

SESSION 2023

CAPET
CONCOURS EXTERNE ET CAFEP CORRESPONDANT
ET TROISIEME CONCOURS

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Option : INGÉNIERIE DES CONSTRUCTIONS

ÉPREUVE ÉCRITE DISCIPLINAIRE

Durée : 5 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.

Tournez la page S.V.P.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours externe du CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1411E	101	9311

► **Concours externe du CAFEP/CAPET de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1411E	101	9311

► **Troisième concours externe du CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDV	1411E	101	9311

OBJECTIFS DE L'ÉPREUVE :

L'épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable, à partir de l'exploitation d'un dossier technique, de conduire une analyse critique de solutions technologiques et de mobiliser ses connaissances scientifiques et technologiques pour élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances d'un système ou d'un processus lié à la spécialité et définir des solutions technologiques.

Lecture du sujet :

durée indicative : 30 min.

Partie n°1 : analyses de solutions techniques

durée indicative : 1h30

Par la comparaison de quelques modes constructifs d'un plancher, cette partie aborde différents aspects de conception tributaires d'exigences thermiques et de tenue au feu.

Partie n°2 : modélisation et mécanique des structures

durée indicative : 1h40

Dans un premier temps, cette partie porte sur la modélisation du vent sur une façade impactant la distribution des efforts dans les éléments de la structure. Dans un second temps, les études demandées portent sur le dimensionnement d'une partie de plancher ainsi que sur les conséquences des déformations d'une poutre.

Partie n°3 : géotechnique, procédés de construction

durée indicative : 1h20

Cette partie traite du principe de dimensionnement d'une fondation excentrée et aborde les techniques courantes de réalisation des fouilles d'une construction enclavée en site urbain.

DOCUMENTS FOURNIS :

Sujet :

Documents Techniques :

- DT 01 – Dossier de plans
- DT 02 – Extrait « RICT »
- DT 03 – Extrait « Norme Incendie Européenne »
- DT 04 – La thermique du feu
- DT 05 – Résultats d'essais « CLT au FEU »
- DT 06 – Extrait Eurocode 5
- DT 07 – Formulaire « poutre »

Documents Réponses

- DR 01 – Profils des températures et des conductivités dans l'épaisseur du panneau CLT
- DR 02 – Modèle analogique en conduction

AVIS AUX CANDIDATS :

Les **3 parties** sont indépendantes et doivent être **traitées sur des copies séparées et paginées**. Les **références des questions** doivent être **clairement indiquées** avant chaque réponse.

- Le candidat remettra en fin d'épreuve ses copies paginées.
- Dans le cas où un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale très lisiblement dans sa copie, propose la correction envisagée et poursuit l'épreuve en conséquence.
- Il sera tenu compte dans la correction de la clarté des réponses, ainsi que de la qualité graphique de la copie.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le projet consiste en la construction d'un bâtiment de type R+6 (**Figure 1**) sur un niveau de sous-sol avec une emprise au sol d'environ 172 m² en site urbain. Le bâtiment, réalisé en mitoyenneté (**Figure 2**), comprend 11 logements en étages et un local commercial au rez de chaussée. Il s'inscrit dans une volonté de répondre aux exigences environnementales et sociétales liées au développement durable contribuant à l'émergence de nouveaux produits et de procédés innovants.

Les originalités du projet sont, d'une part une structure hybride avec une mixité bois/béton des éléments porteurs, et d'autre part, l'emploi d'un système constructif par panneaux de bois contrecollés à plis croisés (CLT : Cross Laminated Timber) pour la réalisation des planchers (**Figure 3**). De plus, les mitoyennetés imposent des particularités du mode de conception et de réalisation des fondations.

Consulter le document DT01.

La structure principale du sous-sol et du RdC est en béton armé. La cage d'escalier et la cage d'ascenseur desservant tous les niveaux forment une structure continue sur l'ensemble des étages composé de voiles béton armé d'épaisseur 18 cm. À partir du R+1, une structure du type poteau-poutre en bois avec plancher bois (type CLT) et des murs à ossatures bois sont associés au noyau formé par les voiles BA de la cage d'ascenseur et des escaliers. Les fondations sont superficielles reposant sur des marnes infra gypseuses rencontrées à partir de 2,70 m de profondeur. Une charpente traditionnelle bois à couverture en zinc à joints debout assure le couvert.

La cour arrière enclavée est partiellement végétalisée et elle est aménagée pour accueillir des garages à vélos. Le niveau bas fini se situe à :

- +47,45 m, pour le sous-sol servant de caves, de rangement commerce et de locaux techniques ;
- +50,10 m, pour le RDC qui accueillera les locaux poubelles / poussettes / vélos / ordures ménagères, l'activité commerce, le garage à vélos, et les parties communes (sas et hall).

Le faitage est à l'altitude +71,85 m et le plancher bas du R+6 se situe à +68,30 m.

La durée des travaux est estimée à 36 mois et le montant prévisionnel de l'opération est de 1 600 000 € HT.



Figure 1 : Façade « RUE »

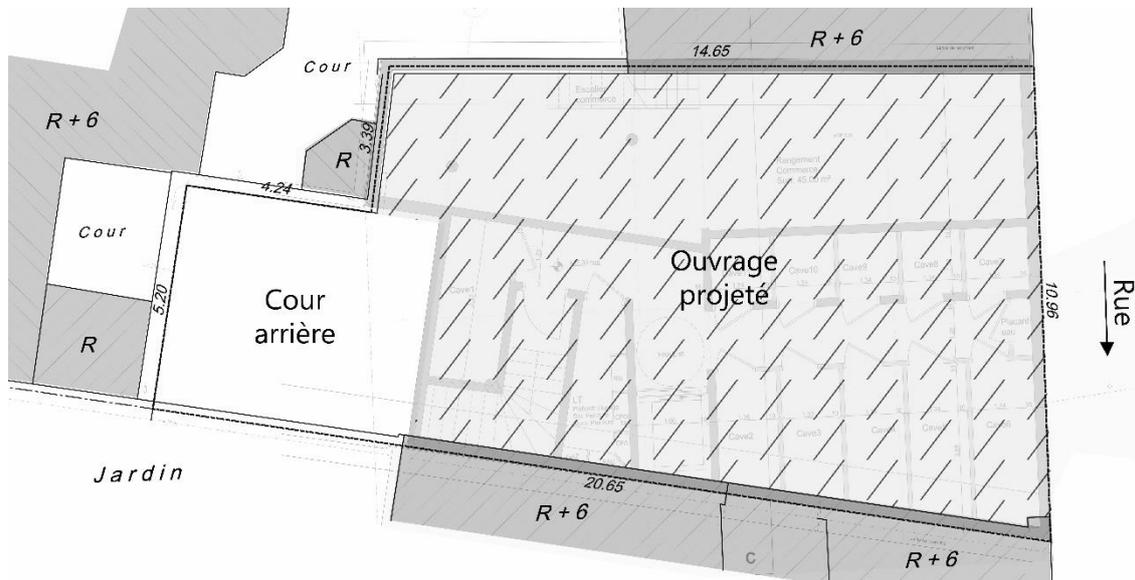


Figure 2 : Plan « PARCELLE »

Les panneaux CLT (**Figure 3**) sont réalisés à partir de planches de bois massif empilées en couches croisées à 90° et collées entre elles sur toute leur surface. Le nombre de couches (ou plis) est impair. De ce fait, les plis extérieurs sont orientés dans la même direction. Les panneaux CLT sont constitués de 3, 5 ou 7 plis de manière standard. L'épaisseur des panneaux CLT dépend du nombre de plis et des combinaisons possibles entre les différentes épaisseurs de planches. Ils peuvent être employés en plancher (**Figure 3**) ou en mur.

Ces types de panneaux sont vendus sous diverses appellations commerciales et, bien que leur mode de constitution de base reste similaire, chaque fabricant possède un procédé qui lui est propre et qui relève d'un avis technique.

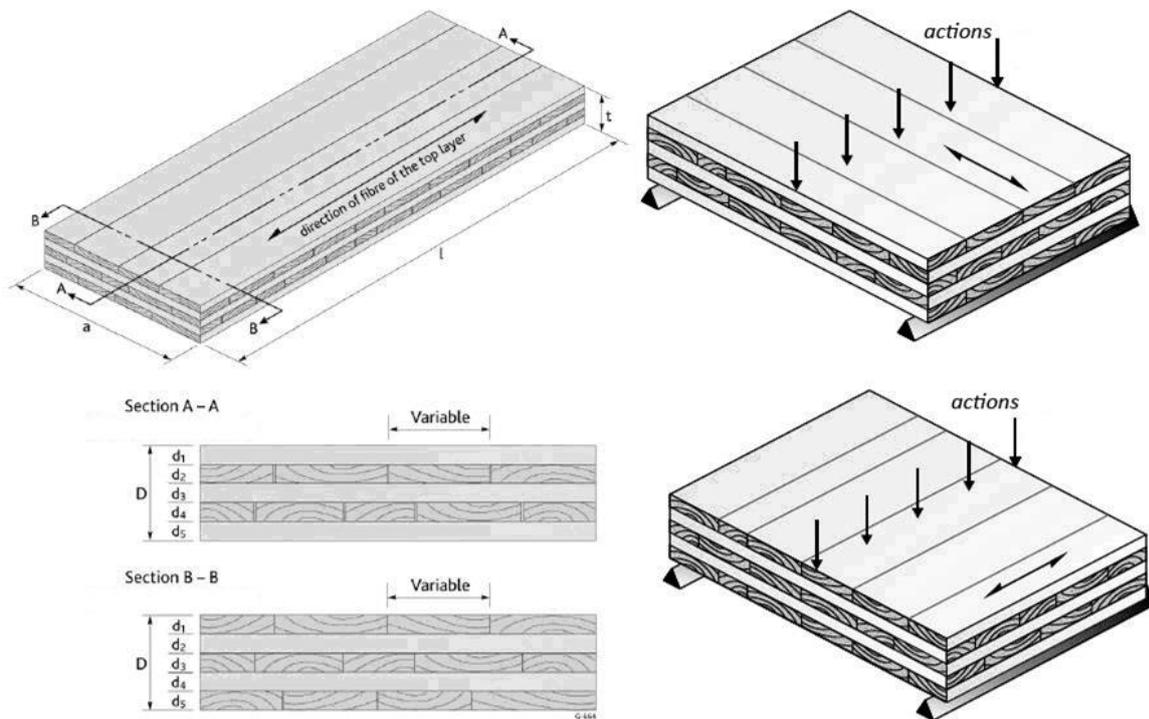


Figure 3 : Panneau CLT employé en plancher

Les principales raisons du développement et de l'essor du CLT peuvent se résumer à :

- une rapidité d'assemblage liée à la préfabrication et à une réduction des nuisances en phase chantier ;
- un impact environnemental très intéressant (car moins consommateur d'énergies fossiles et un bilan CO₂ avantageux) en comparaison aux procédés en béton armé ;
- une réduction sensible des coûts (matières premières et main d'œuvre) ;
- ...

Dans le cas d'immeubles multi-étagés, le procédé constructif en CLT montre des limites pour satisfaire les contraintes structurelles et les exigences réglementaires de protection contre les incendies imposées par les Eurocodes et la législation française. Les inconvénients et les limites de ce système constructif se font largement sentir lorsque l'on quitte le cercle du logement. Dès que l'on souhaite composer de larges espaces sans cloison intermédiaire, la nécessité d'une trame régulière, la superposition en coupe et en plan des montants d'ossature pour une descente de charge efficace limitent la composition architecturale. Enfin, la légèreté de la structure, les ancrages particuliers qu'imposent les liaisons et les nombreuses ferrures pénalisent ce type de structure vis-à-vis de leur stabilité notamment vis-à-vis de la tenue au feu. De fait, ce type d'ossature bois se limite aujourd'hui en France à des immeubles souvent d'habitation de quatre à six étages, lorsqu'elle est utilisée seule, sans complément de structure par des matériaux tiers comme du béton armé ou de l'acier.

PARTIE N°1 : ANALYSES DE SOLUTIONS TECHNIQUES

Les concepteurs et les constructeurs de bâtiments sont de plus en plus conscients que leurs choix en matière de matériaux et de systèmes constructifs peuvent réduire l'impact des constructions sur l'environnement. Ainsi, le bois et les systèmes constructifs associés sont actuellement mis en exergue. Une comparaison exhaustive entre des systèmes constructifs innovants et classiques qui utilisent des matériaux et des concepts différents soulèvent de très nombreuses difficultés. Aussi, cette partie de l'épreuve se limite aux objectifs particuliers suivants :

- être capable de situer le contexte législatif et technique d'un dossier technique de construction ;
- être capable d'exploiter des informations scientifiques et techniques ;
- être capable de comparer des « exigences performancielles » de solutions techniques.

La notice architecturale du projet met en avant diverses qualités du système constructif en panneaux CLT notamment sa légèreté, ses performances acoustiques et thermiques ... Les figures ci-dessous (Figure 4 et Figure 5) définissent deux solutions courantes pour un plancher entre deux logements respectivement en béton armé et en bois CLT.

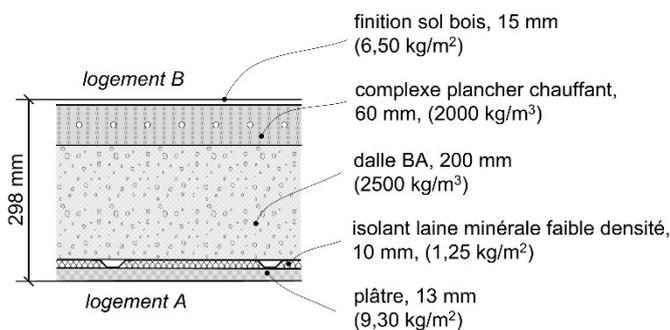


Figure 4 : Plancher - Solution BA

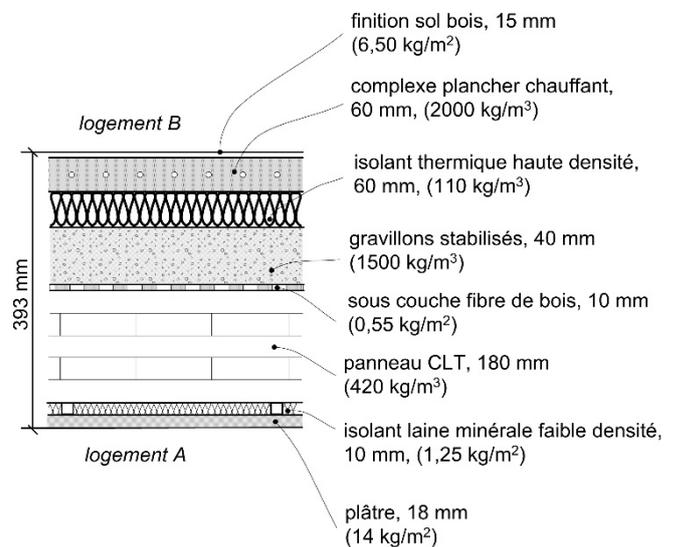


Figure 5 : Plancher - Solution CLT

Question n°1 :

« L'assurance décennale » crée une obligation d'assurance qui vise les acteurs de la construction (architectes et entreprises) et les maîtres d'ouvrage et garantit les constructions contre tout vice qui priverait le futur utilisateur d'un usage normal de la construction.

Dans ce cadre, **préciser** les procédures et les dispositions réglementaires nécessaires afin d'employer un produit ou un procédé innovant en France dans le domaine de la construction.

Question n°2 :

Pour un 1 m² de plancher, **calculer** la masse de la solution CLT du projet (Figure 5) et celle d'une solution classique en béton armé (Figure 4). **Comparer** et **commenter** les valeurs déterminées.

Question n°3 :

Pour les deux solutions (**Figure 4** et **Figure 5**), les valeurs caractéristiques thermiques des différentes couches sont données dans le **Tableau 1** et le **Tableau 2**.

Pour un 1 m^2 de plancher, lorsque le « système plancher chauffant » est à l'arrêt, **calculer** et **comparer** les coefficients de transmission thermique par conduction des deux solutions.

