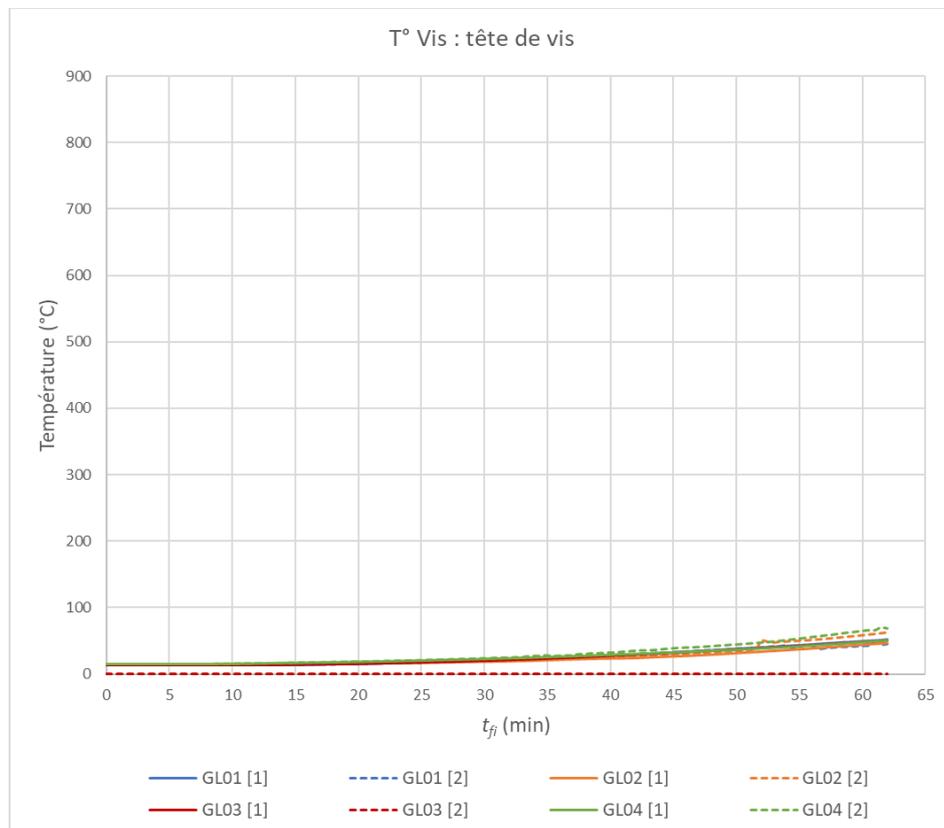


Figure 46 : Evolution de la température au droit des vis – en tête de vis dans le béton

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

A.2 Evolution de la température dans le béton

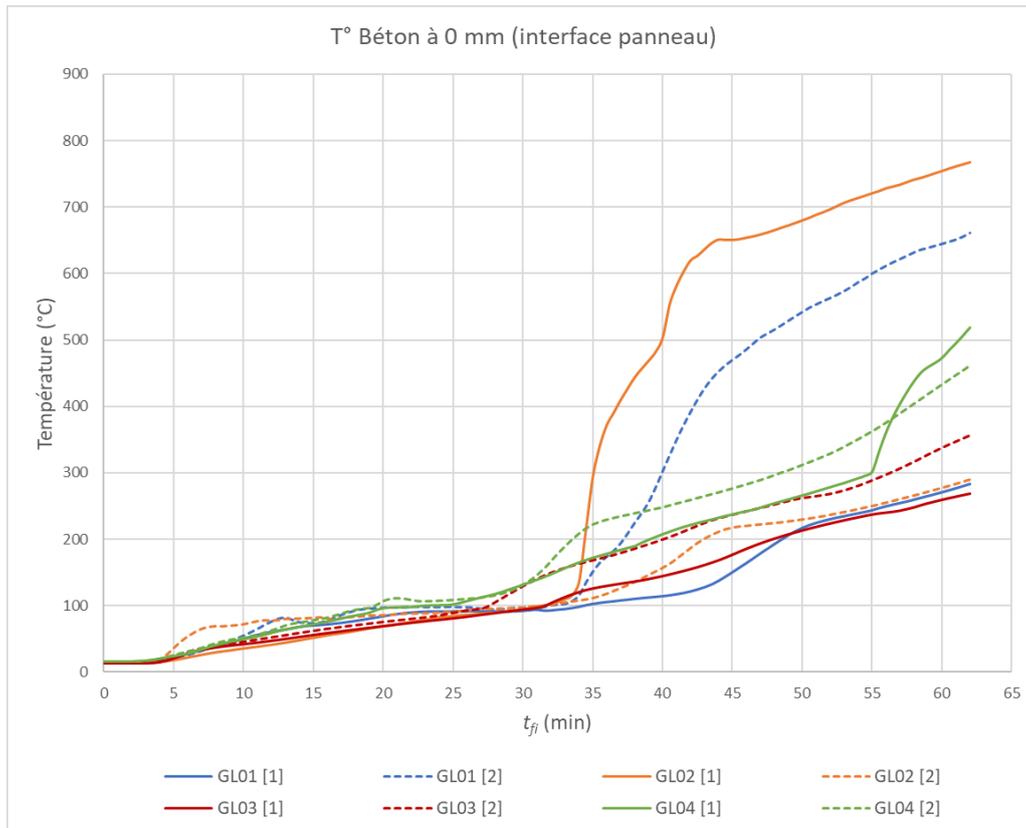


Figure 47 : Evolution de la température dans le béton – à 0 mm (interface avec le panneau de coffrage)

