

Définition d'un plancher composite à haute performance thermique, mécanique et résistant au feu

Emmanuel ALHUAY CASTRO

DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur Option Génie Civil

Février – Juin 2021

 : Polytech Clermont Ferrand - Département Génie Civil

2, Av. Blaise Pascal – TSA 60206 – CS 60026 - F 63178 Aubière Cedex (France)

 : Secrétariat : +33 (0)4 73 40 76 87 / 76 90 Scolarité : +33 (0)4 73 40 75 05

 : +33 (0)4 73 40 75 10 - Mèl : dept.gc@polytech.univ-bpclermont.fr

DEFINITION D'UN PLANCHER COMPOSITE A HAUTE PERFORMANCE THERMIQUE, MECANIQUE ET RESISTANT AU FEU

Emmanuel ALHUAY CASTRO

Polytech Clermont-Ferrand – Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur –
Département Génie Civil – Février 2021

- Résumé -

La construction métallique représente actuellement un des secteurs les plus dynamiques, spécialement dans ce qui concerne les bâtiments industriels, agricoles, des bureaux ou pour des ouvrages complexes. La polyvalence du matériau et les caractéristiques remarquables permettent son emploi dans de nombreuses et innovantes applications techniques et architecturales. Les bonnes performances de l'acier dans des structures mixtes élargissent le domaine d'application.

Dans la partie I, on présente les principales caractéristiques physiques et mécaniques de l'acier et du béton, ensuite on étudie les propriétés de ces matériaux à de hautes températures. On donne aussi quelques notions concernant les planchers mixtes et l'interaction entre la plaque d'acier nervuré et le béton. Finalement dans cette partie on répertorie les différents types de feu selon la réglementation française.

La partie II est consacrée à la recherche d'un plancher composite en fonction de certains critères liés notamment à la construction en surélévation. Dans cette partie, on fait un récapitulatif des différents types de planchers existants qui pourraient intéresser le projet de l'entreprise, ensuite on fait un classement et choix des systèmes de plancher les plus adaptés d'après les critères d'analyse choisis. Les systèmes de planchers choisis seront ensuite analysés plus en profondeur regardant les avantages concernant l'application pour la construction en surélévation et ses performances mécaniques.

Dans la partie III, on réalise une étude détaillée globale des systèmes de planchers choisis dans la partie II, cette étude comprend une analyse multicritère et la détermination d'une conception complète du système de plancher intégrant un choix de plafond permettant de définir un système qui répond intégralement aux besoins de l'entreprise. Ainsi dans cette partie on fait une analyse détaillée des caractéristiques acoustiques comme de résistance au feu des systèmes de planchers définis précédemment.

Finalement, dans la conclusion on fait un bilan du travail réalisé présentant les résultats obtenus. On donne les avantages quantifiés et précis concernant le choix d'un ou autre système traité. On termine par un retour d'expérience concernant l'apprentissage pendant les mois de stage.

Mots-clés

Plancher mixte à bac collaborant – Résistance au feu – Acoustique – Construction en surélévation -
Préfabrication

Viry – Fayat Group
6 Mail Gaston Planté – 77185 - Lognes
Travaux dirigés par Mme Karine LEEMPOELS – Directrice Ingénierie

DEFINITION OF A HIGH THERMAL, MECHANICAL AND FIRE-RESISTANT COMPOSITE FLOOR

Emmanuel ALHUAY CASTRO

Polytech Clermont-Ferrand -Report presented with the aim of the obtaining of the engineering degree - Department of civil engineering - February 2021

- Summary -

Metal construction is currently one of the most dynamic sectors, especially in industrial, agricultural, office and complex buildings. The versatility of the material and the remarkable characteristics allow its use in numerous and innovative technical and architectural applications. The good performance of steel in mixed structures extends the field of application.

Part I presents the main physical and mechanical characteristics of steel and concrete, and then studies the properties of these materials at high temperatures. There are also some notions about mixed floors and the interaction between ribbed steel plate and concrete. Finally, this section lists the different types of fire according to French regulations.

Part II is devoted to the search for a composite floor according to certain criteria related in particular to the elevated construction. In this section, a summary is made of the different types of existing floors that could be of interest to the company's project, then a classification and choice of the most suitable floor systems based on the chosen analysis criteria. The chosen floor systems will then be analyzed in more depth looking at the advantages regarding the application for the elevated construction and its mechanical performance.