Désignation	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$]	R [$\text{m}^2\cdot\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$]
finition sol bois, 15 mm	---	0,086
complexe plancher chauffant, 60 mm	1,15	0,052
dalle BA, 200 mm	1,40	0,143
laine minérale faible densité, 10 mm	0,02	0,500
plâtre, 13 mm	0,35	0,037
	$\Sigma =$	0,818

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques à température ambiante des couches de la solution BA

Désignation	λ	R
finition sol bois, 15 mm	---	0,086
complexe plancher chauffant, 60 mm	1,15	
isolant th. haute densité, 60 mm	0,024	
gravillons stabilisés, 40 mm	1,20	
sous couche fibre de bois, 10 mm	0,035	
panneau CLT, 180 mm	0,13	
laine minérale faible densité, 10 mm	0,02	
plâtre, 18 mm	0,35	
	$\Sigma =$	

Tableau 2 : Caractéristiques thermiques à température ambiante des couches de la solution CLT

Question n°4 :

Consulter les documents DT02 et DT03.

Les documents techniques **DT02** et **DT03** présentent d'une part, un extrait du **RICT** (Rapport Initial de Contrôle Technique) rédigé par le bureau de contrôle relatif à la sécurité incendie de l'ouvrage et d'autre part, les éléments de compréhension de la norme européenne.

Question 4.1 – Expliquer en quelques lignes les grands principes régissant la prévention et la protection des bâtiments vis-à-vis des incendies et préciser les cinq termes : « résistance au feu », « réaction au feu », « stable au feu », « pare-flamme », « coupe-feu ».

Question 4.2 – Donner le classement européen REI des planchers entre deux logements.

Question 4.3 – Expliciter les raisons qui ont conduit au choix du matériau « béton armé » pour réaliser le rez de chaussée et le sous-sol.

Question n°5 :

Le plâtre est un matériau couramment employé dans la construction.

Après l'avoir défini brièvement, on vous demande de **citer** ses avantages et ses inconvénients notamment vis-à-vis de la qualité des ambiances et de la sécurité incendie.

Question n°6 :

Consulter les documents DT04 et DT05.

Afin de répondre aux exigences de la réglementation incendie, les deux solutions proposées par la **Figure 6** et la **Figure 7** sont envisagées. Par hypothèse, on s'intéresse uniquement au plancher haut d'un logement en étage courant dans lequel se déclare un incendie.

Afin d'établir l'avis technique des panneaux de CLT, un laboratoire spécialisé a réalisé les essais au feu présentés dans le document technique **DT05**.

Les deux configurations de planchers : « CLT seul » et « CLT+ plâtre » sont l'objet du questionnaire ci-après.

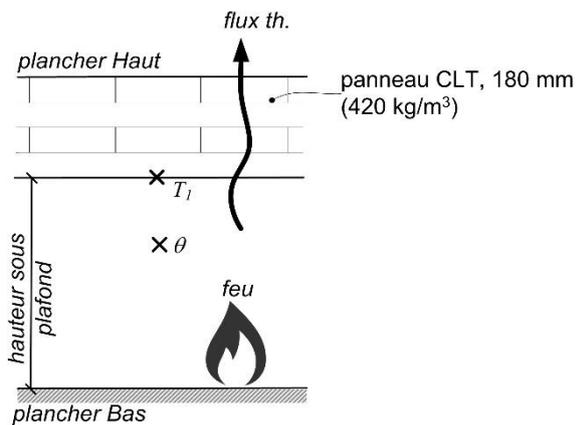


Figure 6 : Solution « CLT seul »

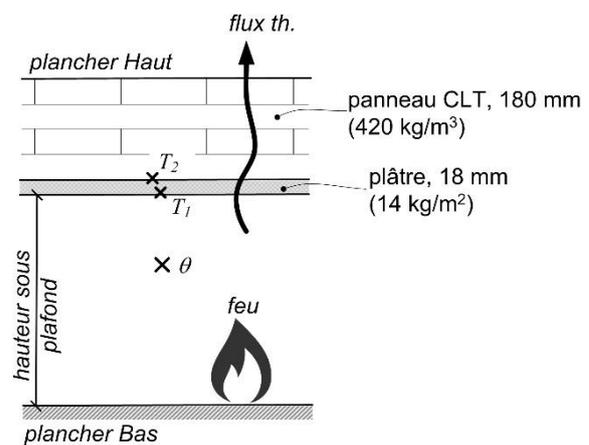


Figure 7 : Solution « CLT + plâtre »

Question 6.1 – À l'aide des documents **DT04** et **DT05**, au temps $t = 1 h$, **comparer** la température obtenue dans le cas d'un feu standard ISO 834 et la température régnant dans le four d'essais.

Question 6.2 – Le document technique **DT04** présente les évolutions conventionnelles de trois propriétés thermiques en fonction de la température (**DT04** : Figure n°5 à n°10).

Pour le matériau CLT et le matériau plâtre, **commenter** les courbes présentant les évolutions de la conductivité, de la densité et de la chaleur spécifique.

Question 6.3 – Le document **DT05** présente les résultats de l'essai sur le « CLT seul ».

Dans les encadrés du document réponse **DR01**, **déterminer** au temps $t = 1 h$ les valeurs de la température ($T_{\dot{\lambda}30mm}$) et de la conductivité thermique ($\lambda_{\dot{\lambda}30mm}$) en un point situé à 30 mm de la face exposée au feu.

Question 6.4 – On adopte l’hypothèse d’un régime stationnaire autour du temps $t = 1\text{ h}$. Afin de déterminer la résistance thermique équivalente du panneau CLT ($R_{CLT, \text{éq.}, 1h}$) soumis à un incendie à l’aide d’un modèle analogique en conduction, on discrétise l’épaisseur en couche de 10 mm. Le document réponse **DR02** propose un tableau pré-rempli reprenant les différentes valeurs des températures et des conductivités dans les différentes couches du panneau.

- À l’aide des résultats précédents, **compléter** les cases grisées du document réponse **DR02** et **calculer** la valeur $R_{CLT, \text{éq.}, 1h}$ en $\text{m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$
- **Comparer** cette valeur de $R_{CLT, \text{éq.}, 1h}$ à la résistance thermique du panneau « CLT seul » à température ambiante $R_{CLT, \text{ambiant}}$ (se reporter au **Tableau 2**).
- **Préciser** l’évolution de la résistance thermique équivalente du panneau CLT au-delà d’une durée de 1 h d’incendie.

Question 6.5 – Afin de rendre compte de l’efficacité éventuelle d’une plaque de plâtre vis-à-vis d’un incendie, on envisage la solution présentée par la **Figure 8**.

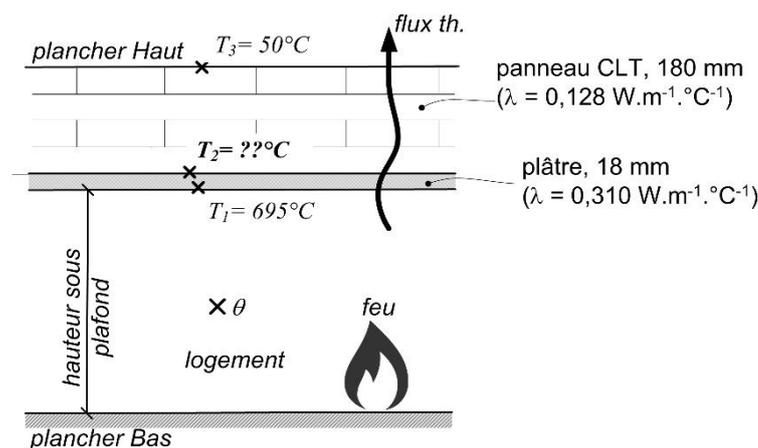


Figure 8 : Températures mesurées – Solution « CLT + plâtre »

- En adoptant l’hypothèse d’un régime stationnaire et les températures à différents endroits de l’épaisseur du plancher ainsi que les valeurs des conductivités thermiques indiquées sur la **Figure 8**, **déterminer** la température (T_2) à l’interface plâtre/CLT.
- Lors de l’incendie, on suppose que la charge combustible présente dans le logement créant le feu émet un flux de $\varphi_{in} = 100\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Le coefficient de transfert par convection est $h_{conv} = 25\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ et l’émissivité du plâtre est $\varepsilon_{plâtre} = 0,93$. À partir du bilan énergétique sur la face de plâtre exposée au feu ($\varphi_{in} = \varphi_{radiatif} + \varphi_{convectif} - \varphi_{conduction}$), **déterminer** la température θ (en Kelvin) de l’air dans le logement.
- **Déterminer** la durée (t_θ en minutes) nécessaire pour atteindre la température θ (valeur établie à l’item précédent) dans le cas d’un feu normalisé ISO834.

Question 6.6 – Dans le cas d'éléments en CLT protégés par des plaques de plâtre, les règles professionnelles (**Tableau 3**) précisent que les plaques de plâtre conservent leur effet protecteur jusqu'au moment t_{ch} . À partir de l'instant t_{ch} , la carbonisation du bois contrecollé commence avec une vitesse de combustion réduite. Cette phase d'incendie est suivie de l'instant t_f à partir duquel le revêtement cède et s'écroule. À partir de ce moment, le bois contrecollé commence à brûler à une vitesse accrue de l'ordre de 1,30 mm par minute.

Dans le cas de la solution « CLT + plâtre », selon les règles professionnelles (**Tableau 3**), **déterminer** le temps t_{ch} du début de la combustion derrière une couche de 18 mm de plâtre et le temps t_f .

- **Discuter** et **comparer** les valeurs obtenues à celles de la question précédente.

Éléments de construction de plafond		
	Bois massif avec revêtement direct	Plafond suspendu pour construction en bois massif
t_{100}	$2,8 * d - 22,7$	$2,8 * d - 22,7$
t_{ch}	$2,8 * d - 14$	$2,8 * d - 14$
t_f	$2,2 * d + 4$	$2,43 * d + 0,22$

d: Épaisseur de plaque de la couche extérieure en mm
 t_{100} : Moment d'une surtempérature de 100 K derrière le revêtement
 t_{ch} : Début de la combustion derrière le revêtement, en minutes
 t_f : Temps de destruction derrière le revêtement, en minutes

Tableau 3 : Règles professionnelles

Question n°7 :

À l'aide des éléments des questions précédentes, **rédigé** une synthèse mettant en évidence les avantages et les inconvénients de la solution CLT aux regards des différentes fonctions inhérentes à un plancher entre deux logements.

PARTIE N°2 : MODÉLISATION ET MÉCANIQUE DES STRUCTURES

La stabilité d'un bâtiment s'envisage dans un premier temps de façon globale en prenant en compte les actions mécaniques verticales liées au poids propre et aux charges d'exploitation ainsi que de nombreuses actions latérales (vent, dilatation, retrait, séismes ...). Puis, dans une seconde phase, on procède aux dimensionnements et/ou aux vérifications des éléments de structure (planchers, poutres, poteaux, murs ...). L'objectif de cette partie est centré sur les modélisations mécaniques et il s'agit notamment :

- d'être capable de produire une analyse critique de différentes modélisations mécaniques relatives à la stabilité des ouvrages ;
- d'être capable de pré-dimensionner et/ou de vérifier des éléments courants de structure.

Dans un premier temps, on s'intéresse au principe de partitionnement de l'action du vent et à sa modélisation sur une surface externe à l'ouvrage afin d'établir des modèles mécaniques équivalents. Puis, on envisage le principe de contreventement du bâtiment. Pour les différentes questions proposées, la géométrie de l'immeuble (R+ 6) à usage d'habitation a été simplifiée. On adopte les hypothèses suivantes :

- $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$ selon Oz ;
- les étages sont considérés comme identiques ;
- il n'est pas tenu compte du niveau de sous-sol ;
- le vent exerce une pression normale sur la façade Est de l'immeuble d'aire $B \times H = 222 \text{ m}^2$ avec $B = 10 \text{ m}$ et $H = 22 \text{ m}$.

Dans un second temps, on s'intéresse au pré-dimensionnement d'un panneau de plancher en CLT et à la poutre continue en lamellé-collé du plancher haut du R+3.

Question n°8 :

L'étude de la volumétrie de l'ouvrage et la descente de charges ont permis d'obtenir les intensités et les localisations respectives des charges permanentes (\vec{G}) et variables (\vec{Q}) présentées par la **Figure 9**. Les intensités et les localisations de ces actions verticales sont données sur le niveau « bas RdC » pris en référence.

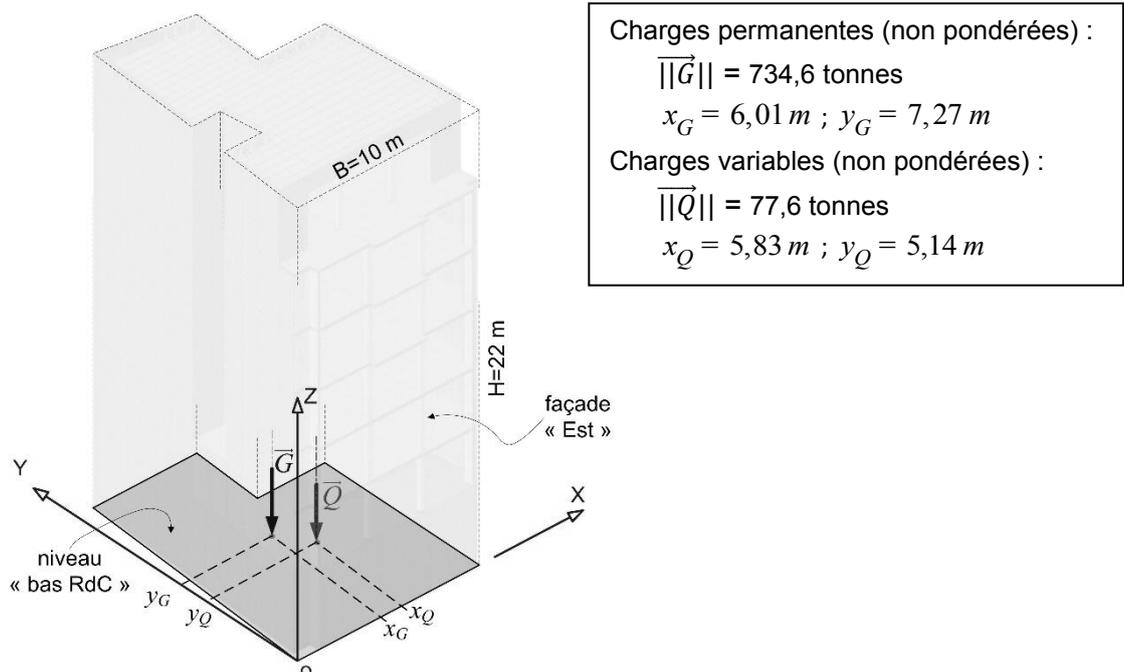


Figure 9 : Localisations des actions verticales

En adoptant la combinaison fondamentale à l'ELU ($1,35G + 1,5Q$) et avec les valeurs indiquées sur la **Figure 9**, déterminer la résultante des deux forces $\vec{P}_u = \vec{G}_u + \vec{Q}_u$ ainsi que les coordonnées du point $C(X_C; Y_C; 0)$ localisant la position de \vec{P}_u sur le plan O_{XY} (le point C désigne le centre des masses).

Question n°9 :

La modélisation mécanique de l'action du vent sur la façade Est dans le repère O_{XYZ} présentée par la **Figure 10** est un modèle simplifié qui approche la réalité physique lorsque le vent est normal à la façade. Pour cette question, aucune pondération ne sera appliquée aux actions du vent.