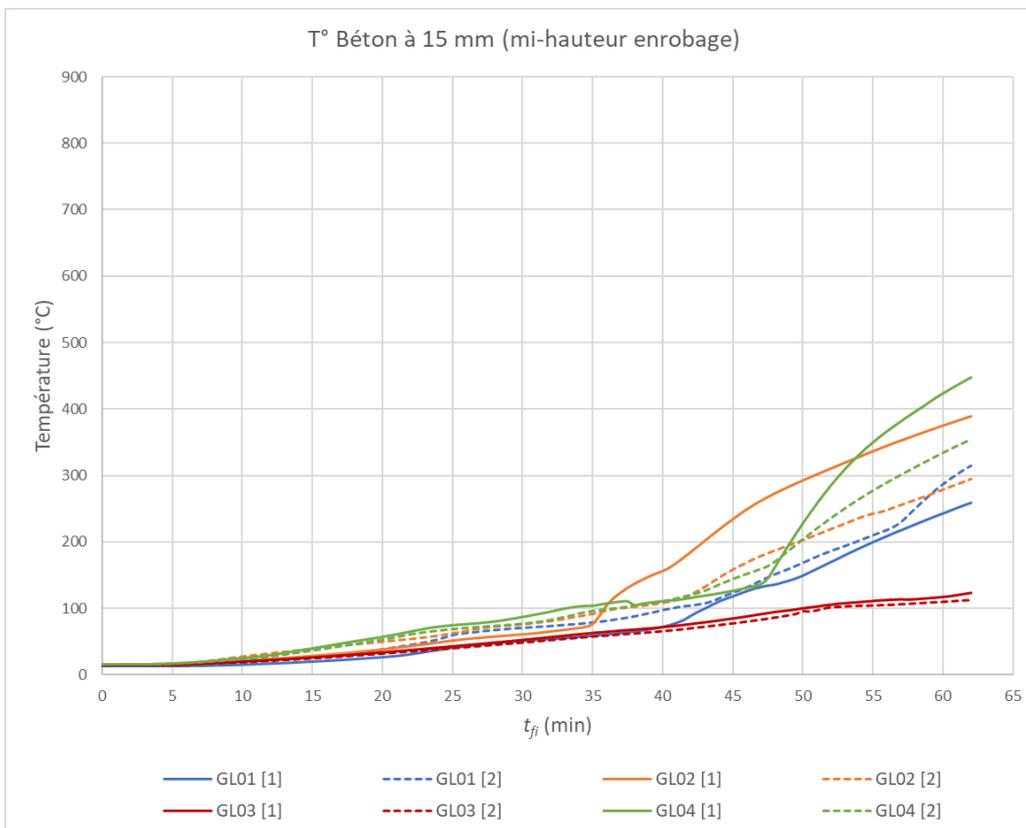


Figure 48 : Evolution de la température dans le béton – à 15 mm (mi-hauteur d'enrobage du treillis soudé)