Part III provides an overall detailed study of the floor systems selected in Part II, this study includes a multi-criteria analysis and the determination of a complete design of the floor system incorporating a ceiling choice to define a system that fully meets the needs of the company. Thus, in this part a detailed analysis is made of the acoustic characteristics as well as fire resistance of the floor systems defined previously.

Finally, in the conclusion, a report is made on the work carried out and the results obtained. Quantified and precise advantages concerning the choice of one or other treated system are given. We end with a feedback on the learning during the internship months.

Key - words

Mixed floor with metal decking – Fire Resistance – Acoustic – Elevated construction - Prefabrication

Viry – Fayat Group

6 Mail Gaston Planté – 77185 - Lognes

Travaux dirigés par Mme Karine LEEMPOELS – Directrice Ingénierie

Sommaire

Liste de figures

Liste des Tableaux

Partie I	1
Généralités	1
1. Propriétés des matériaux	1
1.1. Béton	1
1.2. Aciers	4
2. Propriétés des matériaux exposées au feu	5
3. Dalles mixtes.....	10
4. Types de feu	11
4.1. Feu nominal.....	11
4.2. Feu paramétrique.....	11
4.3. Types de courbes température-temps.....	11
4.4. Modèles de feu naturel.....	12
Méthode de calcul.....	12
1. Calcul des dalles mixtes.....	12
2. Vérification à l'ELU	13
2.1. Flexion	13
2.2. Effort tranchant.....	15
2.3. Poinçonnement	15
2.4. Cisaillement longitudinal.....	17
3. Calcul des planchers mixtes exposés au feu.....	17
3.1. Combinaison d'actions accidentelles	18
3.2. Dalles mixtes non protégées	18
3.3. Dalles mixtes avec protection contre le feu.....	18
4. Calcul d'une dalle mixte non protégée exposée à un feu	19
4.1. Calcul du moment résistant positif	20
4.2. Calcul du moment résistant négatif	21
4.3. Détermination des moments résistants.....	24
Exemples d'application.....	25
1. Calcul d'une dalle simplement appuyée	25
1.1. Critère d'isolation thermique	25
1.2. Critère de résistance mécanique.....	26
2. Calcul d'une dalle continue	26
2.1. Procédure de calcul	27
3. Autres configurations de dalle mixte	28
4. Effet membrane dans une dalle de béton armé	30

4.1.	Principe de la méthode	30
4.2.	Présentation des résultats.....	31
5.	Conclusion	33
	Conclusion de l'étude bibliographique.....	33
	Partie II	35
1.	Classification de planchers	35
1.1.	Critères pour choix du plancher	38
1.2.	Classification des meilleures solutions.....	38
1.3.	Conclusion	41
2.	Analyse de la section du plancher Cofradal 200	42
2.1.	Résistance du plancher Cofradal sans renfort.....	44
2.1.1.	Capacité portante.....	44
2.1.2.	Flèche et ratio (capacité portante/poids propre)	46
2.2.	Analyse en intégrant un profilé IPE 140 et IPE 160	48
2.3.	Plancher mixte avec IPE 140.....	49
2.4.	Plancher mixte avec IPE 160.....	51
2.5.	Comparaison avec des profilés en C.....	52
2.6.	Modèle numérique sur SCIA Engineering	54
2.6.1.	Modèle de calcul	54
2.6.2.	Résultat de calcul avec le logiciel SCIA ENGINEERING	56
2.7.	Bilan des systèmes analysés	58
3.	Plancher sec.....	58
3.1.	Plancher Supportsol 170	59
3.1.1.	Calcul du facteur de correction	60
3.1.2.	Fiche produit.....	60
3.2.	Calcul de la flèche corrigé sur SCIA	61
3.3.	Calcul de la flèche corrigé sur ANSYS	62
3.4.	Calcul flèche RDM.....	64
3.2.	Comparaison des méthodes de calcul.....	64
3.3.	Conclusion	65
	Partie III	66
4.	Validation de la modélisation des plafonds sur INSUL.....	66
5.	Proposition et analyse des systèmes de plafond	67
5.1.	Plafond à une lame d'air.....	67
5.2.	Plafond à double lame d'air	70
6.	Comparaison des systèmes de plafond.....	71
7.	Conclusion	72