Question 9.1 – La relation ci-après permet d'évaluer la pression du vent (p) en fonction de sa vitesse (v) :

$$p = \frac{v^2}{1630} \quad \text{avec } v \text{ en m/s et } p \text{ en kN.m}^{-2}$$

Calculer la vitesse du vent en km/h à l'altitude $z = 22 \text{ m}$ si $p = p_{\max} = 600 \text{ Pa}$

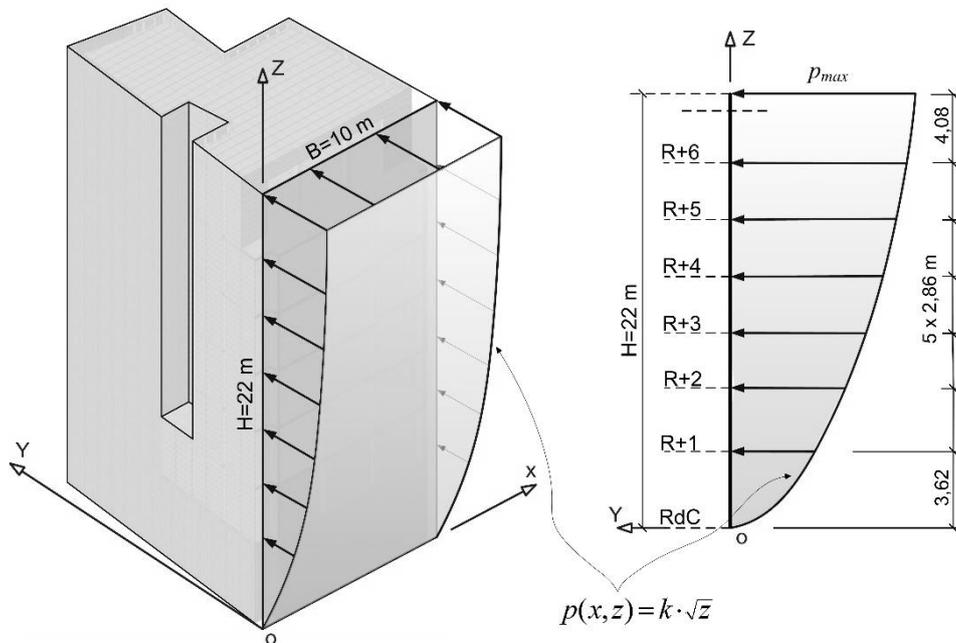


Figure 10 : Modèle de l'action du vent sur la façade Sud

Question 9.2 – L'expression de la pression normale exercée par le vent (**Figure 10**) sur la façade Est adopte la forme :

$$p(x, z) = k\sqrt{z}$$

En considérant la **façade Est** comme un plan rectangulaire vertical, en sachant qu'à l'altitude $z = 22 \text{ m}$, on a $p_{\max} = 600 \text{ Pa}$, on vous demande de **déterminer** :

- la constante k et l'intensité de la résultante $||\vec{W}||$ des forces de pression du vent ;
- la localisation $\Omega(x_\Omega, 0, z_\Omega)$ du point d'intersection de la direction de \vec{W} avec le plan O_{XZ} (c'est-à-dire le centre de pression).

Question 9.3 – En adoptant $\|\vec{W}\| = 88 \text{ kN}$ et $\Omega(5,00 \text{ m}; 0 \text{ m}; 13,20 \text{ m})$, **exprimer** le torseur d'action mécanique $[T_w]_C$ du vent au point $C(6,00 \text{ m}; 7,05 \text{ m}; 0 \text{ m})$ et en déduire les effets du vent en C .

Question 9.4 – **Expliquer** pour quelles raisons les modèles de pression normale du vent sur la façade Est présentés par la **Figure 11** et la **Figure 12** peuvent produire des écarts importants par rapport aux effets réels en C .

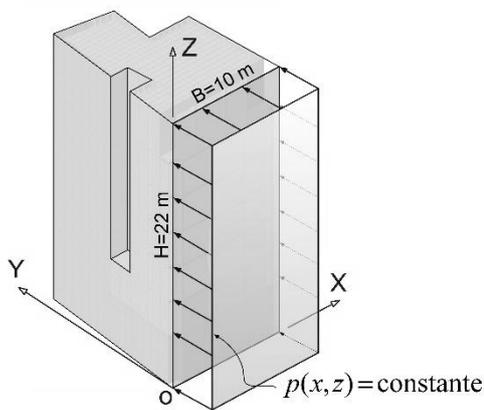


Figure 11 : Répartition uniforme du vent

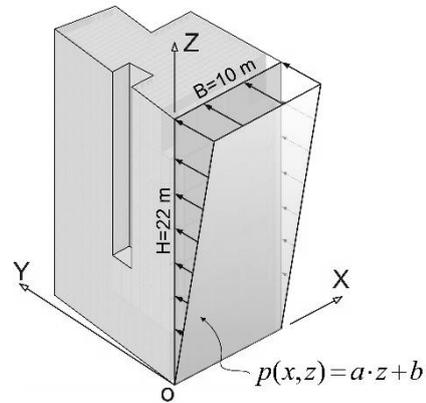


Figure 12 : Répartition linéaire du vent

Question 9.5 – Dans le cas d'un immeuble où $B < H < 2B$, l'Eurocode 1 préconise la modélisation de la pression du vent sur un plan vertical présentée par la **Figure 13**. La pression normale est scindée en deux parties uniformes, la première d'intensité $p_1 = \text{constante} = 160 \text{ Pa}$ agissant pour $0 \text{ m} \leq z \leq 10 \text{ m}$, et la seconde d'intensité $p_2 = \text{constante} = 600 \text{ Pa}$ agissant pour $10 \text{ m} \leq z \leq 22 \text{ m}$. Les valeurs des pressions indiquées sur la **Figure 13** sont non pondérées.

Justifier les raisons qui conduisent à la modélisation préconisée par l'Eurocode 1.

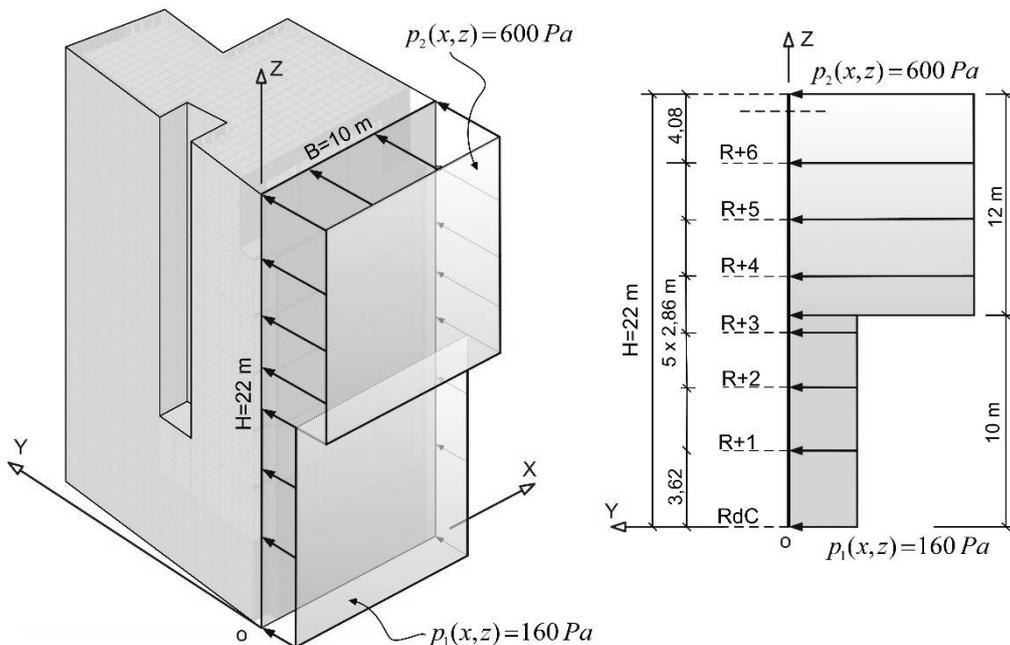


Figure 13 : Modèle de répartition du vent selon l'Eurocode 1

Question n°10 :

Consulter les documents DT06, DT01.4 et DT01.6.

De façon classique, les calculs des éléments de structures en bois se font conformément à l'Eurocode 5. Cependant, le dimensionnement des planchers en CLT se fait en référence à l'avis technique émis par l'organisme certificateur.

La valeur de calcul est obtenue sur la base d'une valeur ultime caractéristique, divisée par un coefficient partiel propre au matériau (γ_M) et pondérée par un coefficient de modification (k_{mod}) prenant en compte l'effet combiné de l'hygroscopie (ou des variations d'hygroscopie) et de la durée de charge. A cela peuvent s'appliquer également les coefficients k_{sys} et k_h .

$$R_d = k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_M} \times k_{sys} \times k_h$$

R_d : valeur de calcul du paramètre mécanique

k_{mod} : coefficient de modification, fonction de la durée de chargement et du taux hygroscopique des bois structuraux

X_k : valeur caractéristique du paramètre mécanique

γ_M : coefficient partiel pour le matériau considéré

k_{sys} : coefficient d'effet système

k_h : coefficient de hauteur

On s'intéresse au plancher haut du R+3 (DT01.4 et DT01.6) situé dans la zone logement. Les charges permanentes sont définies par la composition du plancher donnée Figure 5 et la charge d'exploitation est de $Q = 1,50 \text{ kN.m}^{-2}$. On adopte les hypothèses suivantes concernant les panneaux CLT (Figure 14, Figure 15) :

- portée moyenne du plancher : $l = 3,70 \text{ m}$
- panneau CLT 5 plis, épaisseur $h = 180 \text{ mm}$
- DL : plis extérieurs parallèles au sens de la portée

$$k_{mod} = 0,80 ; \gamma_M = 1,30$$

$$X_k = f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$$

$$k_{sys} = 1,00 ; k_h = 1,00$$

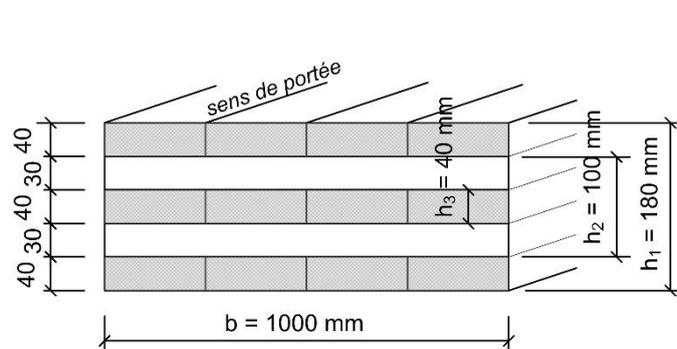


Figure 14 : Panneau CLT

Question 10.1 – La Figure 15 présente le schéma mécanique d'un panneau CLT.

Déterminer l'intensité de la charge permanente et de la charge d'exploitation sollicitant un panneau d'une largeur $b = 1 \text{ m}$. En déduire que la valeur de l'action linéique pondérée à l'ELU vaut : $p_u = 1,35 G + 1,50 Q = 6,10 \text{ kN.m}^{-1}$.

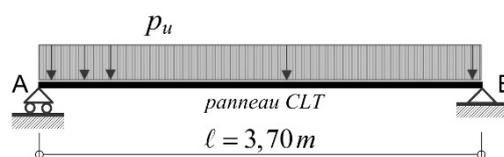


Figure 15 : Schéma mécanique – panneau CLT –

Question 10.2 – Tracer les graphes des sollicitations à l'ELU le long d'un panneau (**Figure 15**) et **donner** toutes les valeurs particulières.

Question 10.3 – En négligeant les plis orthogonaux au sens de portée (**Figure 14**), **montrer** que le module de flexion (ω_{net}) de la section adopte la forme :

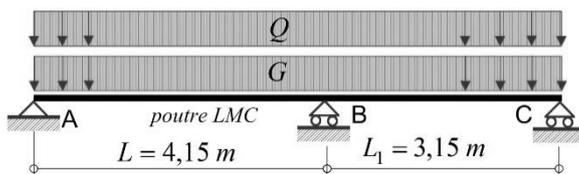
$$\omega_{net} = \frac{b}{6h} \times (h_1^3 - h_2^3 + h_3^3) \text{ et calculer sa valeur.}$$

Question 10.4 – Vérifier que les contraintes normales de flexion dans le CLT sont acceptables vis-à-vis des exigences de l'Eurocode 5 à l'ELU.

Question n°11 :

Consulter les documents DT06, DT07 et DT01.4, DT01.6.

Le schéma mécanique de la poutre continue 210 x 230 (file B') est présentée par la **Figure 16**. Les exigences acoustiques d'isolement entre deux logements (**DT01.4** et **DT01.6**) imposent une cloison isophonique (ép. 27cm) localisée sous la poutre continue 210 x 230 (file B') en bois lamellé-collé GL24h supportant le plancher CLT.



Charges permanentes (non pondérées et poids propre de la poutre non compris) :

$$G = 10,60 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Charges variables (non pondérées) :

$$Q = 5,90 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Figure 16 : Schéma mécanique – poutre LMC file B' –

Pour les calculs, on adoptera les valeurs suivantes :

$$k_{mod} = 0,80 ; \gamma_M = 1,30 ; X_k = f_{m,k} = 24 \text{ MPa} ; E_{0,mean} = 11,6 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$k_{sys} = 1,10 ; k_h = 1,00 ; k_{def} = 0,6 ; \psi_2 = 0,3$$

Question 11.1 – Déterminer le poids propre de la poutre 210' 300.

Question 11.2 – Lorsque les deux travées sont chargées simultanément par l'action variable (**Figure 16**), à l'aide des documents techniques **DT06** et **DT07**, **vérifier** que les contraintes normales de flexion dans la poutre 210' 300 sont acceptables vis-à-vis des exigences de l'Eurocode 5 à l'ELU sur l'appui intermédiaire (en B).

Question 11.3 – Dans le cas de la Figure 16, le calcul de la flèche de fluage à mi-portée de la travée n°1 ($L/2 = 2,075 \text{ m}$) a donné une valeur de $W_{1,creep} = - 3 \text{ mm}$.

À l'aide des documents techniques **DT06** et **DT07**, **déterminer** la flèche instantanée ($W_{1,inst}$) et en **déduire** la flèche finale ($W_{1,fin}$) à $L/2$. **Comparer** cette flèche à une valeur limite réglementaire.

Préciser les conséquences de ces déformations. À l'aide de croquis, **présenter** les solutions techniques envisageables à l'interface plancher/cloison (consulter le document **DT01.4**).

PARTIE N°3 : GÉOTECHNIQUE, PROCÉDÉS DE CONSTRUCTION

La thématique de cette partie porte sur les fondations de l'ouvrage en envisageant d'une part, le principe de leur dimensionnement, et d'autre part, leur réalisation. En effet, les mitoyennetés en périphérie de l'ouvrage exigent un principe constructif par fondations excentrées et nécessitent un mode de réalisation par passes alternées. Le questionnement est centré sur des compétences en géotechnique et sur des connaissances de procédés généraux de construction. Il s'agit notamment :

- d'être capable de produire une analyse critique d'un principe constructif ;
- d'être capable de pré-dimensionner une fondation excentrée ;
- d'être capable de produire une analyse critique d'un procédé courant de réalisation.

Le site de la construction (env. 172 m²) est enclavé par des existants (**Figure 2**) et présente des mitoyennetés partielles sur ses façades Nord, Sud avec des bâtiments de type R+6 et un accès sur une rue à sens unique fortement commerçante. Le rapport de sol préconise des fondations superficielles (filantes et/ou isolées) dans la couche de Marnes Infragypseuses avec un fond de fouille localisé à -3,20 m de profondeur par rapport au terrain actuel moyennant un encastrement minimal de 50 cm (**Figure 17**). Ce même rapport indique que le niveau d'assise des bâtiments adjacents n'est pas connu précisément et qu'il faudra prendre toutes les dispositions utiles sécuritaires nécessaires et notamment une réalisation par passes alternées et/ou des reprises en sous-oeuvre.

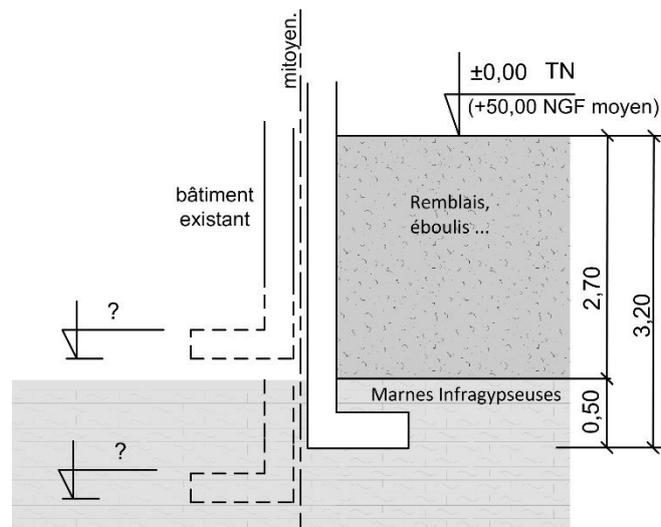


Figure 17 : Coupe sur mitoyenneté

Les fondations du mitoyen existant proches de la file C sont, a priori, situées à - 3,20 m/TN de profondeur alors que celles de l'existant proche de la file A sont présumées être à une profondeur de - 2,50m par rapport au TN.

Sous réserve d'une base minimale de fondation, les tassements attendus théoriques devraient rester inférieurs au centimètre. Les différents essais réalisés ont permis d'établir les valeurs fournies par le **Tableau 4**.