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

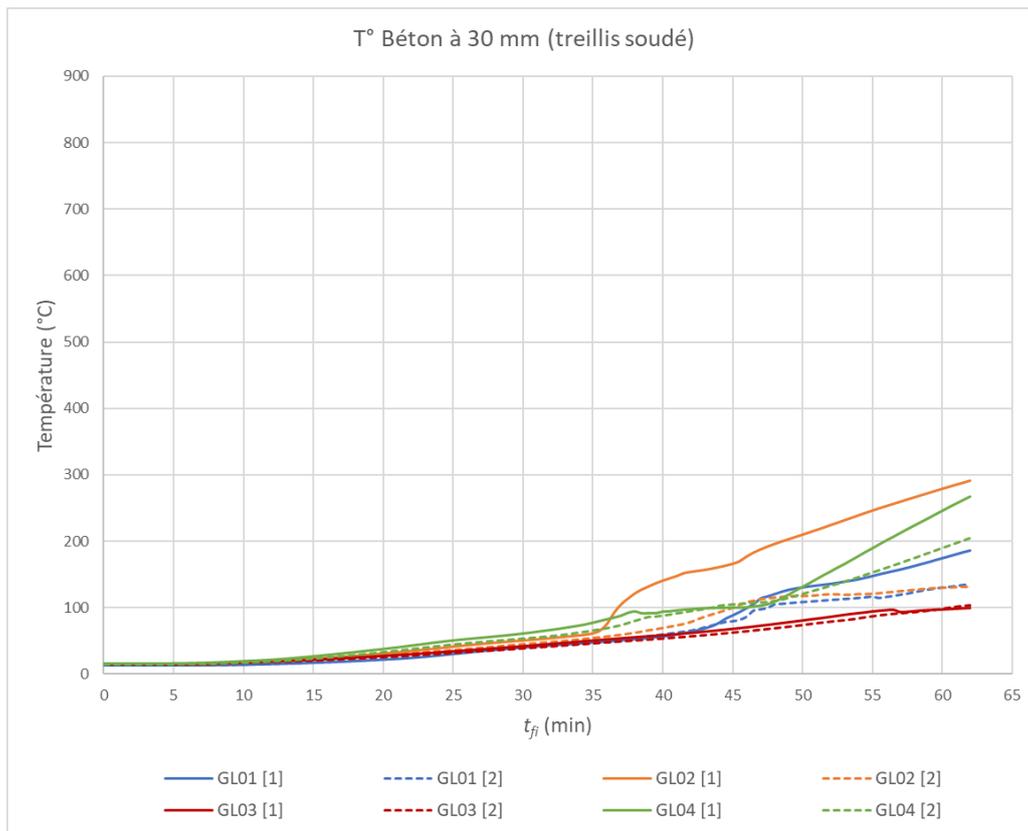


Figure 49 : Evolution de la température dans le béton – à 30 mm (au droit du treillis soudé)

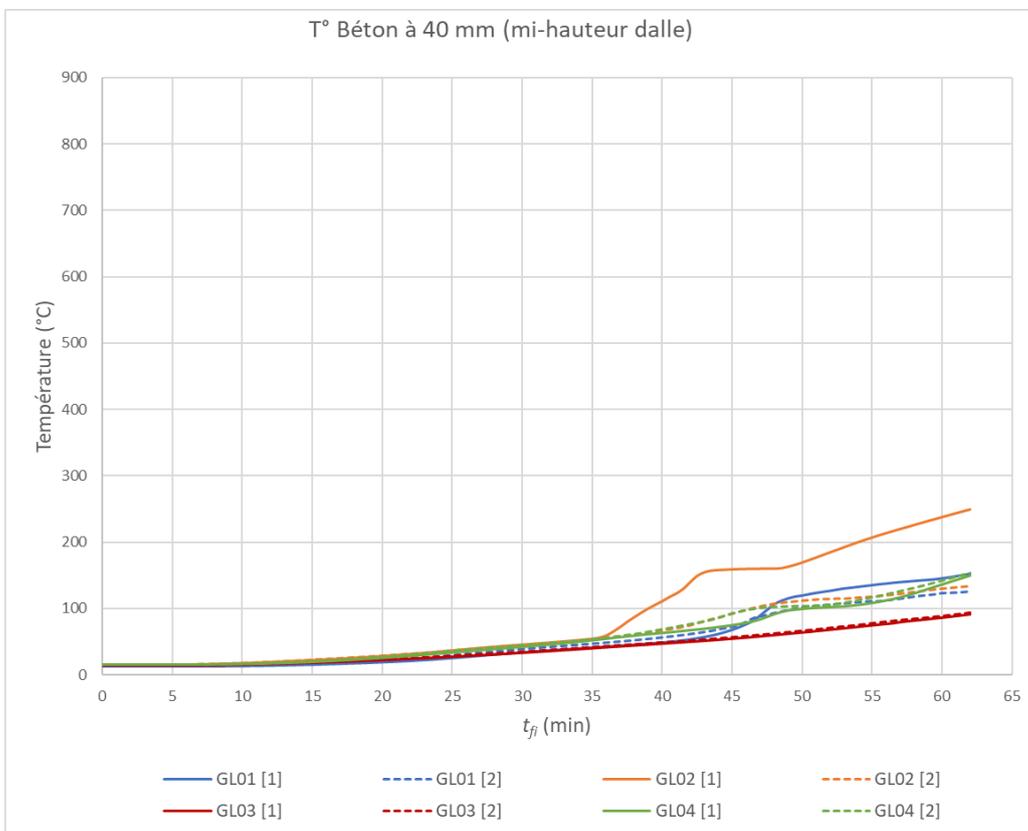


Figure 50 : Evolution de la température dans le béton – à 40 mm (mi-hauteur de la dalle)