8.	Étude de la résistance au feu des planchers	73
8.1.	Validation de la modélisation sur Abaqus.....	73
8.2.	Distribution de température dans une dalle béton	73
8.3.	Modèle Abaqus d'une section en béton	73
8.3.1.	Résultats du modèle Abaqus à 60 minutes	74
8.4.	Comparaison du logiciel Abaqus avec l'EN 1994-1-2	74
9.	Modèle numérique du plancher Cofradal	75
9.1.	Modèle non protégé.....	76
9.2.	Modèle protégé.....	76
9.2.1.	Température dans la section du plancher.....	77
9.2.2.	Protection par deux panneaux Fermacel	77
9.2.3.	Protection par deux panneaux en plâtre.....	78
9.2.4.	Protection par un panneau fermacel	78
9.2.5.	Protection par un panneau en plâtre	79
9.2.6.	Température à l'interface laine de roche et béton	80
10.	Modèle numérique du plancher Supportsol	80
10.1.	Modèle non protégé.....	80
10.2.	Modèle protégé.....	81
10.2.1.	Température dans la section du plancher.....	82
10.2.2.	Protection par deux panneaux Fermacel	82
10.2.3.	Protection par deux panneaux en plâtre.....	83
10.2.4.	Protection par un panneau Fermacel.....	83
10.2.5.	Protection par un panneau en plâtre	84
11.	Capacité portante des planchers exposés au feu.....	85
11.1.	Cofradall avec un panneau Fermacel	85
11.2.	Cofradal avec un panneau en plâtre	85
11.3.	Cofradal sans protection au feu	86
11.4.	Supportsol avec panneau Fermacel ou en plâtre.....	87
12.	Bilan des systèmes de plancher	88
	Conclusion générale	92
	Bibliographie.....	94
	Annexes	96
1.	Détail de calcul : plancher simplement appuyé	96
2.	Détail de calcul : plancher continu	98
3.	Première estimation des charges aux appuis.....	100
3.1.	Hypothèses.....	100
3.2.	Charge permanente.....	100

3.3.	Poids propre	101
3.4.	Charge aux appuis	102
3.5.	Conclusion	102
4.	Proposition et calcul acoustique des plafonds.....	102
4.1.	Plafond à suspente métallique avec des panneaux Fermacell.....	103
4.2.	Système à poutres en C avec panneaux en plaque de plâtre et suspentes antivibratoire 107	
4.3.	Calcul du coefficient d'adaptation C	113
5.	Systèmes de plancher bois	114
6.	Exemple de vérification de résistance et de flèche pour le CLT 2.....	116
7.	Système de plancher à poutres en C.....	119
8.	Méthode Electre I.....	120
9.	Programme pour le surclassement des planchers	121