	Poids volumique [kN.m ⁻³]	Caractéristiques à long terme		Caractéristiques à court terme	
		C' [kPa]	φ' [°]	C _{uu} [kPa]	φ _{uu} [°]
Remblais, éboulis, ...	16	0	20	10	0
Marnes Infragypseuses	19	5	25	12	0

Tableau 4 : Caractéristiques des sols

La contrainte de calcul à prendre en compte au niveau - 3,20 m/TN pour la justification vis-à-vis de l'état limite ultime est limitée à $q_{ELU} \leq 0,50$ MPa.

Consulter les documents DT01.7 et DT01.8.

Question n°12 :

On s'intéresse au principe de fondation excentrée de la file C en périphérie de l'ouvrage. Le principe constructif (file C) adopté par le bureau d'étude est présenté par la **Figure 18** et la **Figure 19** et il est composé par les éléments {semelle + voile + plancher haut + buton}.

L'action concentrée résultante \vec{Nu} des actions transmises par la voile à la fondation, déterminée sur une longueur L est appliquée à $b/2$ du nu du voile. A titre de simplification, le poids propre du dallage et les charges d'exploitation sur le dallage ne seront pas pris en compte.

Question 12.1 – Présenter le schéma mécanique permettant de caractériser l'équilibre statique du système constructif (**Figure 18** et **Figure 19**) conduisant à une contrainte uniforme dans le sol ($\sigma_{sol} \leq q_{ELU}$) à l'interface sol/fondation.

Donner les expressions littérales des efforts en présence et notamment dans le « buton » et le plancher.

Question 12.2 – Préciser les conséquences du principe constructif sur le comportement mécanique du plancher et sur sa réalisation ?

Préciser quels sont les impacts sur le parti architectural ?

Question 12.3 – En adoptant les valeurs ci-dessous, **proposer** les dimensions (A' B' h) de la semelle excentrée.

$$\|\vec{Nu}\| = 1032 \text{ kN}$$

$$b = 25 \text{ cm} , H_T \gg 3,20 \text{ m}$$

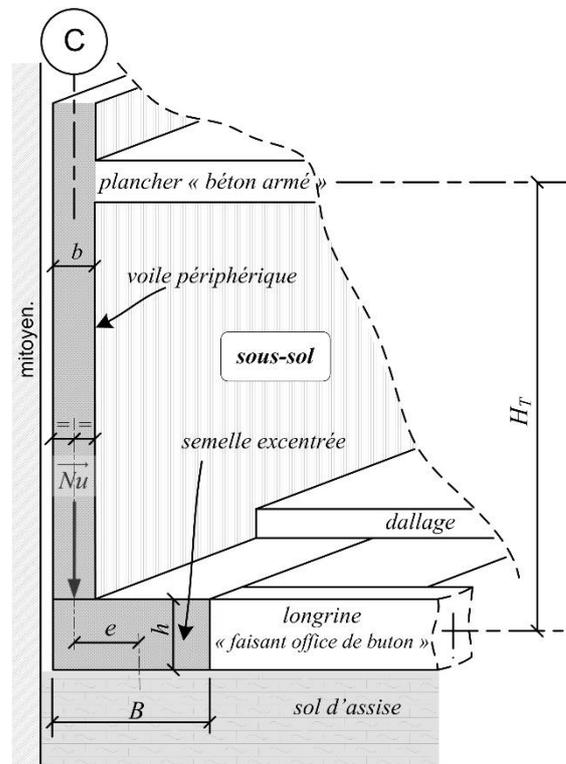


Figure 18 : Perspective du principe de fondation – file C

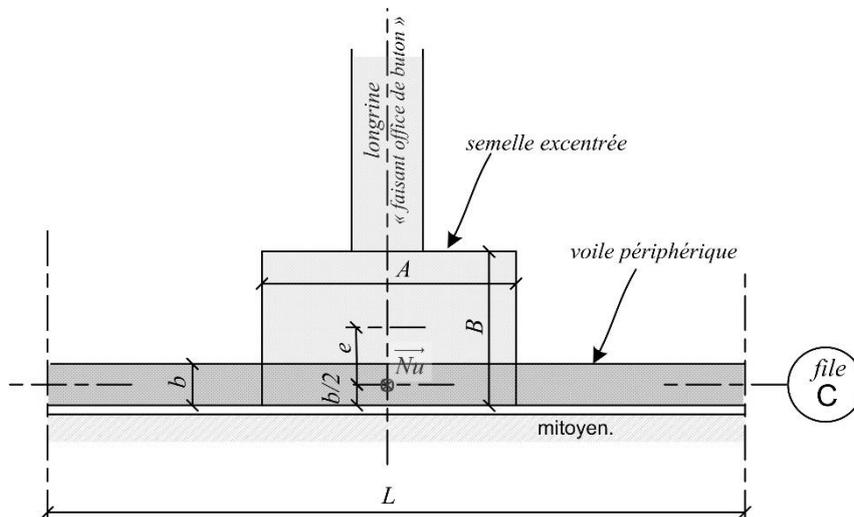


Figure 19 : Modèle partiel simplifié de fondation (vue en plan) – file C

Question n°13 :

Afin de répondre aux besoins et au parti architectural, la conception de cet immeuble en site urbain (**Figure 2**, **Figure 20** et **Figure 21**) ne peut être efficacement envisagée sans prendre en compte les contraintes liées au site de construction et les impacts des procédés de construction choisis sur l'organisation des travaux.

Question 13.1 – Compte tenu des caractéristiques des sols (**Tableau 4**) :

- **Déterminer** la hauteur critique h_0 d'ouverture de fouille (**Figure 20** et **Figure 21**) sur la file 1 en limite de propriété « côté rue » au sens de la théorie de Rankine illustrée par la **Figure 21**.
- **Préciser** les mesures à prendre afin d'excaver sur une profondeur moyenne de 3,50 m.

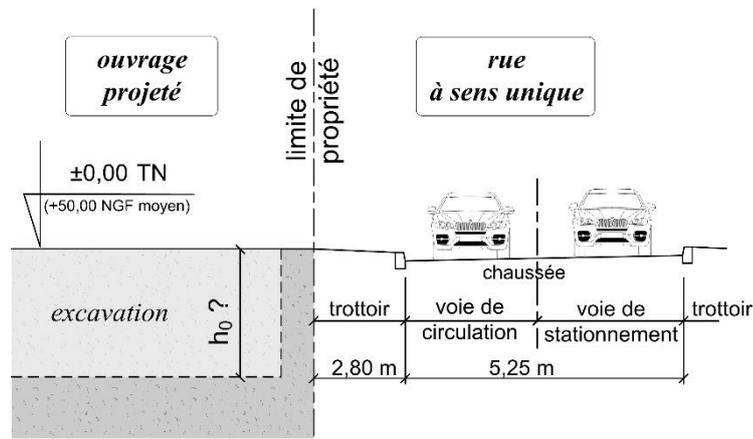
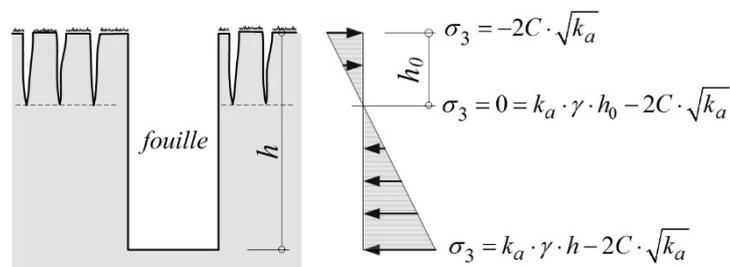


Figure 20 : Coupe sur « rue »



avec k_a : coefficient de poussée $k_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \tan^2 \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right]$

Figure 21 : Hauteur critique d'excavation selon Rankine

Question 13.2 – Les documents techniques **DT01.7** et **DT01.8** présentent respectivement le plan de la parcelle et le plan de principe de fondation de l'ouvrage.

Dans l'hypothèse où les fondations des bâtiments mitoyens sont à la même profondeur que celles de l'ouvrage projeté (exceptée file A, façade Nord), à l'aide de schémas et de croquis annotés, **présenter** les différentes phases nécessaires pour réaliser les fondations de l'ouvrage.

Question 13.3 – Les fondations de l'ouvrage mitoyen file A (façade Nord) sont à la côte - 2,50 m/TN et elles nécessitent une reprise en sous-œuvre (**DT01.7** et **DT01.8**).

À l'aide de schémas et de croquis annotés, **préciser** le principe de réalisation.

DOCUMENTS TECHNIQUES

DT 01 – Dossier de plans

DT 02 – Extrait « RICT »

DT 03 – Extrait « Norme Incendie Européenne »

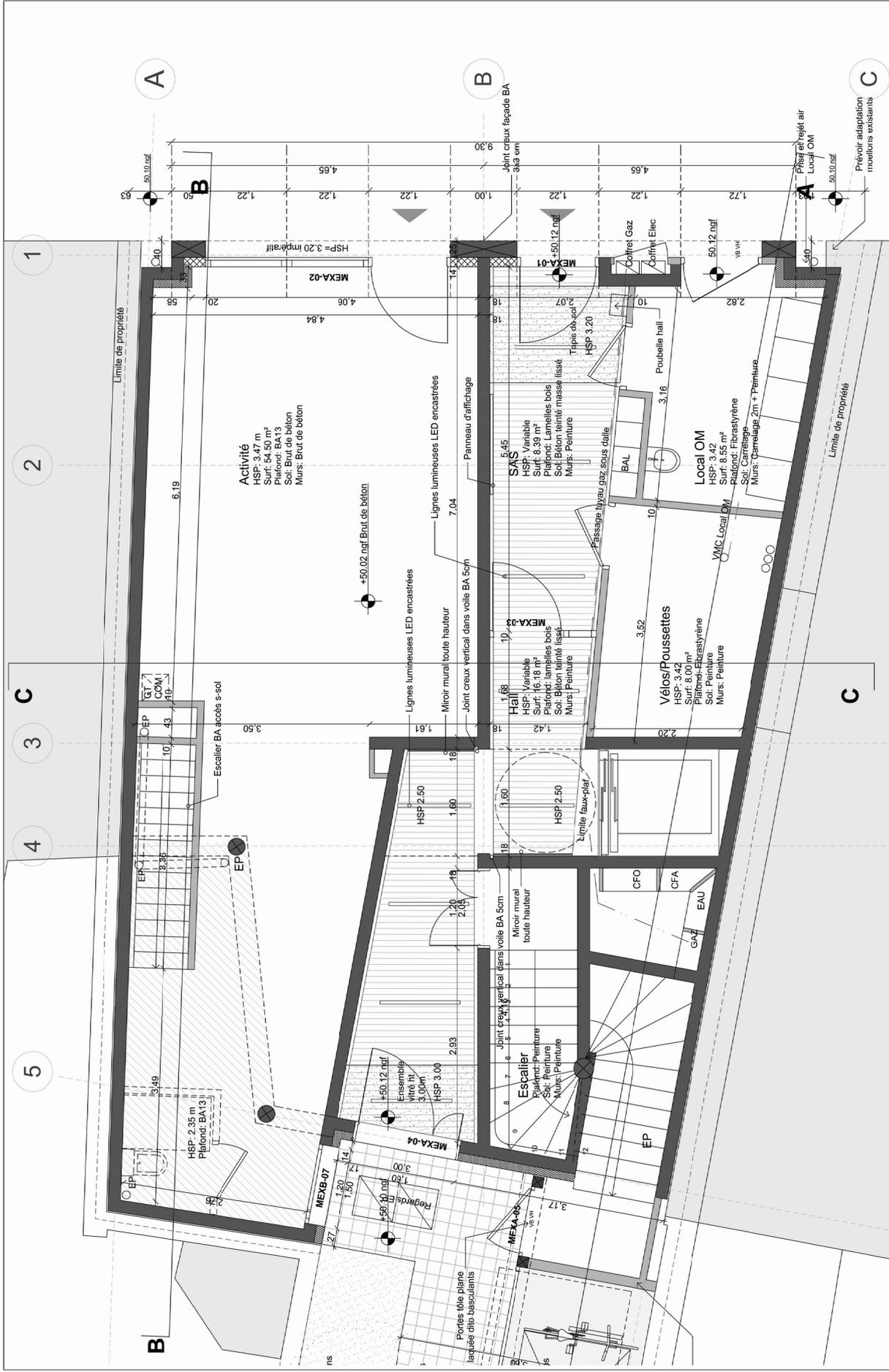
DT 04 – La thermique du feu

DT 05 – Résultats d'essais « CLT au FEU »

DT 06 – Extrait Eurocode 5

DT 07 – Formulaire « poutre »

**DOCUMENT TECHNIQUE – DT 01 –
DOSSIER DE PLANS**



Plan RdC (DCE)

DT 01.2

ZONE AVEC ISOLANT ACOUSTIQUE ET FAUX-PLAFOND

MUR PORTEUR BA

MUR PORTEUR BOIS-MOB

STRUCTURE BOIS (POTEAU/POUYRE)

CLOISON NON PORTEUSE SEPARATIVE ENTRE 2 LGTS - TYPE SAD

N



Plan R+3 (DCE)

DT 01.4

ZONE AVEC ISOLANT ACOUSTIQUE ET FAUX-PLAFOND

MUR PORTEUR BA

MUR PORTEUR OSSATURE BOIS-MOB

STRUCTURE BOIS (POTEAU/POUTRE)