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

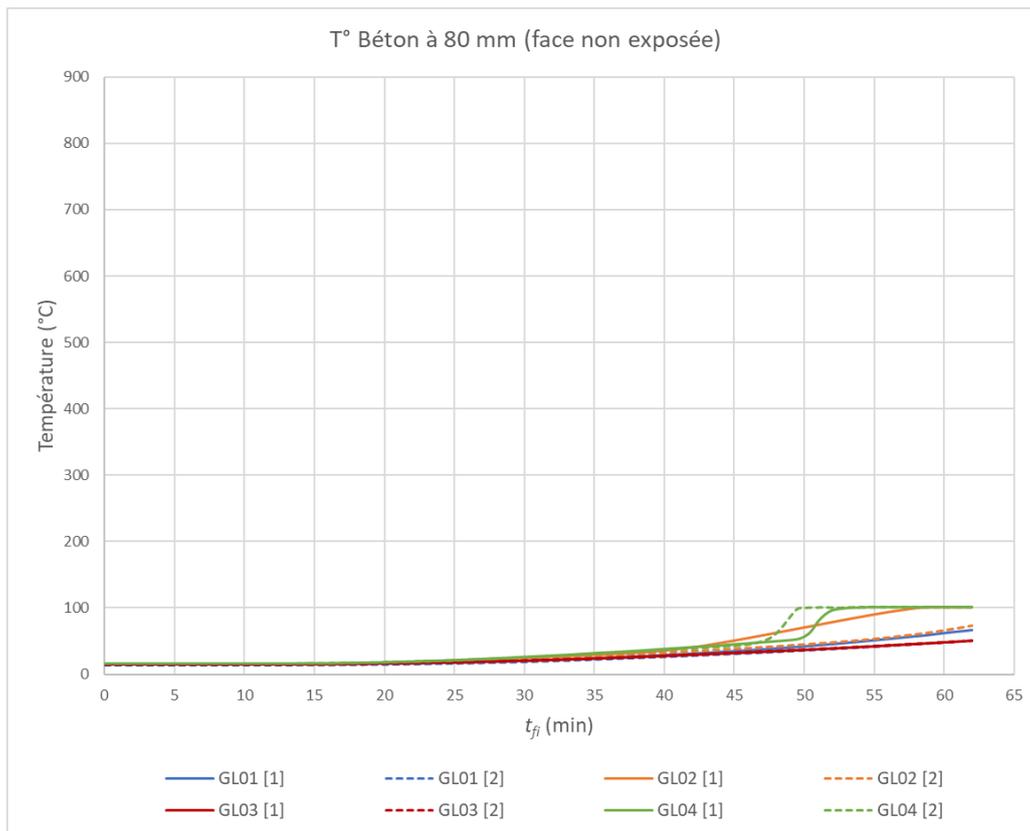


Figure 51 : Evolution de la température dans le béton – à 80 mm (face non exposée)