Liste de figures

Figure 1. Schéma de contrainte déformation du béton	2
Figure 2. Diagramme bilinéaire.....	3
Figure 3. Diagramme parabole-rectangle pour un béton comprimé	3
Figure 4. Diagramme rectangulaire	4
Figure 5. Acier laminé à chaud.....	4
Figure 6. Acier laminé à froid	4
Figure 7. Diagramme contrainte-déformation de l'acier exposé à la chaleur.....	5
Figure 8. Coefficient de réduction des propriétés mécaniques de l'acier en fonction de la température	6
Figure 9. Allongement relatif de l'acier en fonction de la température	6
Figure 10. Chaleur spécifique de l'acier en fonction de la température.....	7
Figure 11. Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température.....	7
Figure 12. Contrainte de résistance à la compression du béton en fonction de la température.....	8
Figure 13. Allongement relatif pour un béton courant et un béton léger en fonction de la température	9
Figure 14. Chaleur spécifique pour un béton courant et un béton léger en fonction de la température.....	9
Figure 15. Conductivité thermique pour un béton courant et un béton léger en fonction de la température.....	9
Figure 16. Liaison mécanique par indentations ou bossages.....	10
Figure 17. Liaison par ancrages d'extrémité soudés à travers la tôle.....	10
Figure 18. Ancrage par déformation de nervure à l'extrémité.....	10
Figure 19. Ancrages par frottement.....	10
Figure 20. Nervures rentrantes	10
Figure 21. Nervures sortantes.....	10
Figure 22. Zones présentant les différents modes de ruine.....	13
Figure 23. Diagramme de contraintes pour un moment positif avec axe neutre au-dessus de la nervure.....	14
Figure 24. Diagramme de contraintes pour un moment positif avec axe neutre dans la nervure.....	14
Figure 25. Diagramme de contraintes pour un moment négatif	15
Figure 26. Périmètre critique sous une charge concentrée	16
Figure 27. Coupe transversale montrant la diffusion de la charge concentrée.....	16
Figure 28. Graphique montrant les différents essais et la droite m-k.....	17
Figure 29. Dalle mixte avec plaques rentrant en acier.....	18
Figure 30. Dalle mixte avec plaques trapézoïdales en acier.....	18
Figure 31. Section type d'une dalle mixte	19
Figure 32. Schéma montrant les paramètres géométriques pour déterminer la température des aciers supplémentaires.....	21
Figure 33. Isothermes pour une section type d'une dalle mixte.....	22
Figure 34. Schéma montrant le tracé de l'isotherme correspondant à la température limite.....	22
Figure 35. Schéma montrant les dimensions et caractéristiques de la dalle mixte simplement appuyée	25
Figure 36. Schéma montrant les dimensions et caractéristiques de la dalle mixte continue.....	27
Figure 37. Temps de résistance au feu pour dalles sans acier de renfort.....	29
Figure 38. Temps de résistance au feu pour différentes configurations de dalles.	29
Figure 39. Schéma montrant la formation de l'arc de charges à trois articulations.....	31
Figure 40. Graphique de charge vs flèche pour les spécimens H2, H6 et H7.....	31
Figure 41. Graphique de charge vs flèche pour les spécimens H5, H12 et H1.....	32
Figure 42. Relation entre la charge supplémentaire.....	32
Figure 43. Relation entre la charge supplémentaire et le ratio.....	32
Figure 44. Histogramme comparatif de la pertinence des systèmes de plancher.....	40
Figure 45. Radar du système de plancher choisi	41
Figure 46. Coupe montrant les différents éléments du plancher Cofradal 200.....	42
Figure 47. Détail des jonctions entre deux panneaux Cofradal.....	42
Figure 48. Schéma de calcul de la résistance d'un plancher mixte	44

Figure 49. Capacité portante des planchers Cofradal 200 avec et sans coefficient de sécurité.....	44
Figure 50. Comparaison de la capacité portante par rapport aux données de l'avis technique du plancher	45