CLOISON NON PORTEUSE SEPARATIVE ENTRE 2 LGTS - TYPE SAD

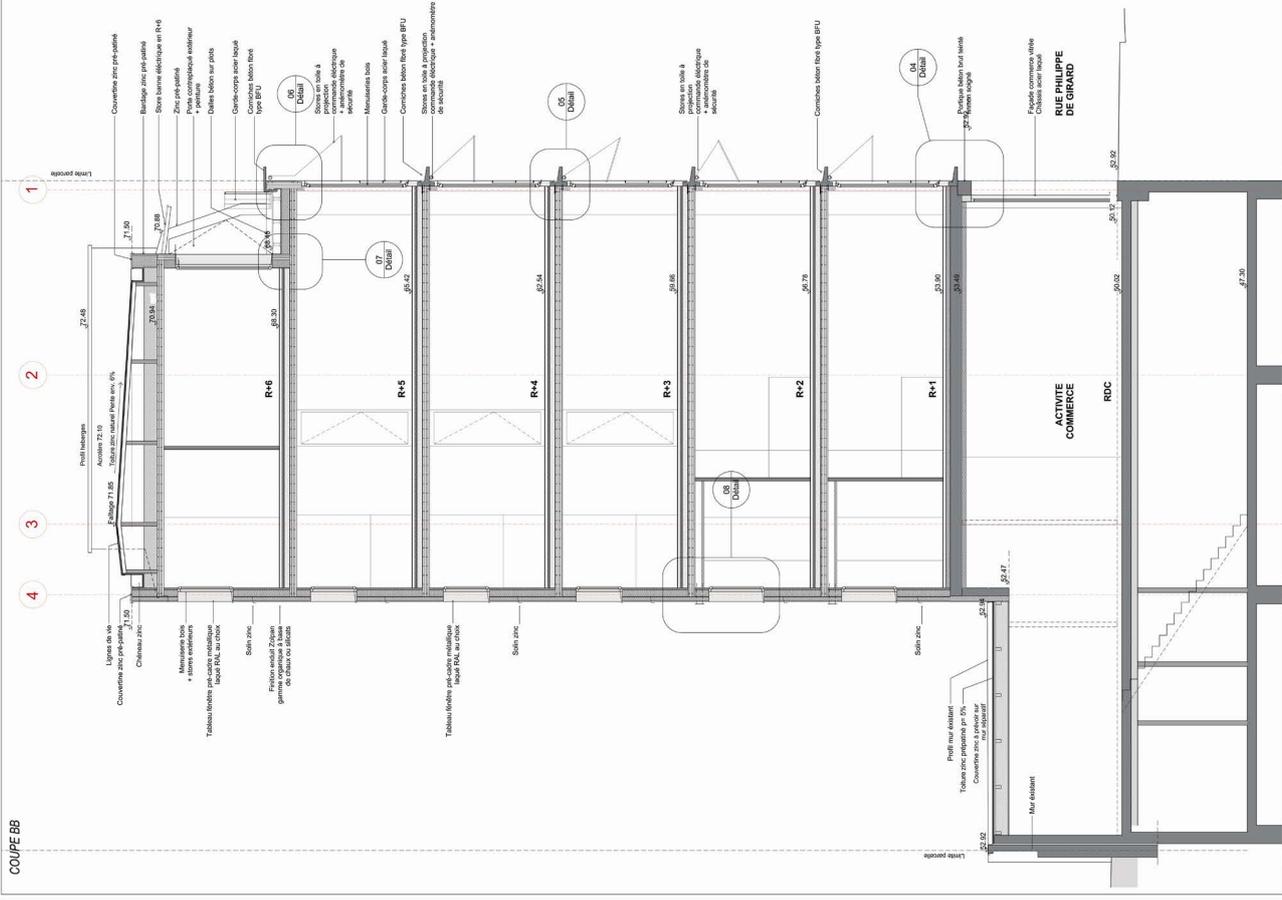
ENTRÉE D'AIR VMC DANS MASQUERIE

ENTRÉE D'AIR VMC DANS MASQUERIE

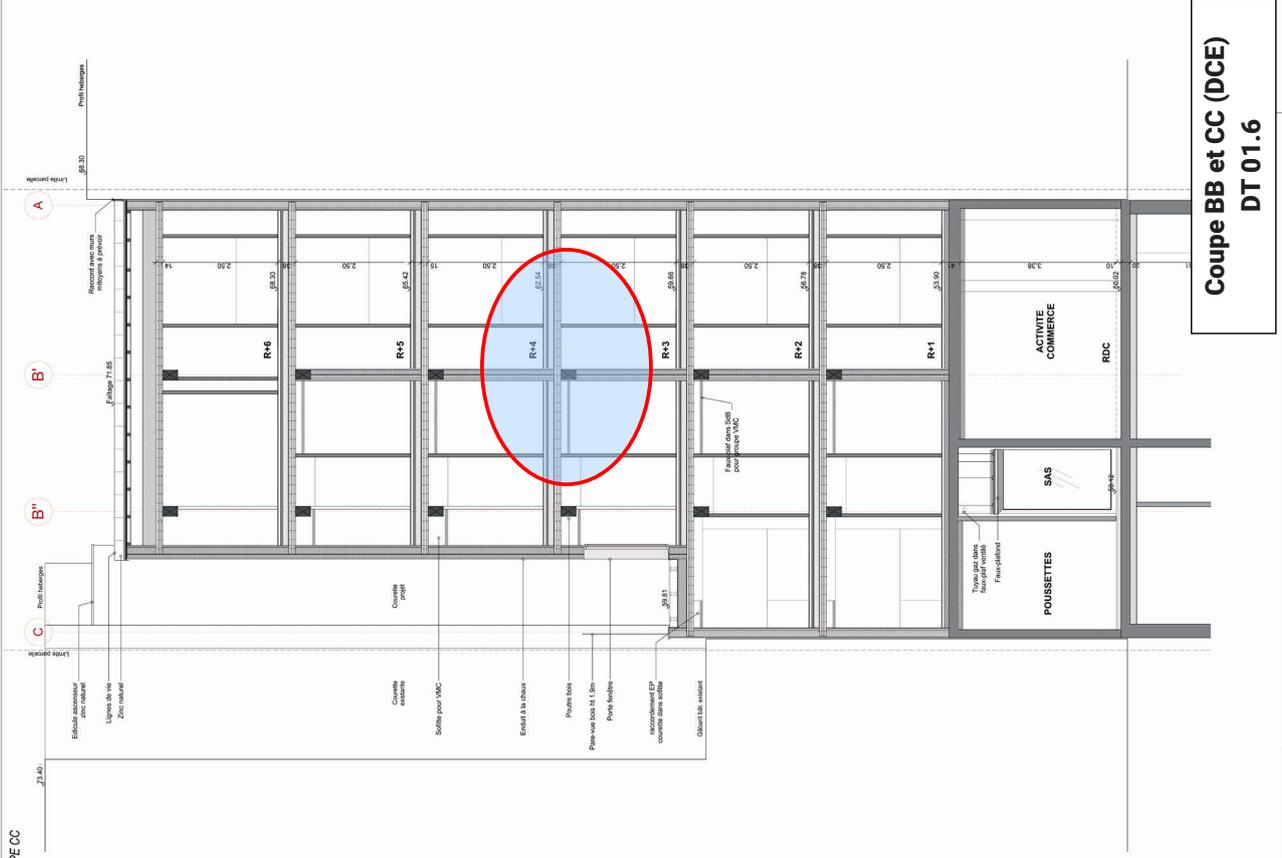


**Coupe AA (DCE)
DT 01.5**

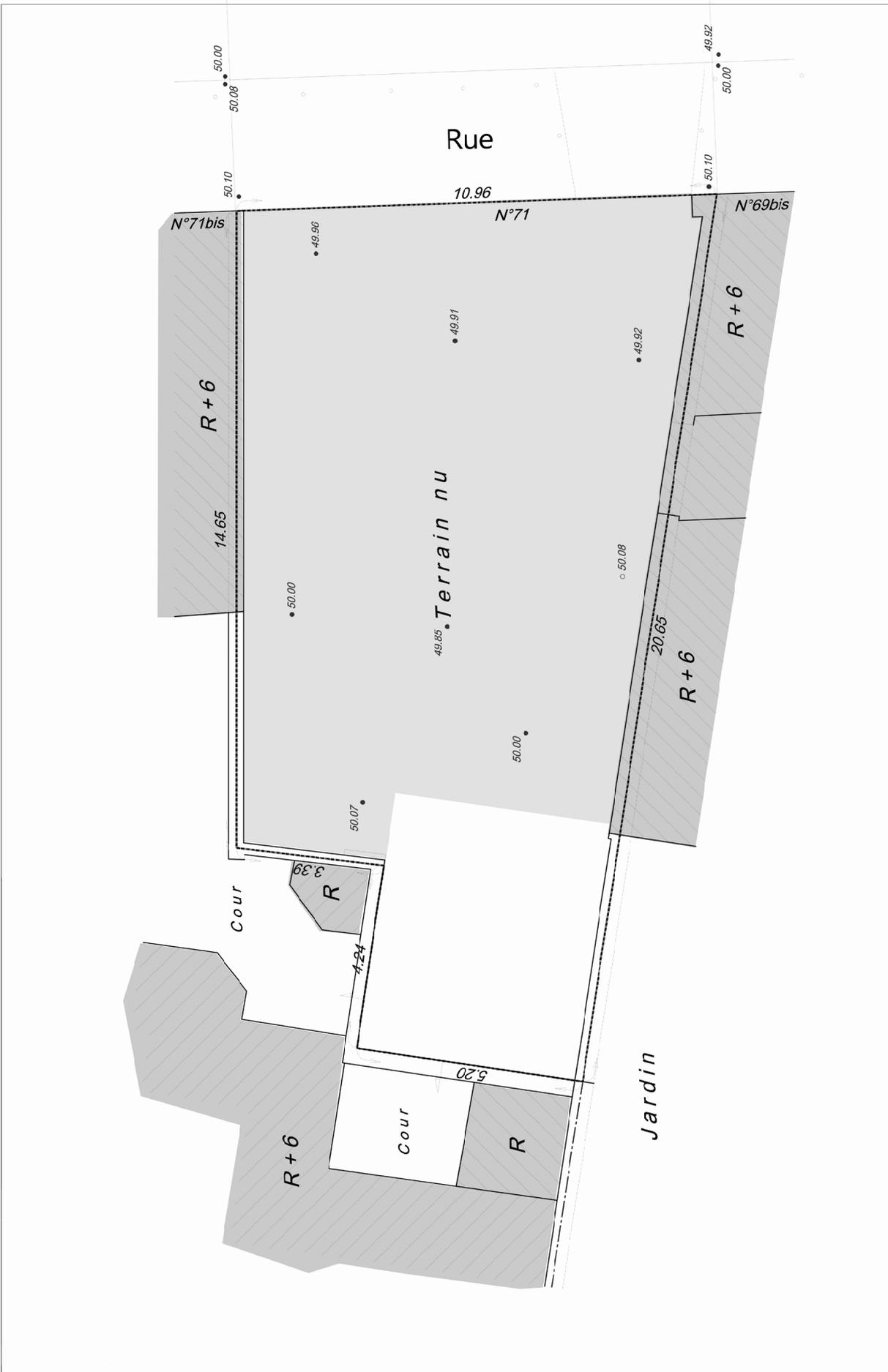
COUPE BB



COUPE CC

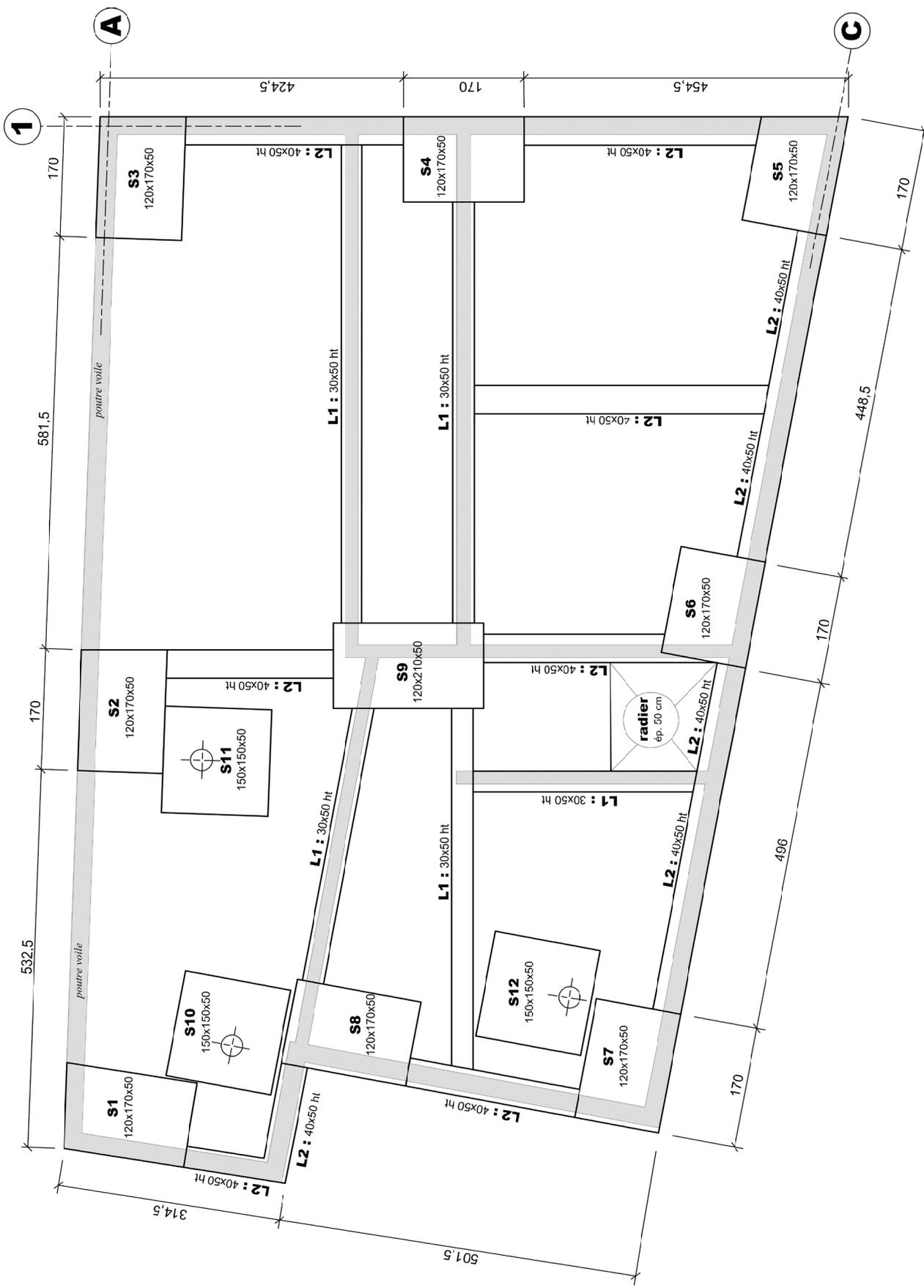


Coupe BB et CC (DCE)
DT 01.6



**Plan Parcelle (DCE)
DT 01.7**





principe Fondations (DCE)
DT 01.8

Nota : cotation en cm

DOCUMENT TECHNIQUE – DT 02 – EXTRAIT « RICT »

2 - CADRE DE LA MISSION DE CONTRÔLE TECHNIQUE

2.2. Description sommaire du programme des travaux et des objets contrôlés (3/4)

Sécurité INCENDIE

Les bâtiments d'habitation est de type R+6 et est accessible par une voie échelle (4m).

La distance entre les portes des logements et l'accès à la cage d'escalier est inférieure à 10m : l'établissement est donc classable en 3^{ème} famille A d'habitation collective.

Il est prévu une stabilité au feu 1h pour les éléments de structures principales et un degré CF1h pour les planchers bétons et bois des différents niveaux.

Isolant CF1h au droit des locaux activités / vélos / OM / local entretien. Les parois en mitoyennetés sont aveugles et CF2h.

Les façades sont en béton et prévues revêtues:

- d'un revêtement en laine de bois + enduit bénéficiant d'un essai LEPIR
- D'un bardage zinc
- La façade sur rue étant munies de grandes baies vitrées à ossatures bois séparés au droit des nez de plancher par des corniches béton

Les menuiseries extérieures sont prévues en bois hormis les portes prévues en aluminium.

Le désenfumage des cages d'escalier sera manuel avec asservissement à un DAD.

Les menuiseries des cages d'escalier sont sur le même plan que les menuiseries des logements adjacents et sont situés à plus de 2m de ceux-ci.

Aucun désenfumage des circulations n'est nécessaire.

Les parois entre circulations et logements et entre logements sont prévus CF 1/2h munis de portes PF1/4h.

Local commercial:

Ce local est classable en 5^{ème} catégorie et disposera de 1 dégagement d'1UP. L'effectif maximal étant fixé à 200 personnes.

Le local d'activité au RDC comporte une surface inférieure à 60m², l'aménagement sera réalisé ultérieurement dans le cadre d'un dossier d'aménagement.

L'effectif de ce local sera limité à 19 personnes.

Ce local sera pourvu d'une ventilation de confort qui lui est propre. Cependant le projet ne prévoit que la mise en place des gaines en attente.

Isolement CF1h vis-à-vis de l'établissement d'habitations et aucun réseau en commun

DOCUMENT TECHNIQUE – DT 03 – EXTRAIT « NORME INCENDIE EUROPÉENNE »

Les bâtiments d'habitation sont classés par famille, selon leur type (individuel ou collectif), leur hauteur et les facilités d'intervention des services de secours.

Familles d'habitation			Niveaux maximum	
1 ^{ère} famille	Individuelle	Habitations isolées ➤ en bande à structures non indépendantes ➤ en bande à structures indépendantes	< R + 1	
			R + 0	
			R + 1	
2 ^{ème} famille	Individuelle	Habitations isolées jumelées ➤ en bande à structures non indépendantes ➤ en bande à structures indépendantes	> R + 1	
			R + 1	
			> R + R	
3 ^{ème} famille	Collective	Habitations collectives	< R + 3 (III)	
			3 conditions : R + 7 maxi D < 7 M (I) accès escalier atteint par voie échelle	R + 7
		A	Hauteur < 28 m, une seule des conditions ci-dessus non satisfaisante Accès aux escaliers à moins de 50 mètres d'une voie ouverte à la circulation	H < 28 m (II)
				H > 28 m (II)
B	Habitations isolées ➤ en bande à structures non indépendantes ➤ en bande à structures indépendantes	H < 50 m		

LA RÉSISTANCE AU FEU

■ Classement REI

Le classement « R-E-I » en vigueur est européen et remplace progressivement le classement franco-français « SF-PF-CF ».

- Classement R pour résistance mécanique (anciennement SF, stabilité au feu) : durée pendant laquelle l'ouvrage reste stable et l'élément de construction conserve ses capacités de portance et d'auto-portance.
- Classement E pour étanche (anciennement PF, Pare-Flamme) : durée pendant laquelle l'élément de construction reste étanche aux flammes et aux gaz inflammables, afin d'éviter la propagation des gaz de combustion et des fumées du côté non sinistré.
- Classement I pour isolation (anciennement CF, Coupe-Feu) : durée pendant laquelle l'élément de construction permet de limiter à 140°C (en moyenne) et 180°C (au maximum), l'élévation de température de la surface non exposée au feu, afin d'éviter la propagation de la chaleur du côté non sinistré.

Les durées de performance exigées vont de 15 à 360 minutes selon la nature et l'emplacement du composant de construction et le type de bâtiment.