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

A.3 Evolution de la température dans le bois

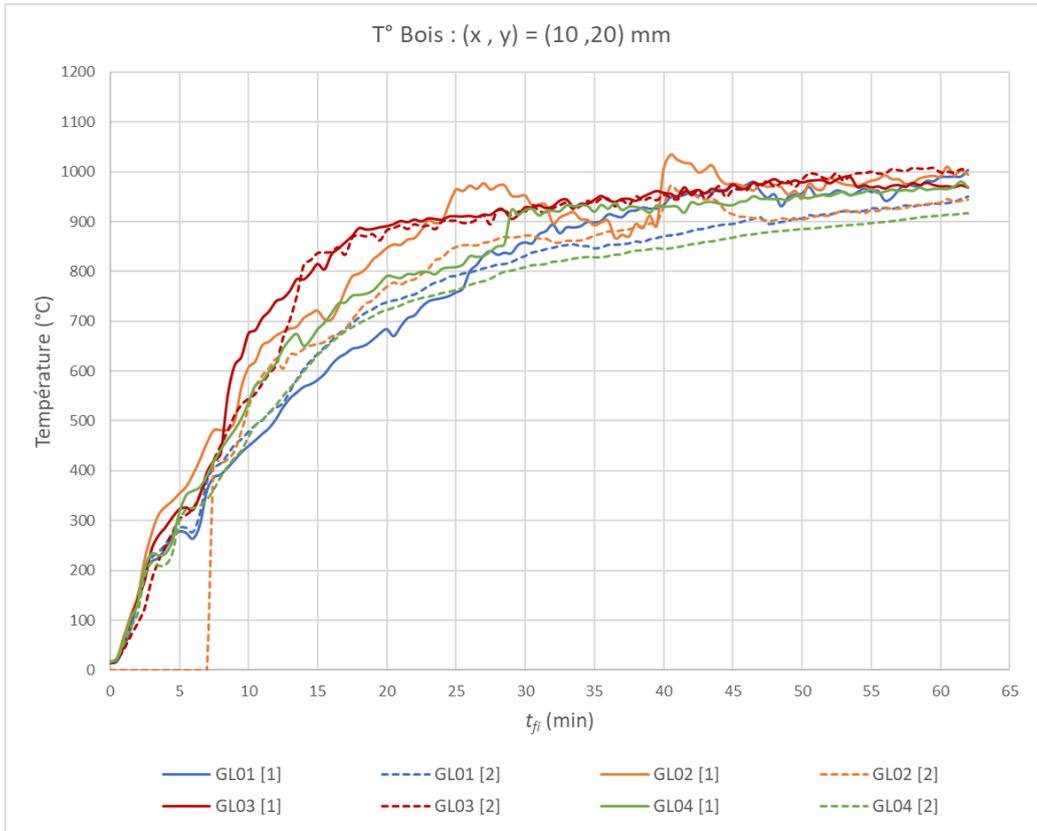


Figure 52 : Evolution de la température dans le bois – (x , y) = (10 , 20) mm

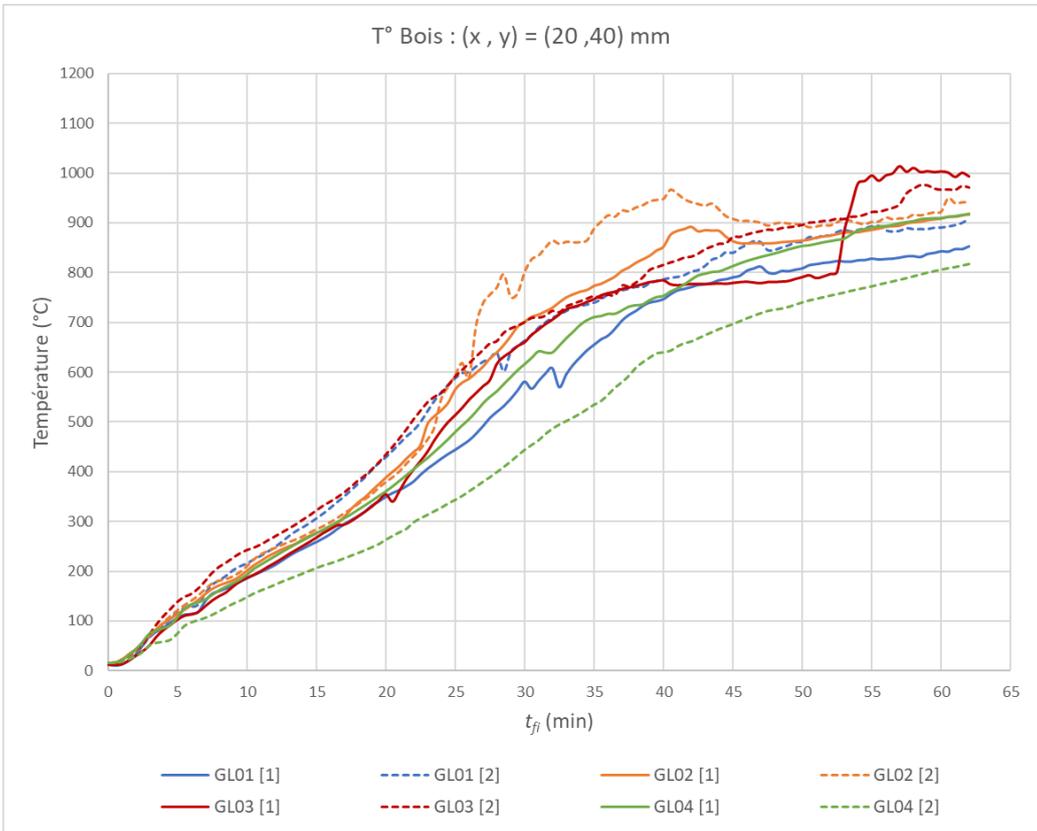


Figure 53 : Evolution de la température dans le bois – (x , y) = (20 , 40) mm