Figure 51. Évolution de la flèche et la flèche limite en fonction de la portée.....	46
Figure 52. Ratio entre la capacité portante et le poids propre du plancher.....	47
Figure 53. Capacité portante en fonction de la portée des planchers Cofradal et à poutres en C et charge sollicitant.....	48
Figure 54. Schéma représentant le plancher mixte avec un IPE 140 ou 160.....	49
Figure 55. Capacité portante et charge sollicitant du plancher mixte	50
Figure 56. Flèche sous chargement et flèche limite du plancher mixte.....	50
Figure 57. Capacité portante et charge de sollicitation du plancher mixte.....	51
Figure 58. Flèche sous chargement et flèche limite du plancher mixte.....	51
Figure 59. Ratio charge portant – poids propre des planchers mixtes avec IPE 140 et 160 en fonction de la portée	52
Figure 60. Capacité portante du plancher mixte avec IPE 140 comparé à celle du système de poutres en C.....	53
Figure 61. Capacité portante du plancher mixte avec IPE 140 comparé à celle du système de poutres en C.....	54
Figure 62. Schéma du modèle numérique analysé.....	55
Figure 63. Charge d'exploitation du projet	55
Figure 64. Charge permanente du projet	56
Figure 65. Poids propre du plancher mixte.....	56
Figure 66. Résultat des déplacements verticaux du plancher en mm	57
Figure 67. Effort interne V_y en KN dans le plancher mixte.....	57
Figure 68. Effort interne m_y en KNm dans le plancher mixte.....	57
Figure 69. Effort V_z en KN dans les poutres mixtes.....	58
Figure 70. Vue transversale du plancher sec Supportsol 170.....	59
Figure 71. Modèle robot de la section du plancher Supportsol 170.....	59
Figure 72. Estimation de flèche pour des chargements et portées données selon différentes méthodes	61
Figure 73. Calcul sur SCIA pour différentes portées avec les charges du projet.....	62
Figure 74. Calcul par éléments finis sur ANSYS pour une portée de 2,5 mètres.....	63
Figure 75. Calcul par éléments finis sur ANSYS pour une portée de 5 mètres.....	63
Figure 76. Flèche maximale selon les charges du projet et différentes portées.....	64
Figure 77. Comparaison de différentes méthodes de calcul	65
Figure 78. Comparaison des calculs sur le logiciel INSUL par rapport aux données de référence.....	67
Figure 79. Exemple de plafond à poutres en C.....	67
Figure 80. Exemple de plafond à poutres en C avec double lame d'air.....	70
Figure 81. Comparaison des systèmes de plafond à une seule lame d'air	71
Figure 82. Comparaison des systèmes à double lame d'air	72
Figure 83. Modèle Abaqus d'une section en béton de 100x100 millimètres.....	74
Figure 84. Évolution de la température dans la section du béton à 60 minutes	74
Figure 85. Comparaison entre les modèles Abaqus et EN 1994-1-2 à 60 minutes d'exposition au feu	75
Figure 86. Modèle Abaqus du plancher Cofradal 200 non protégé.....	76
Figure 87. Température dans la tôle sans protection au feu.....	76
Figure 88. Modèle Abaqus du plancher Cofradal 200	77
Figure 89. Température dans la section Cofradal à 60 minutes d'exposition au feu	77
Figure 90. Température dans la tôle protégée par deux panneaux Fermacel à 60 minutes d'exposition	78
Figure 91. Température dans la tôle protégée par deux panneaux en plaque de plâtre à 60 minutes d'exposition	78
Figure 92. Température dans la tôle protégée par un panneau Fermacel à 60 minutes d'exposition.....	79
Figure 93. Température dans la tôle protégée par un panneau en plaque de plâtre à 60 minutes d'exposition ..	79
Figure 94. Température dans l'interface entre la laine de roche et le béton à 60 minutes.....	80
Figure 95. Modèle de transfert thermique du plancher Supportsol.	81
Figure 96. Distribution de température dans le plancher Supportsol non protégé en situation d'incendie.....	81