Classement européen	Correspondance avec les exigences françaises
Exprimé en minutes	Exprimé en heures ou fraction d'heures
R = capacité portante	SF = stable au feu
E = étanchéité au feu	PF = pare-flammes
RE = étanche au feu + résistance mécanique	PF + SF = pare-flammes + stable au feu
EI	CF = coupe feu
REI	CF + SF = coupe feu + stable au feu

DOCUMENT TECHNIQUE – DT 04 –

« LA THERMIQUE DU FEU »

DÉROULEMENT D'UN INCENDIE

Le triangle du feu

Pour qu'un incendie puisse prendre naissance, il faut la présence conjuguée de l'oxygène (21 % en volume d'air), de matériaux combustibles et une source de chaleur. Ils constituent à eux trois ce qu'il est convenu d'appeler le triangle du feu, représenté à la figure ci-contre. Les deux premiers éléments entrent en combustion lorsque la température d'inflammation est atteinte. La combustion produit du gaz carbonique CO_2 et si l'oxygène vient à manquer, elle produit le gaz CO qui est très dangereux pour l'être humain.



Le développement d'un incendie

Un incendie dans un local comporte une phase de développement où la température s'élève puis, une phase de décroissance où cette température diminue (**Figure 1**). Une source comme une flamme provoque le début d'incendie d'une quantité de matériaux. Les premiers gaz et la fumée apparaissent. En milieu fermé, sous l'action de la chaleur croissante, la fumée s'élève en panache jusqu'à heurter le plafond. A ce moment, elle s'étale radialement le long du plafond jusqu'à heurter une paroi et continuer son chemin vers le bas où elle stagne dans une couche supérieure sous le plafond.

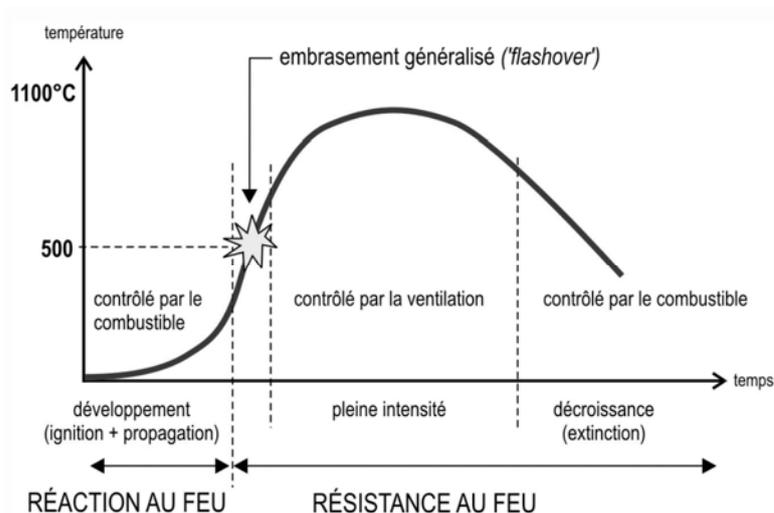


Figure 1 : Phases de développement d'un incendie dans un local

D'une façon générale, le local contient une couche inférieure froide se composant de l'air ambiant, de gaz et une couche supérieure chaude. Une température de l'ordre de 200 °C provoque l'éclatement des vitres des fenêtres, créant un apport soudain d'oxygène frais qui redonne de la vigueur à l'incendie. La couche supérieure se rapproche du plancher, car elle croît en volume de par son alimentation en panaches de fumées.

Au cours du développement de l'incendie, il peut exister, un moment où la température du mélange gazeux de la couche supérieure est tellement élevée qu'elle provoque l'ignition de tout élément combustible dans le compartiment : c'est le phénomène de flash-over ou d'embrasement généralisé. Dans les cas courants, il se produit pour une température de l'ordre de 500 à 600 °C. La montée très rapide des températures dans un local et l'accroissement du dégagement de chaleur provoquent un brassage des fumées où les couches se mélangent. L'incendie est alors dit « complètement développé ». Ces différentes phases de développement d'un incendie sont schématisées dans le graphique ci-dessus (**Figure 1**), montrant l'évolution de la température dans un local en fonction du temps. Le feu sera contrôlé par le combustible s'il y a suffisamment d'oxygène disponible pour la combustion. Il sera contrôlé par la ventilation s'il n'y a pas suffisamment d'oxygène.

Courbes de feu

Les conditions réelles du développement d'un incendie étant très difficiles à reproduire, des courbes nominales standardisées d'incendie ont été développées pour tester expérimentalement les éléments de construction en vue d'en établir un classement relatif tant pour leur résistance que pour leur réaction au feu. En effet, les courbes réelles de feu (**Figure 1**) peuvent être assez largement différentes d'une courbe standardisée (**Figure 2**) selon la charge de combustible en présence.

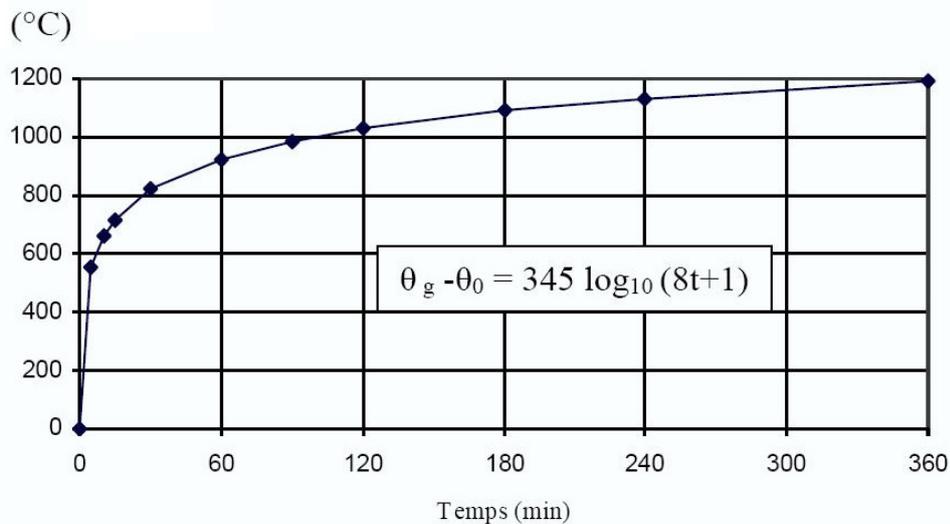
La courbe de modélisation d'un incendie dans un bâtiment présentée par la **Figure 2** constitue une référence conventionnelle. L'élévation de température en fonction du temps correspond à la courbe ISO 834 définie par

$$\theta_g - \theta_0 = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

t = temps en minutes

θ_g = température normalisée en °C

θ_0 = température initiale en °C



t min	$\theta_g - \theta_0$ °C
5	556
10	659
15	718
30	821
60	925
90	986
120	1029
180	1090
240	1133
300	1166
360	1193

Figure 2 : Courbe d'incendie standard ISO 834

Par l'observation de cette courbe ISO, on remarque qu'après ¼ h, la température ambiante atteint environ 745°C et continue à augmenter d'environ 100°C chaque fois que l'on double le temps. On retrouve clairement les deux phases qui se produisent lors d'un incendie réel : la période d'embrassement généralisé, durant laquelle se produit une augmentation très rapide de la température, les éléments y subissent un choc thermique (la température y augmente jusqu'à 800°C en moins de 30 minutes), suivie de la période où l'incendie est entièrement développé durant laquelle l'augmentation de température est beaucoup moins rapide (la température y augmente jusqu'à 1200°C en 360 minutes).

MÉCANISMES DE TRANSFERT DE LA CHALEUR

Lors d'un incendie, il y a trois mécanismes de base de transfert de la chaleur :

- la convection ;
- le rayonnement ;
- la conduction.

Les trois mécanismes interfèrent durant un incendie. Il y a prédominance plus ou moins prononcée de l'un ou de l'autre suivant le moment et les endroits. De plus, les caractéristiques physiques des matériaux évoluent au cours des différentes phases de développement d'un incendie.

Nota : La conversion de degré Celsius en degré Kelvin est : $^{\circ}K = ^{\circ}C + 273,15$

Convection

La **convection** est le mode de transfert de la chaleur vers un solide à partir des mouvements du gaz qui l'entoure. Au début d'un incendie, elle est prédominante entre le milieu environnant et l'élément de construction. Le flux de chaleur φ_c échangé entre le gaz à une température θ_g et $1 m^2$ de paroi à une température T_p vaut :

$$\varphi_c = \alpha_c \cdot (\theta_g - T_p)$$

α_c = coefficient d'échange par convection (en $W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}K^{-1}$)

θ_g et T_p = températures exprimées en Kelvin

Rayonnement

Le **rayonnement** est un transfert d'énergie par ondes électromagnétiques et ne requiert la présence d'aucun milieu entre la source de chaleur et le receveur. Ce mécanisme est prédominant lors de l'extension d'un incendie et lorsque le feu est en pleine intensité. Le flux de chaleur φ_r échangé entre l'environnement à une température θ_g et $1 m^2$ de

paroi à une température T_p vaut :

$$\varphi_r = S_{\phi} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\theta_g^4 - T_p^4)$$

S_{ϕ} = aire corrigée de la paroi selon sa forme et sa position

ε = émissivité relative globale entre l'environnement et la paroi

σ = constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}K^{-4}$$

θ_g et T_p = températures exprimées en Kelvin

Conduction

La **conduction** est le mode de transfert dans les solides. La conductivité λ caractérise l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Dans le cas d'un écoulement thermique unidimensionnel, le flux de chaleur φ_{λ} qui traverse une

surface de $1 m^2$ perpendiculaire à la direction de l'écoulement vaut :

$$\varphi_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

λ = conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}K^{-1}$)

$\partial T / \partial x$ = gradient thermique à l'intérieur de la paroi selon la direction x

Le champ de température dans un solide qui subit un transfert thermique par conduction unidimensionnelle a pour

expression :
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} = \text{diffusivité (m}^2/\text{s)}$$

c_p = chaleur massique du matériau ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}K^{-1}$)

ρ = masse volumique du matériau (en $kg \cdot m^{-3}$)

Nota : La **diffusivité** thermique (a) caractérise l'aptitude des corps solides à laisser passer la chaleur par conduction ou de manière équivalente, à diffuser la température à l'intérieur de leur substance.

Dégradation du bois sous l'influence de la chaleur, la pyrolyse

Lorsqu'il est exposé au feu, le bois se dégrade sous l'effet d'une décomposition chimique qui transforme ses constituants en gaz volatils laissant des résidus de carbonisation. Une combustion spontanée en surface du bois peut survenir pour des températures de 300°C à 500 °C mais aussi lors d'une exposition prolongée à une température approximant les 150°C. D'autre part l'importance de la dégradation thermique dépend de la température et de la durée d'exposition.

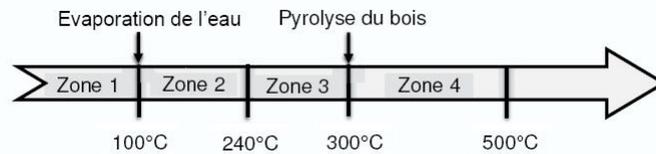


Figure 3 : Zones de dégradation en fonction de la température

Pour des températures inférieures à 100°C (zone 1), l'effet instantané de la chaleur sur les caractéristiques du bois est réversible. De plus l'exposition prolongée à des températures supérieures à 65°C fait apparaître des altérations rémanentes des caractéristiques mécaniques. Le bois subit une perte rapide de son eau libre puis de son eau liée lorsque la température de celui-ci atteint 100°C. La température augmente peu tant que l'eau ne s'est pas totalement évaporée. Une rapide augmentation de la température engendre une perte lente de poids solide jusqu'à 240 °C par le phénomène de pyrolyse (zone 2). À partir de températures avoisinant les 300°C (zone 3) la pyrolyse du bois dégage des gaz inflammables. A cette température, le bois est considéré comme étant carbonisé. Les couches de carbonisation se superposent donc par conduction de la température dans le bois. La combustion du bois libre, entre 150°C et 200°C des gaz composés de dioxyde de carbone incombustible et de monoxyde de carbone combustible. Au-dessus de 200°C, la teneur en CO augmente. La combustion des gaz accroît l'augmentation de température. Dès lors que la température atteint 500°C, la production de charbon augmente au détriment de celle des gaz (zone 4). Par conséquent lors d'une exposition à une chaleur intense prolongée, le bois se dégrade en charbon de bois, en gaz non inflammables (vapeur d'eau et CO₂) puis en gaz combustibles (CO, H₂ et hydrocarbures). La **Figure 4** présente la coupe d'une section de bois ayant subi une exposition au feu. Différentes parties sont identifiées : une couche carbonisée, une couche de bois pyrolysé (environ 5 mm) et le coeur de la section intact.

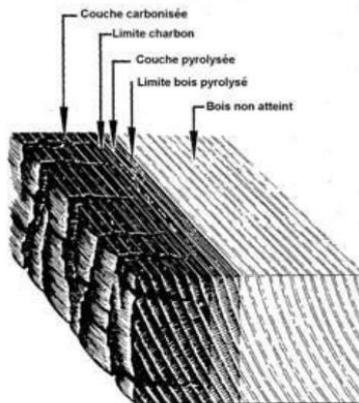


Figure 4 : Zones de dégradation dans une coupe de bois pour des températures élevées

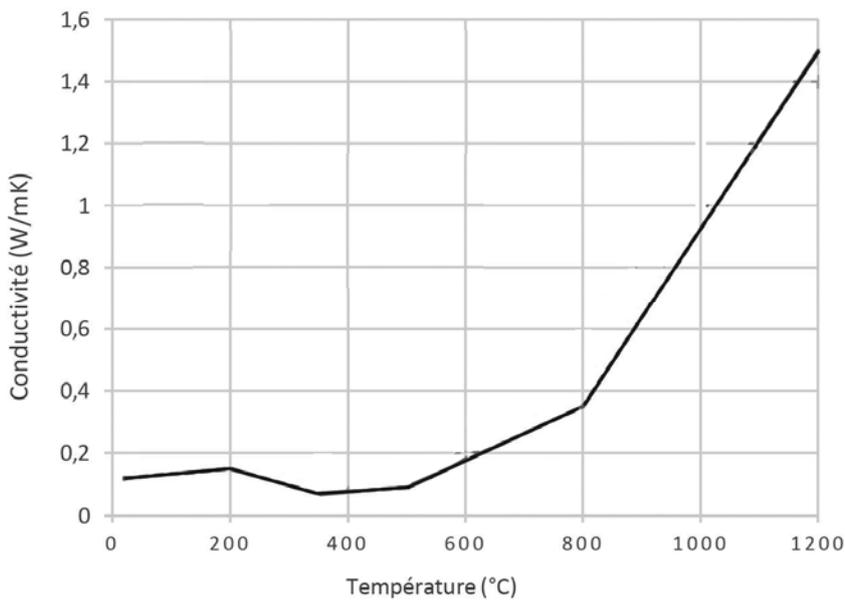
La température au sein du coeur de la section reste très basse par rapport à celle de la surface. Ce phénomène est lié non seulement à la faible conductivité de la couche de charbon (plus faible que celle du bois) mais aussi à la présence du front de vapeur à la limite de la couche pyrolysée annihilant l'augmentation trop importante dans le bois non atteint.

La carbonisation du bois diminue de façon considérable ses performances mécaniques tandis que le bois sous cette couche de charbon conserve ses propriétés d'origine. Il est donc essentiel de connaître la vitesse de propagation de la couche carbonisée au travers d'une section de bois afin d'en estimer une durée de stabilité au feu.