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

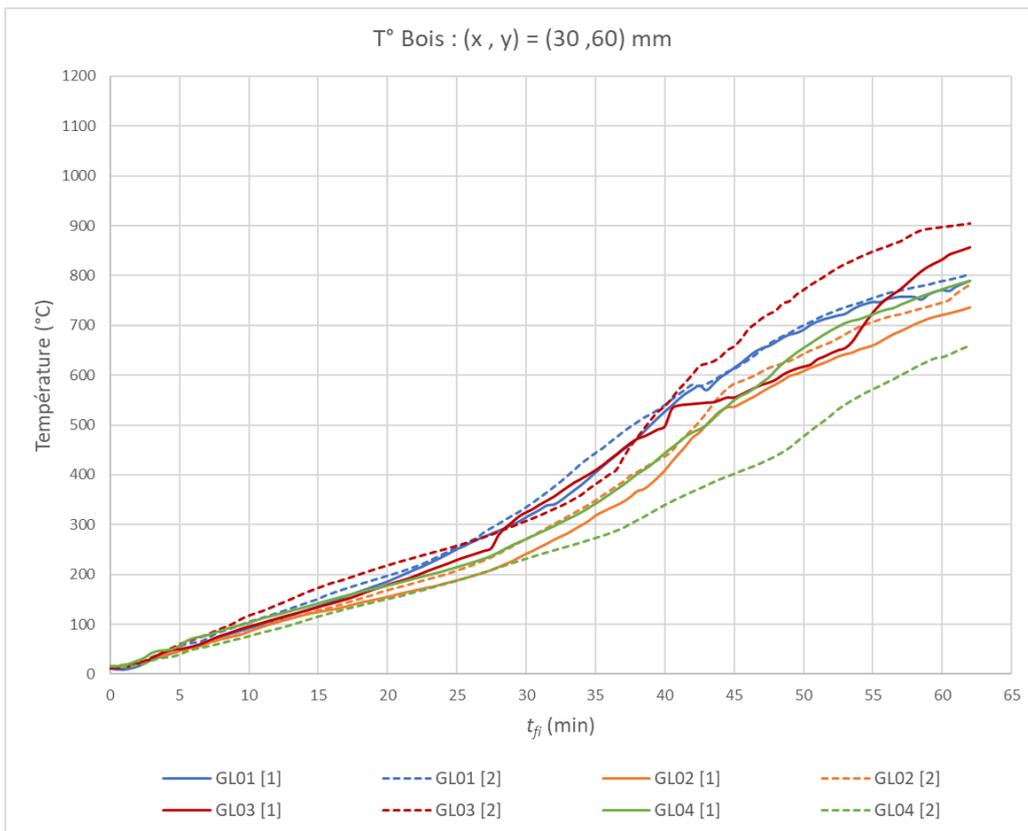


Figure 54 : Evolution de la température dans le bois – (x, y) = (30, 60) mm

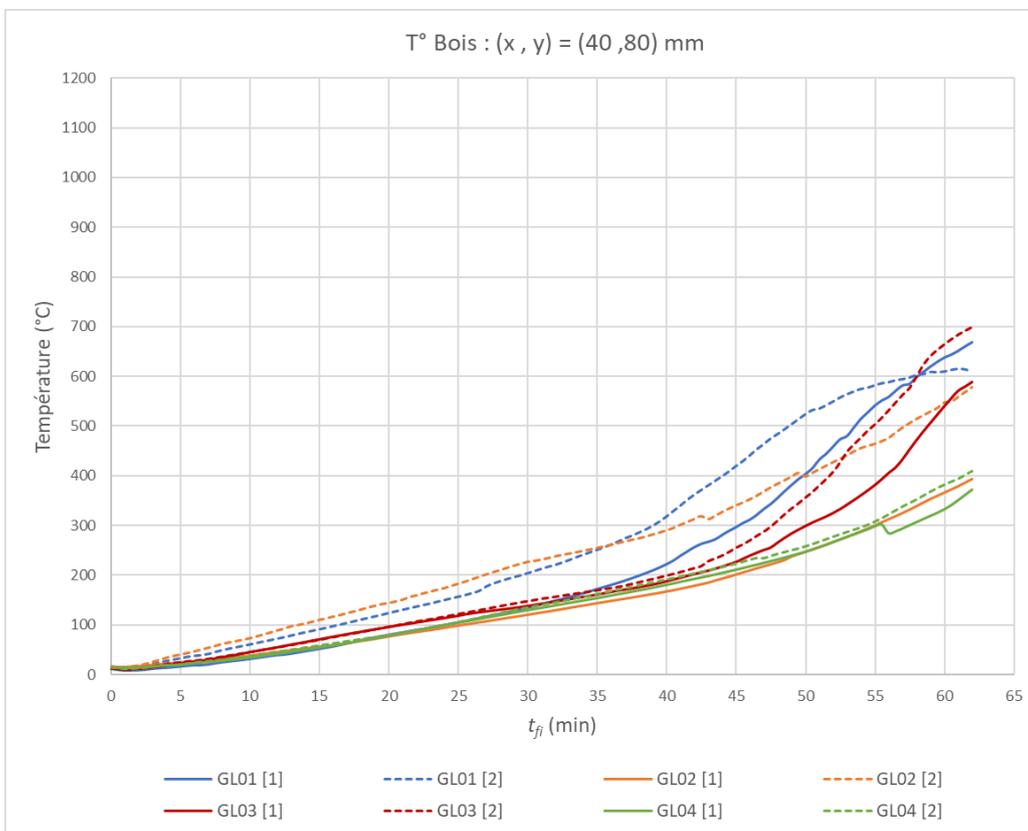


Figure 55 : Evolution de la température dans le bois – (x, y) = (40, 80) mm