Figure 97. Modèle Abaqus du plancher Supportsol 170.....	82
Figure 98. Température dans l'épaisseur de la section Supportsol 170 à 60 minutes d'exposition.....	82
Figure 99. Température dans la tôle protégée par deux panneaux Fermacel à 60 minutes d'exposition	83
Figure 100. Température dans la tôle protégée par deux panneaux en plaque de plâtre à 60 minutes d'exposition.....	83
Figure 101. Température dans la tôle protégée par un panneau Fermacel à 60 minutes d'exposition.....	84
Figure 102. Température dans la tôle protégée par un panneau en plaque de plâtre à 60 minutes d'exposition	84
Figure 103. Capacité portante du Cofradal entre 5 et 6 mètres en situation d'incendie	85
Figure 104. Capacité portante du Cofradal entre 5 et 6 mètres en situation d'incendie.	86
Figure 105. Évolution de la capacité portante en fonction du temps d'exposition au feu	87
Figure 106. Flèches développées par le plancher supportsol après une heure d'exposition au feu.....	88
Figure 107. Vue schématique du plafond Placostil	100

Liste des Tableaux

Tableau 1. Dessiccation du béton en fonction de sa classe et humidité relative	3
Tableau 2. Coefficient de réduction de la résistance du béton en fonction de la température.....	8
Tableau 3. Différentes courbes modélisant un feu. [NF EN 1991-1-2, 2003]	11
Tableau 4. Différents modèles pour un feu naturel. [NF EN 1991-1-2, 2003]	12
Tableau 5. Charges à prendre en compte dans la phase de construction et la phase mixte.....	12
Tableau 6. Combinaison d'actions accidentelle.	18
Tableau 7. Coefficients ai de l'équation du temps de résistance au feu d'une dalle mixte.....	19
Tableau 8. Coefficients b (i) pour l'équation de la température de la plaque nervurée.....	20
Tableau 9. Coefficients c (i) pour l'équation de la température des aciers supplémentaires.....	21
Tableau 10. Coefficients d (i) pour l'équation de la température limite	22
Tableau 11. Tableau montrant le calcul des points permettant de tracer l'isotherme.	23
Tableau 12. Tableau de valeur tabulé pour le tracé de l'isotherme de la température limite.....	23
Tableau 13. Valeur de calcul du facteur de vue et du facteur géométrique.	25
Tableau 14. Facteurs de réduction de résistance mécanique en fonction de la température de l'élément.....	26
Tableau 15. Comparaisons des valeurs du moment de résistance et de sollicitation.	26
Tableau 16. Valeur de calcul de la température limite.	27
Tableau 17. Point permettant de tracer l'isotherme.....	27
Tableau 18. Valeur de calcul du moment résistant négatif.....	28
Tableau 19. Valeur de calcul du moment résistant positif.....	28
Tableau 20. Comparaison entre les différentes méthodes.....	33
Tableau 21. Caractéristiques des différents systèmes de plancher existants.....	35
Tableau 22. Caractéristiques des différents systèmes de plancher existants.....	36
Tableau 23. Caractéristiques des différents systèmes de plancher existants.....	37
Tableau 24. Critère d'évaluation par rapport à la pertinence des différents systèmes de plancher.....	38
Tableau 25. Classement de différents systèmes de plancher par rapport aux critères d'évaluation	39
Tableau 26. Bilan concernant le classement des planchers du plus adapté au moins adapté.....	39
Tableau 27. Détail des caractéristiques de matériaux composant le plancher Cofradal 200	43
Tableau 28. Caractéristiques de résistance des profilées et du béton	49
Tableau 29. Caractéristiques géométriques des planchers mixtes.....	49
Tableau 30. Donnée concernant le modèle du logiciel SCIA ENGINEERING	54
Tableau 31. Bilan des solutions de planchers évalués.....	58
Tableau 32. Caractéristiques de la section.....	59
Tableau 33. Capacité portante en fonction de la portée et des épaisseurs de profil	60
Tableau 34. Comparatif entre la flèche calculée par le logiciel SCIA et la flèche limite	62
Tableau 35. Estimations du logiciel INSUL et données fournies par « Acoustical Expert – VK Group »	66
Tableau 36. Systèmes de plafond proposés	68
Tableau 37. Caractérisation de différents systèmes de plafond	69
Tableau 38. Systèmes de plafond à double lame d'air.....	71
Tableau 39. Distribution de la température dans une dalle pleine de 100 mm non protégés selon l'EN 1994-1-2	73
Tableau 40. Bilan des températures dans la tôle Cofradal selon le type de protection à 60 minutes d'exposition	80
Tableau 41. Bilan des températures dans la tôle Supportsol selon le type de protection à 60 minutes d'exposition	85
Tableau 42. Réduction de la capacité résistante en fonction du temps d'exposition au feu	87
Tableau 43. Systèmes de plancher proposés et critères d'analyse.....	89
Tableau 44. Tableau normalisé des solutions et des critères.....	89
Tableau 45. Valeur des concordances entre les différents planchers.....	90
Tableau 46. Valeur des discordances entre les différents planchers.....	90
Tableau 47. Récapitulatif des relations de concordance par rapport au seuil établi	90

Tableau 48. Récapitulatif des relations de discordances par rapport au seuil établi.....	91
Tableau 49. Relations de surclassement entre les différentes solutions.....	91
Tableau 50. Éléments composant un mètre carré de plafond Placostil	100
Tableau 51. Poids propre du plafond Placostil.....	100
Tableau 52. Charge permanente sur le plancher	101
Tableau 53. Poids propre du plancher Cofradal 200.	101
Tableau 54. Poids propre du plancher Supportsol 74.....	101
Tableau 55. Charge linéique ramenée aux appuis pour une portée de 3,7 mètres.....	102
Tableau 56. Charge aux appuis et portées des deux systèmes comparés.....	102
Tableau 57. Caractéristiques géométriques et de charge des plancher en C.....	120
Tableau 58. Résultats de résistance des plancher en C.....	120

Partie I

Cette partie est consacrée à l'étude bibliographique concernant le sujet de stage. Ainsi on étudie les méthodes de dimensionnement des planchers mixtes, la résistance au feu et les recherches faites à ce sujet par les chercheurs. Finalement, on propose un exemple d'application de la méthode de dimensionnement à utiliser.

Généralités

Dans cette section, on fait une description générale des propriétés des matériaux composant les planchers qu'on étudie, ainsi comme les normes relatives à l'exposition au feu des structures.

1. Propriétés des matériaux

À continuation, on répertorie les principales propriétés du béton et de l'acier. Ces propriétés caractérisent le comportement de ces matériaux soumis à des sollicitations et aident à déterminer leur résistance.