Évolutions de propriétés thermiques du CLT et du plâtre selon la température

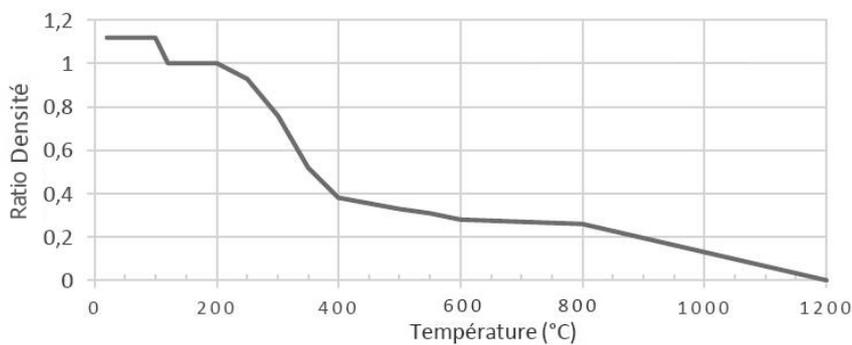
Lors d'un échauffement, les propriétés physiques des matériaux CLT et plâtre évoluent en fonction de la température. Les courbes ci-dessous définissent les évolutions conventionnelles de trois propriétés en fonction de la température :

- λ : conductivité thermique
- ρ : densité ou masse volumique du matériau
- c_p : chaleur spécifique du matériau



température [°C]	λ [W.m ⁻¹ .°K ⁻¹]
inf. 50°C	0,130
50	0,130
95	0,136
200	0,150
240	0,129
350	0,070
500	0,090
695	0,259
800	0,350
1200	1,500

Figure 5 : Évolution de la conductivité du CLT (humidité initiale à 12%) en fonction de la température



température [°C]	Ratio de densité
inf. 50°C	1,00
50	1,00
95	1,00
200	1,00
240	0,92
350	0,50
500	0,33
695	0,27
800	0,26
1200	0

Figure 6 : Évolution du ratio de densité du CLT en fonction de la température

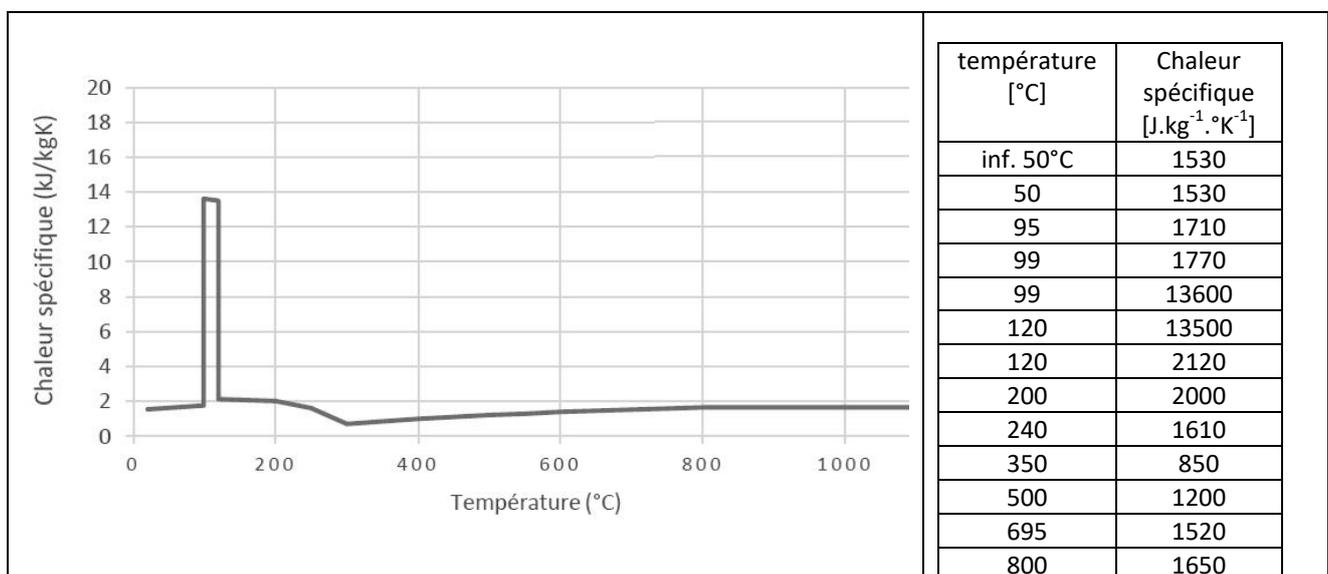
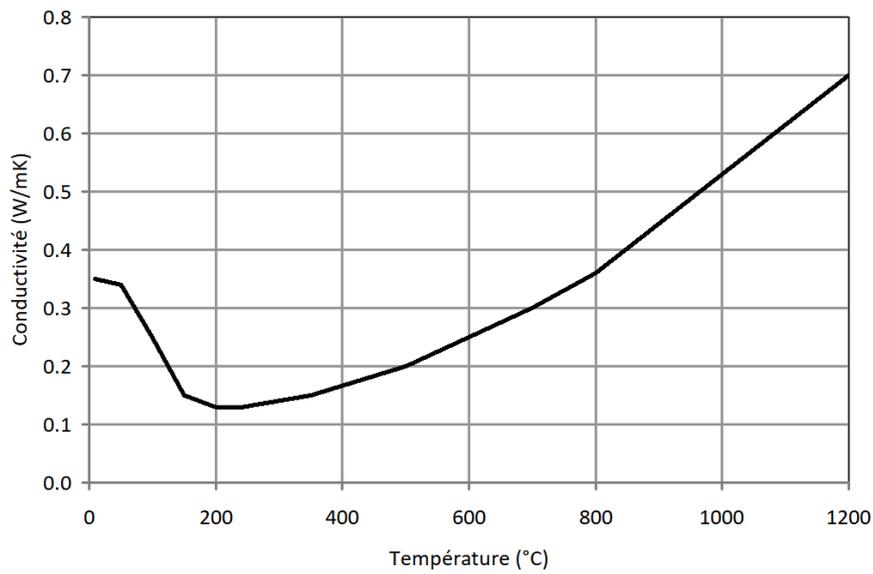
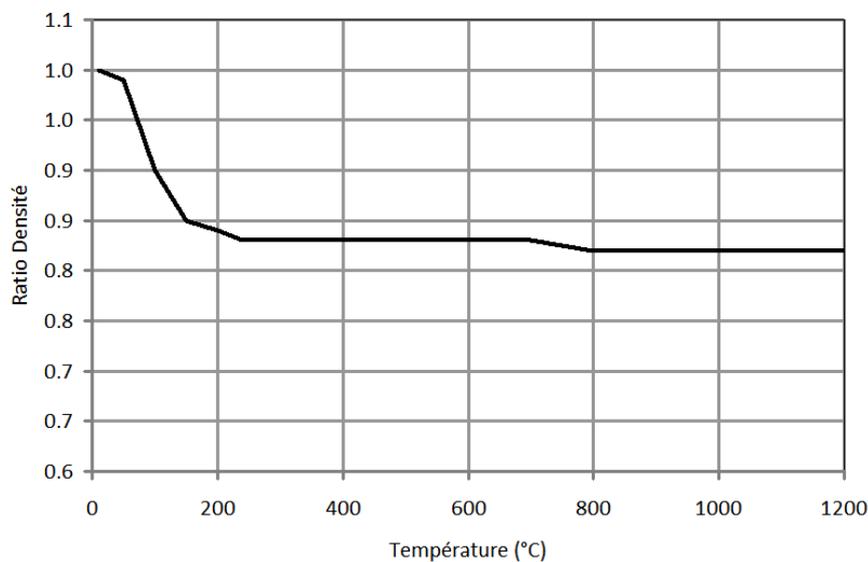


Figure 7 : Évolution de la chaleur spécifique du CLT en fonction de la température



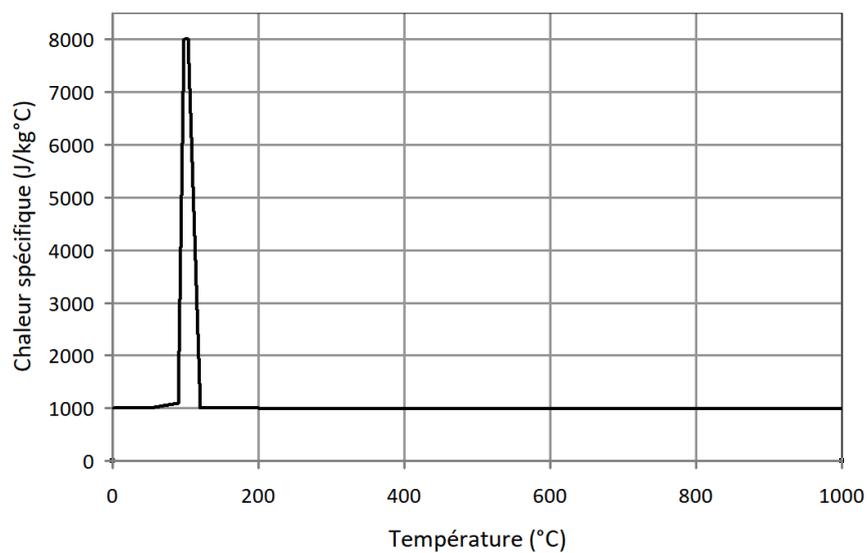
température [°C]	λ [W.m ⁻¹ .°K ⁻¹]
inf. 50°C	0,35
50	0,34
100	0,25
150	0,15
200	0,13
240	0,13
350	0,15
500	0,20
700	0,30
800	0,36
1200	0,70

Figure 8 : Évolution de la conductivité du plâtre en fonction de la température



température [°C]	Ratio de densité
inf. 50°C	1,00
50	0,99
100	0,90
150	0,85
200	0,84
240	0,83
350	0,83
500	0,83
700	0,83
800	0,82
1200	0,82

Figure 9 : Évolution du ratio de densité du plâtre en fonction de la température



température [°C]	Chaleur spécifique [J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]
inf. 50°C	1000
50	1000
100	8000
150	1000
200	1000
240	995
350	995
500	995
700	995
1000	995

Figure 10 : Évolution de la chaleur spécifique du plâtre en fonction de la température

DOCUMENT TECHNIQUE – DT 05 –

RÉSULTATS D'ESSAIS « CLT AU FEU »

Le principe des essais consiste à placer un panneau de plancher dans un four dont la température est contrôlée (**Figure 1**). Les panneaux CLT sont équipés de thermocouples (de TC01 à TC06) permettant de mesurer la température en différents points d'une section.



Figure 1 : Panneau CLT en feu à la fin de l'essai

La **Figure 2** présente l'évolution de la température dans le four.

La **Figure 3** présente l'évolution des températures mesurées par les thermocouples (TC01 à TC06) lors d'un essai et leurs localisations dans l'épaisseur du panneau CLT.

Nota : le document **DR01** présente les évolutions des températures et des conductivités à t=1 h dans l'épaisseur du panneau CLT.

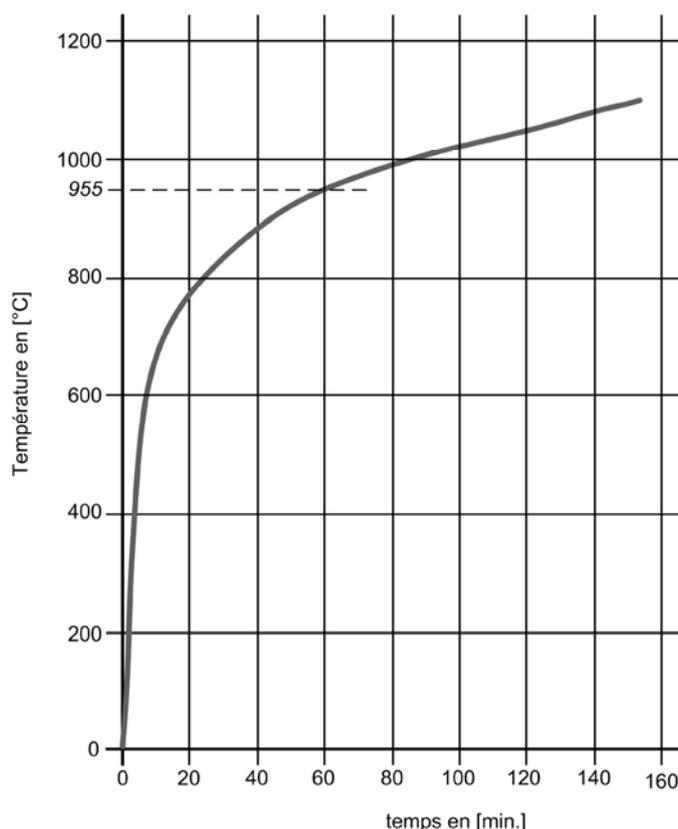


Figure 2 : Évolution de la température dans le four d'essais

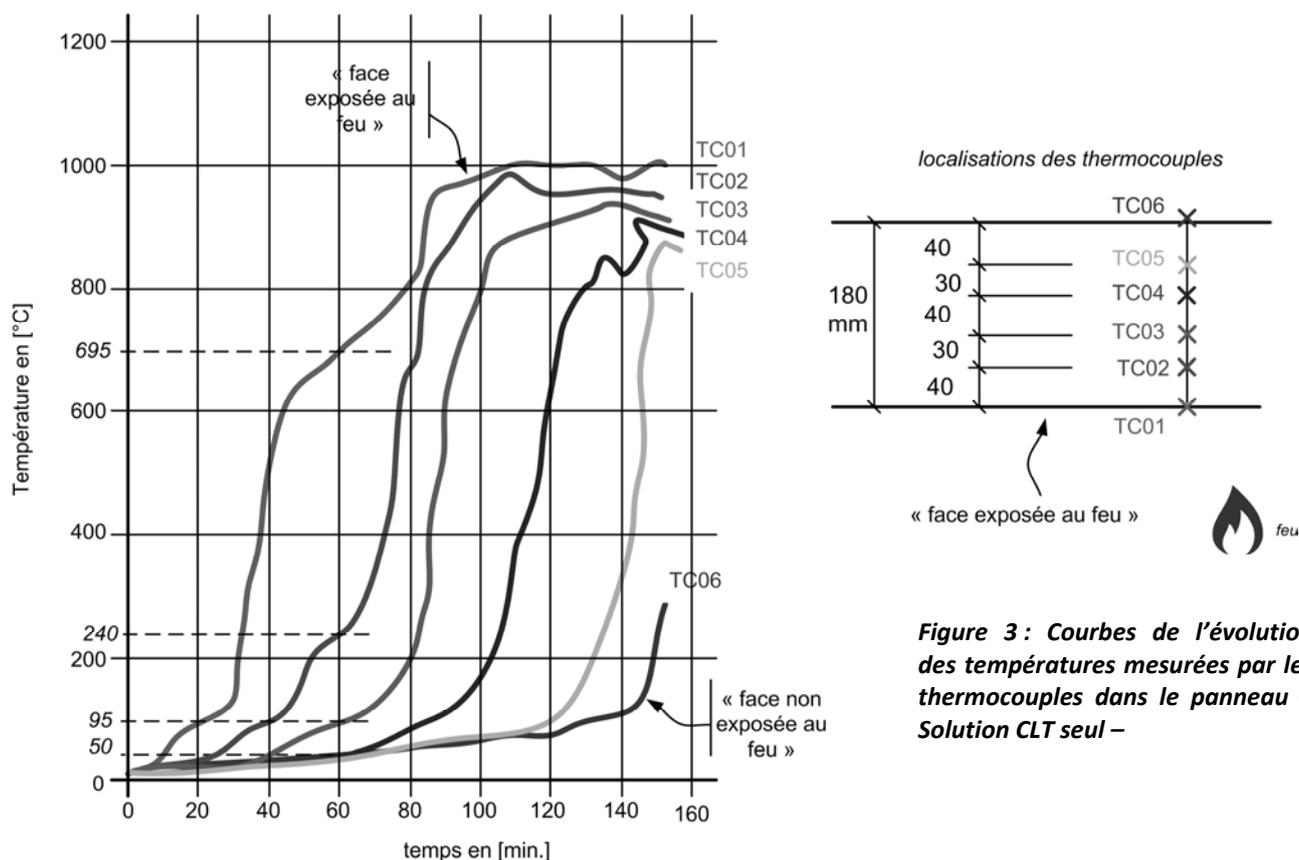


Figure 3 : Courbes de l'évolution des températures mesurées par les thermocouples dans le panneau – Solution CLT seul –

DOCUMENT TECHNIQUE – DT 06 –
EXTRAIT EUROCODE 5

CARACTÉRISTIQUES DES BOIS LAMÉLLÉS-COLLÉS SELON EUROCODE 5

Symbole	Désignation	Unité	Lamellés-collés homogènes				Lamellés-collés panachés			
			GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
$f_{m,g,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	24	28	32	36	24	28	32	36
$f_{t,0,g,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	16,5	19,5	22,5	26,0	14,0	16,5	19,5	22,5
$f_{t,90,g,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0,40	0,45	0,50	0,60	0,35	0,40	0,45	0,50
$f_{c,0,g,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
$f_{c,90,g,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,0	3,3
$f_{v,g,k}$	Contrainte de cisaillement	N/mm ²	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
$E_{0,g,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
$E_{0,g,05}$	Module axial au 5 ^e pourcentile	kN/mm ²	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
$E_{90,g,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
$G_{g,mean}$	Module de cisaillement	kN/mm ²	0,75	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
$\rho_{g,k}$	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	380	410	430	450	350	380	410	430

VÉRIFICATIONS DES DÉFORMATIONS SELON EUROCODE 5

L'Eurocode 5 distingue la flèche instantanée (W_{inst}), la flèche de fluage (W_{creep}), la contre-flèche (W_c), la flèche résultante finale ($W_{net,fin}$) et la flèche finale (W_{fin}). Les vérifications des déformations se font à l'ELS (**Figure 1**).