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

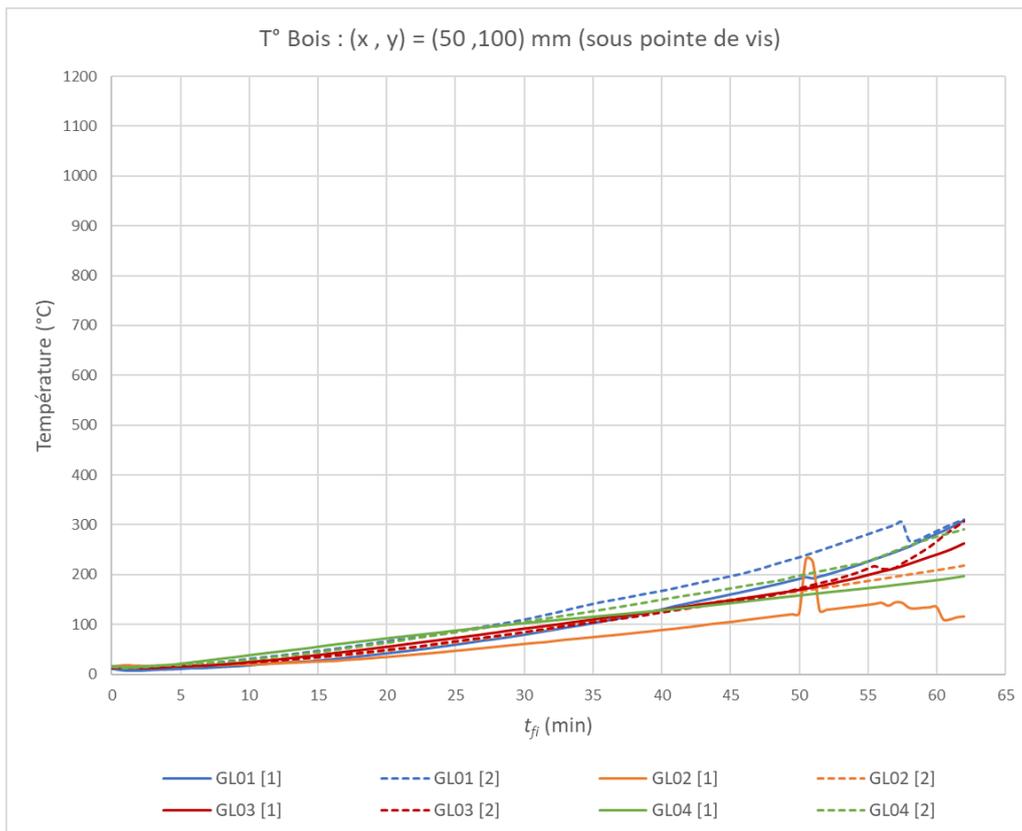


Figure 56 : Evolution de la température dans le bois – (x, y) = (50, 100) mm sous la pointe des vis

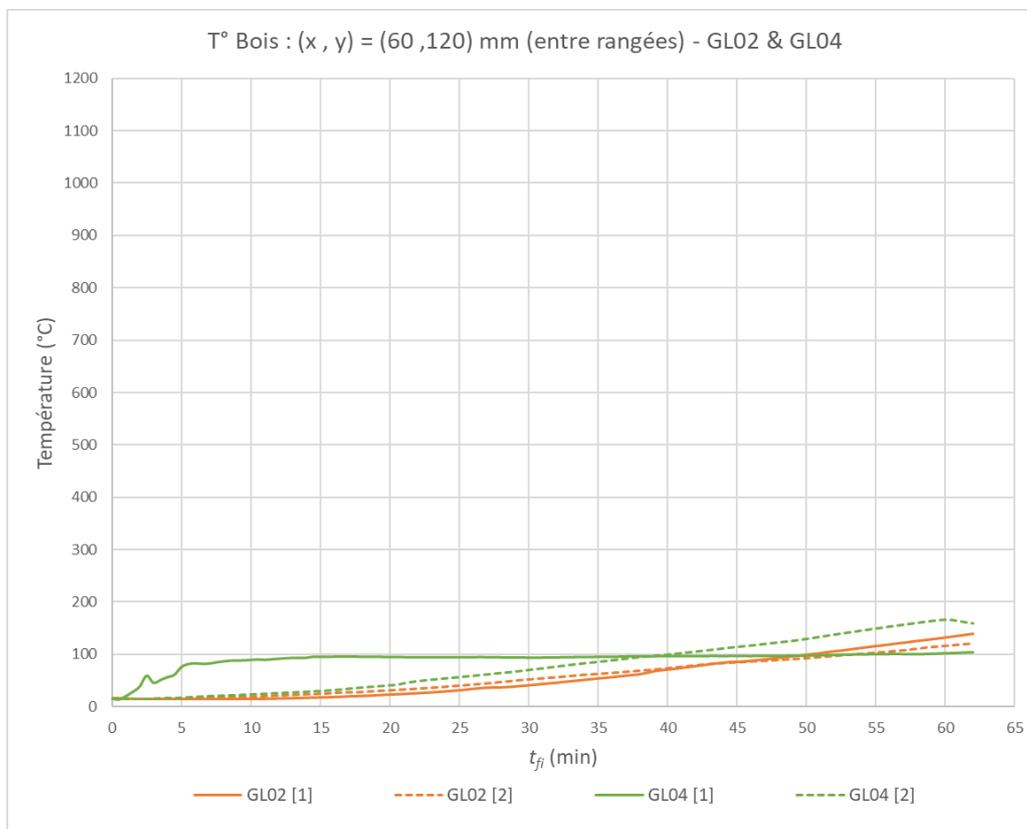


Figure 57 : Evolution de la température dans le bois – GL02 & GL04 entre rangées (x, y) = (60, 120) mm