- La flèche instantanée (W_{inst}) est provoquée par l'ensemble des charges au moment de leur application. Elle est calculée sans tenir compte de l'influence de la durée de la charge et de l'humidité du bois.
- La flèche de fluage (W_{creep}) correspond à l'amplification de la flèche due aux charges de longue durée. Le calcul des charges est réalisé à partir des combinaisons d'actions quasi permanentes (ELS). Un coefficient multiplicatif k_{def} (**Tableau 1**) permet de tenir compte du fluage du bois en service et un coefficient statistique ψ_2 (**Tableau 2**) est appliqué.

|| exemple : Une solive d'une habitation résidentielle est située dans un local chauffé et elle supporte une charge permanente $G = 0,40 \text{ kN/m}$ ainsi qu'une charge d'exploitation $Q = 0,75 \text{ kN/m}$.

Le coefficient k_{def} est déterminé à l'aide du **Tableau 1** : $k_{def} = 0,6$

Le calcul de la flèche différée est réalisé avec : $q_{diff} = k_{def} \cdot (G + \psi_2 \cdot Q)$:

Le coefficient est déterminé à l'aide du **Tableau 2**, soit : $\psi_2 = 0,3$

La valeur de l'action à prendre en compte est :

$$q_{diff} = 0,6 \times (0,40 + 0,30 \times 0,75) = 0,375 \text{ kN/m}$$

- La flèche finale (W_{fin}) est la somme de flèche instantanée (W_{inst}) et la flèche de fluage (W_{creep}) :

$$W_{fin} = W_{inst} + W_{creep}$$

- La contre-flèche (W_c) peut être réalisée à l'atelier lors de la fabrication des poutres. Elle permet d'augmenter sensiblement la valeur absolue de la déformation de la poutre tout en restant dans les limites réglementaires.
- La flèche résultante finale ($W_{net,fin}$) est la flèche apparente totale mesurée sous la ligne des appuis. Elle est déterminée par la formule :

$$W_{net,fin} = W_{int} + W_{creep} - W_c$$

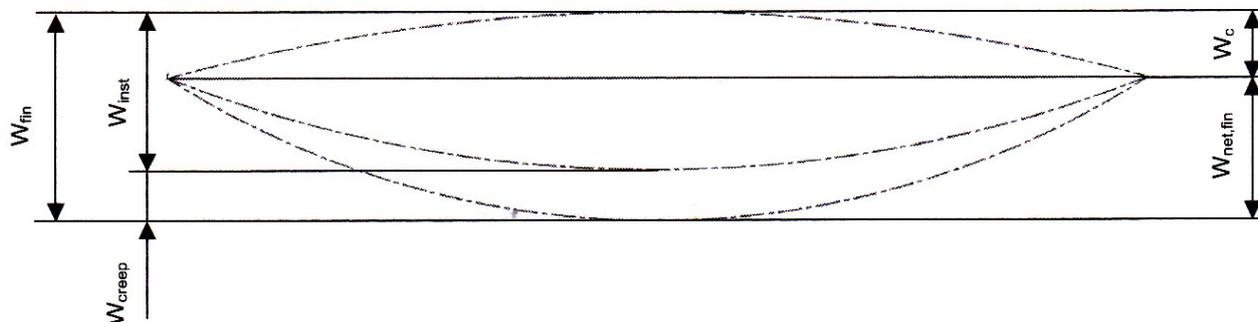


Figure 1 : Flèche finale résultante ($W_{net,fin}$)

Matériau	Classe de service		
	1 <i>W</i> _{bois} < 13% (local chauffé)	2 13% < <i>W</i> _{bois} < 20% (sous abris)	3 <i>W</i> _{bois} > 20% (extérieur)
Bois massif	0,60	0,80	2,00
Bois Lamellé-Collé	0,60	0,80	2,00
Contreplaqué	0,80	1,00	2,50

Tableau 1 : Valeurs de k_{def} selon EC5

Action Variable	Ψ_0 action variable d'accompagnement	Ψ_1 combinaison accidentelle (incendie)	Ψ_2 fluage et combinaison accidentelle
Charges d'exploitation des bâtiments			
Catégorie A : habitations résidentielles	0,7	0,5	0,3
Catégorie B : bureaux	0,7	0,5	0,3
Catégorie C : lieux de réunion	0,7	0,7	0,6
Catégorie D : commerce	0,7	0,7	0,6
Catégorie E : stockage	1	0,9	0,8
Catégorie H : toits	0	0	0
Charges de neige			
Altitude > 1 000 m	0,7	0,5	0,2
Altitude ≤ 1 000 m	0,5	0,3	0
Action du vent			
	0,6	0,2	0

Tableau 2 : Valeurs des coefficients statistiques ψ_i

- Les valeurs limites des flèches sont fixées en accord avec le maître d'ouvrage dans le CCTP. A titre indicatif, le **Tableau 3** indique quelques valeurs recommandées de limitation des flèches.

	W_{inst} sous charge variable (Q)	$W_{net,fin}$	W_{fin}
élément de structure	$\ell / 300$	$\ell / 200$	$\ell / 125$

Tableau 3 : Valeurs limites des flèches pour la déformation des éléments structuraux en bois

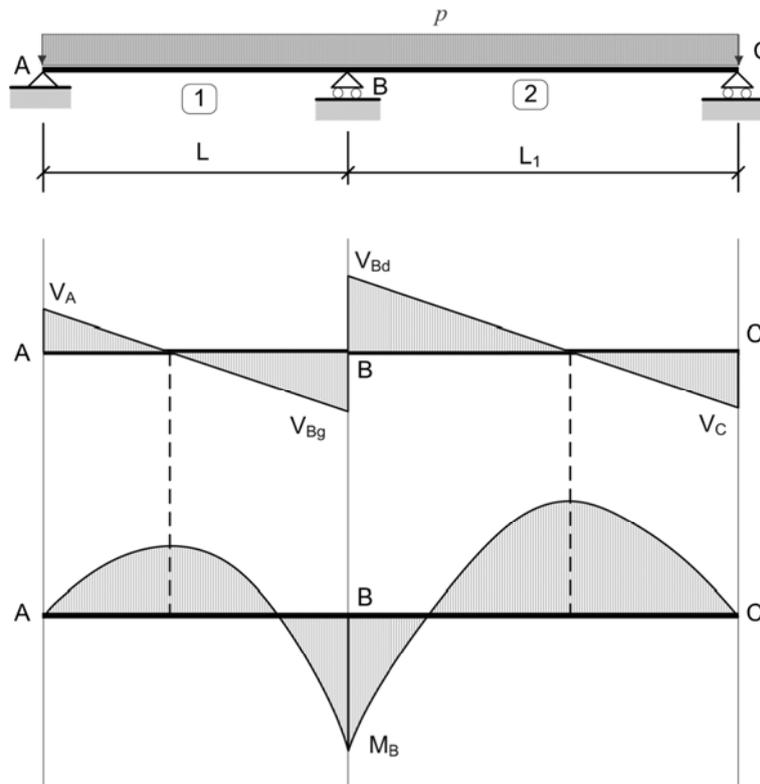
Nota : Pour les consoles et les porte-à-faux, la valeur limite indiquée dans le tableau est doublée.

|| exemple : Vérifier que les valeurs limites d'une solive BLC de 10 m de portée comportant une contre-flèche de 20 mm ne soient pas dépassées. Les résultats numériques des déformations sont :

- déformation instantanée sous charge variable : 29 mm
- déformation instantanée sous charge permanente : 16 mm
- déformation différée : 23 mm

nature de la flèche	flèche calculée	valeur limite	critère vérifié
$W_{inst}(Q)$	29 mm	$\ell / 300 = 10000 / 300 = 33,3 \text{ mm}$	<i>oui</i>
$W_{net,fin}$	$29 + 16 + 23 - 20$ = 48 mm	$\ell / 200 = 10000 / 200 = 50 \text{ mm}$	<i>oui</i>
W_{fin}	$29 + 16 + 23$ = 68 mm	$\ell / 125 = 10000 / 125 = 80 \text{ mm}$	<i>oui</i>

**DOCUMENT TECHNIQUE – DT 07 –
FORMULAIRE « POUTRE CONTINUE »**



	TRAVÉE N°1	TRAVÉE N°2 :
EFFORT TRANCHANT	<ul style="list-style-type: none"> • $V_A = \frac{p(3L^3 + 4L^2L_1 - L_1^3)}{8L(L + L_1)}$ • $V_{Bg} = \frac{-p(5L^3 + 4L^2L_1 + L_1^3)}{8L(L + L_1)}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $V_C = \frac{-p(3L_1^3 + 4L_1^2L - L^3)}{8L_1(L + L_1)}$ • $V_{Bd} = \frac{p(5L_1^3 + 4L_1^2L + L^3)}{8L_1(L + L_1)}$
MOMENT FLÉCHISSANT	<ul style="list-style-type: none"> • $M(x) = -p\frac{x^2}{2} + V_A x$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $M(x) = \frac{-p(x-L_1)^2}{2} + V_C(x-L_1)$
ROTATION (DE SECTION)	<ul style="list-style-type: none"> • $w(x) = \frac{-px^3}{6EI} + \frac{V_A x^2}{2EI} + w_A$ • $w_A = \frac{-pL(L^3 + 2L^2L_1 - L_1^3)}{48EI(L + L_1)}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $w(x) = \frac{-p(x-L_1)^3}{6EI} + \frac{V_C(x-L_1)^2}{2EI} + w_C$ • $w_B = \frac{pL_1L(L-L_1)}{24EI}$ • $w_C = \frac{pL_1(L_1^3 + 2LL_1^2 - L^3)}{48EI(L + L_1)}$
FLÈCHE	<ul style="list-style-type: none"> • $f(x) = \frac{-px^4}{24EI} + \frac{V_A x^3}{6EI} + w_A x$ • $f(L/2) = \frac{-pL^2(2L^3 + 5L^2L_1 - 3L_1^3)}{384EI(L + L_1)}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $f(x) = \frac{-p(x-L_1)^4}{24EI} + \frac{V_C(x-L_1)^3}{6EI} + w_C(x-L_1)$ • $f(L_1/2) = \frac{-pL_1^2(2L_1^3 + 5L_1^2L - 3L^3)}{384EI(L + L_1)}$

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT RÉPONSE – DR 01 – PROFILS DES TEMPÉRATURES ET DES CONDUCTIVITÉS DANS L'ÉPAISSEUR DU PANNEAU CLT

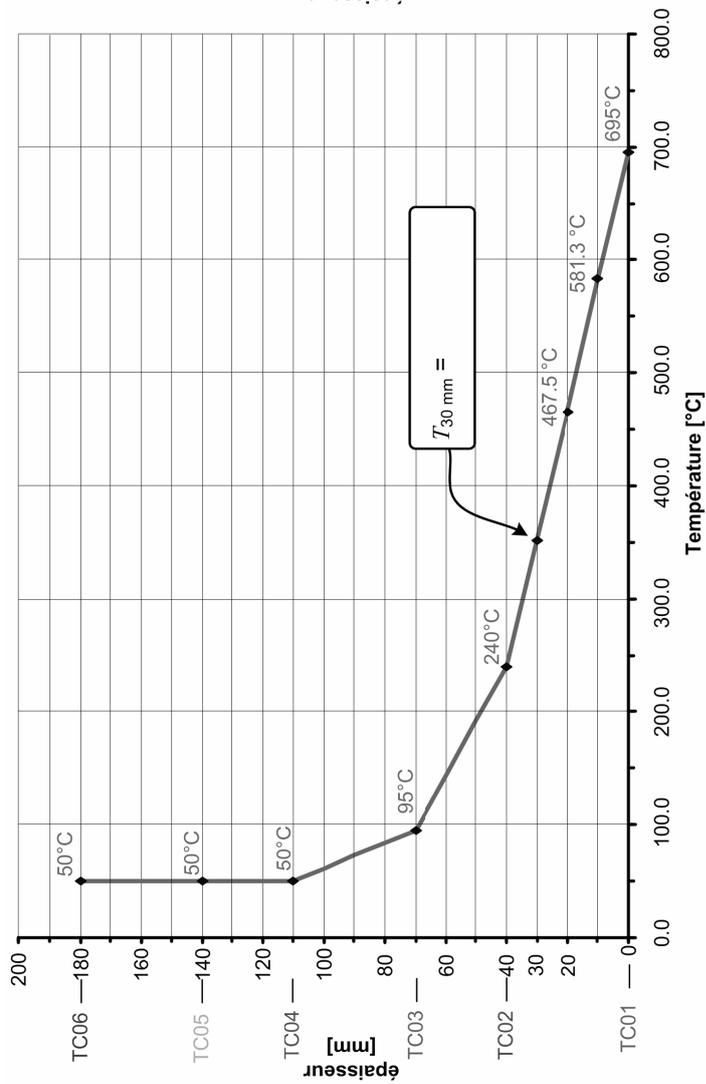


fig. a – Températures dans l'épaisseur du panneau (t=1 h)

Fournir les explications concernant la détermination de $T_{30\text{ mm}}$ au temps $t = 1\text{ h}$

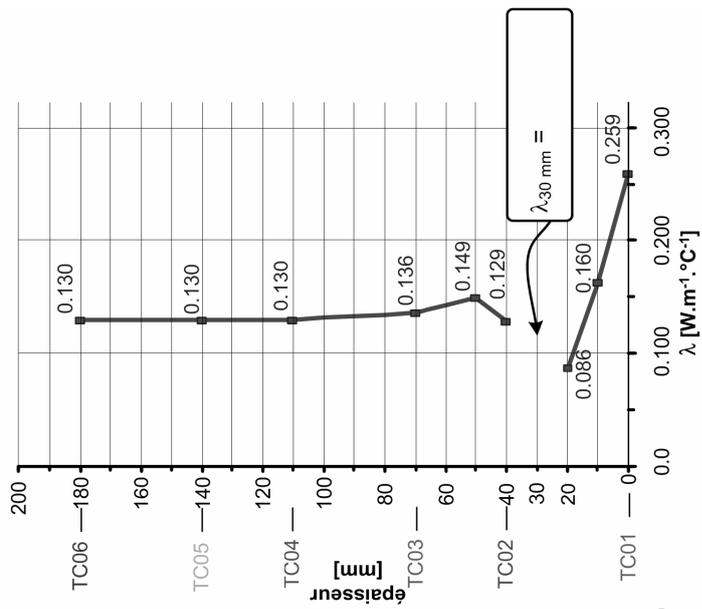


fig. b – Conductivités dans l'épaisseur du panneau (t=1 h)

Fournir les explications concernant la détermination de $\lambda_{30\text{ mm}}$ au temps $t = 1\text{ h}$

DOCUMENT RÉPONSE – DR 02 – MODÈLE ANALOGIQUE EN CONDUCTION

	localisation dans l'épaisseur [mm]	température [°C]	λ [W.m ⁻¹ .°C ⁻¹]	λ moyen [W.m ⁻¹ .°C ⁻¹]	épaisseur couche [m]	R_i [m ² .°C.W ⁻¹]
TC06	180	50.0	0.130			
	170	50.0	0.130	0.130	0.010	0.0769
	160	50.0	0.130	0.130	0.010	0.0769
	150	50.0	0.130	0.130	0.010	0.0769
TC05	140	50.0	0.130	0.130	0.010	0.0769
	130	50.0	0.130	0.130	0.010	0.0769
	120	50.0	0.130	0.130	0.010	0.0769
	110	50.0	0.130	0.130	0.010	0.0769
TC04	100	61.3	0.132	0.131	0.010	0.0765
	90	72.5	0.133	0.132	0.010	0.0756
	80	83.8	0.135	0.134	0.010	0.0748
	70	95.0	0.136	0.135	0.010	0.0739
TC03	60	143.3	0.142	0.139	0.010	0.0718
	50	191.7	0.149	0.146	0.010	0.0686
	40	240.0	0.129	0.139	0.010	0.0721
	30					
TC02	20	467.5	0.086	0.078	0.010	0.1281
	10	581.3	0.160	0.123	0.010	0.0813
	0	695.0	0.259	0.210	0.010	0.0477

$R_{\text{eff}} =$
 $\lambda_{\text{moy}} =$