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

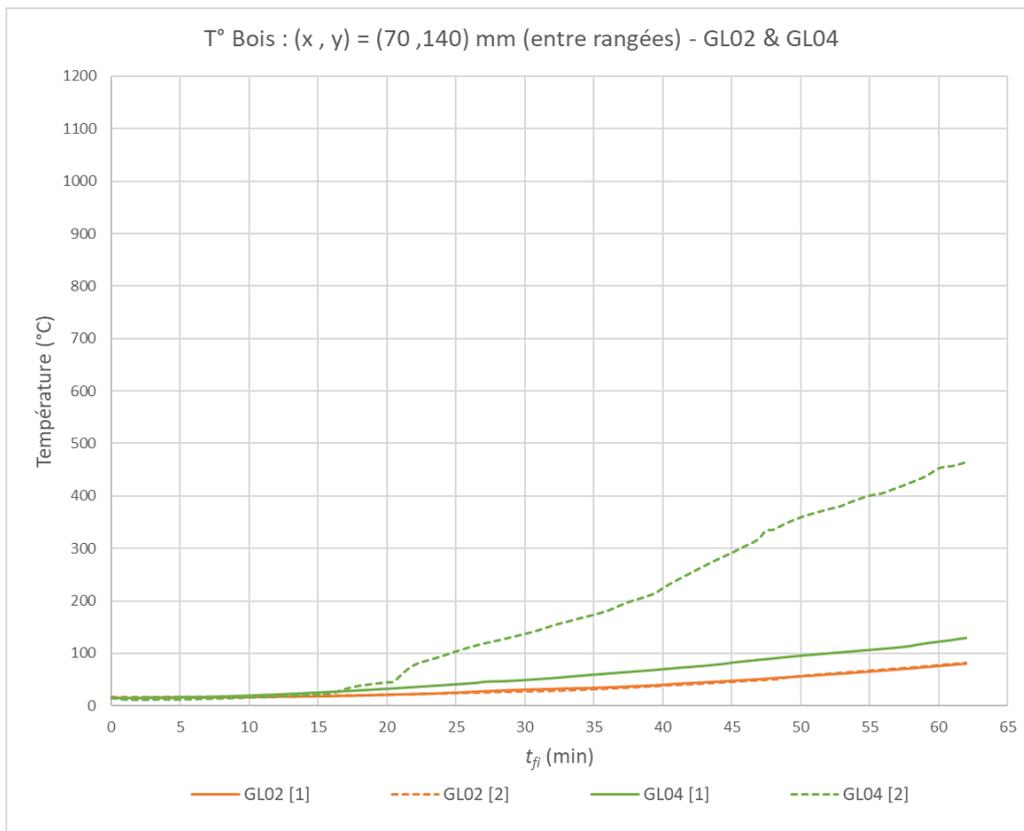


Figure 58 : Evolution de la température dans le bois – GL02 & GL04 entre rangées (x , y) = (70 , 140) mm



Figure 59 : Evolution de la température dans le bois – GL02 & GL04 à l'axe, entre rangées (x , y) = (80 , 160) mm

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

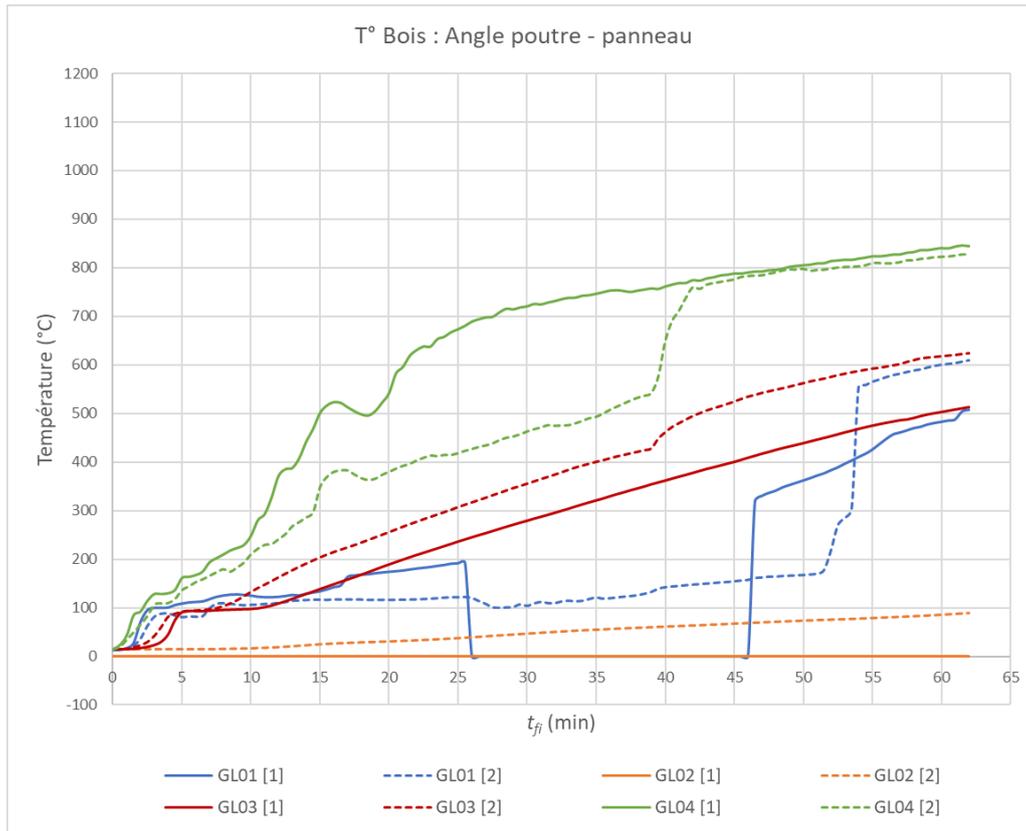


Figure 60 : Evolution de la température dans le bois – Thermocouple à l'angle entre le panneau et la poutre bois

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

ANNEXE B RAPPORTS D'ESSAIS DU CSTB

Il convient de se référer aux rapports d'essais dont les fichiers sont fournis concomitamment au présent rapport.

Pour mémoire :

- L'essai sur la poutre GL01 fait l'objet du rapport N° DSSF 21-02350/**A**
- L'essai sur la poutre GL02 fait l'objet du rapport N° DSSF 21-02350/**B**
- L'essai sur la poutre GL03 fait l'objet du rapport N° DSSF 21-02350/**C**
- L'essai sur la poutre GL04 fait l'objet du rapport N° DSSF 21-02350/**D**