1.1. Béton

Développé par première fois dans les années 70, le béton est un des principaux et des plus utilisés matériaux de construction. Le béton constitue un élément essentiel dans tout élément structural, rendant de cette façon, l'étude de ces propriétés indispensable pour mieux le maîtriser.

❖ Résistance

La résistance du béton est déterminée en considérant le fractile 5 % inférieur des résultats des essais réalisés. Il y a deux types d'essais normalisés pour déterminer la résistance en compression, soit le cylindre ou le cube. [NF EN 206-1, 2014]

Dans l'Eurocode la résistance caractéristique du béton en compression est obtenue à partir des essais sur cylindre mesuré à 28 jours.

En revanche, dans des cas spéciaux comme la précontrainte, la résistance du béton peut être mesurée avant les 28 jours. [NF EN 12 390, 2019]

Il faut noter aussi que la résistance du béton est en relation directe par certains paramètres, comme le type de ciment utilisé, la température et le type de cure réalisée.

❖ Déformation élastique du béton

Le béton étant un mélange de plusieurs matériaux présents de caractéristiques en déformation qui dépend principalement des granulats, qui forment le squelette. Ainsi il a été observé que les caractéristiques en élasticité du béton dépendent de matériaux qui lui composent.

Comme le béton n'a pas un comportement purement élastique, au contraire le béton a un comportement en déformation qui est non linéaire, alors on obtienne le module élastique approché du béton du diagramme de contrainte déformation. Pour cela, on trace une droite qui passe par $\sigma_c = 0$ et $\sigma_c = 0,4f_{cm}$ (contrainte en compression moyenne du béton). Cette élasticité du béton peut varier dans le temps.

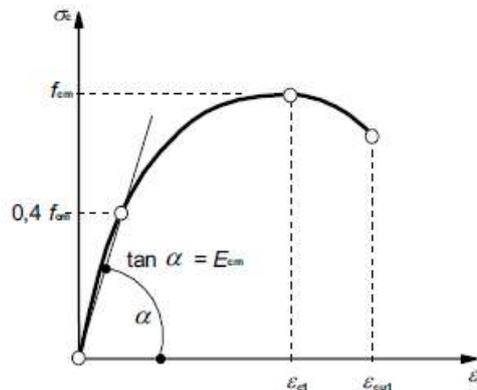


Figure 1. Schéma de contrainte déformation du béton

D'après ce qui est préconisé dans l'Eurocode on peut prendre une valeur de 0 pour le coefficient de Poisson dans un béton fissuré et de 0,2 dans un béton non fissuré. Finalement, on peut prendre un coefficient linéaire de dilatation thermique de $10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. [EC2.1.1, 1992]

❖ Fluage

Le fluage est un phénomène que se développe dans une structure au cours du temps par le chargement continu. Ce phénomène dépend de plusieurs facteurs tels comme l'humidité de l'ambiance, les dimensions de la section et la composition du béton. Il peut influencer aussi le fait de charger la structure avant d'attendre la maturité du béton. [GRA, 2014]

Le coefficient de fluage dépend du module tangent E_c qui peut s'obtenir de manière homologue au module élastique. Pour déterminer E_c , il faudra tracer une droite dans le graphique contrainte déformation du béton, qui passe par $\sigma_c = 0$ et $\sigma_c = 0,45f_{ck}(t_0)$.

Quand la contrainte de compression dans le béton dépasse la valeur de $0,45f_{ck}(t_0)$ (la résistance caractéristique du béton à un temps t_0 de prise) il est recommandable de prendre en compte le comportement en déformation non-linéaire du béton.

❖ Retrait

Le retrait est produit par la réaction chimique du ciment et l'eau. D'après les recherches, on reconnaît deux types de retrait. Le premier type de retrait se développe assez rapidement dans les premiers jours de la prise du béton et qui a une relation linéaire avec l'augmentation en résistance du béton. Le deuxième type de retrait se développe plus lentement et dépend principalement de la migration de l'eau à travers le béton dans un état durci. Au premier type de retrait, on l'appelle retrait de dessiccation et au deuxième type on l'appelle retrait endogène. [CLA, 1998]

Dans le tableau ci-dessus, on peut observer la variation du phénomène de dessiccation en fonction de la classe de résistance du béton et de l'humidité relative.

f_{ck}	Humidité relative (en %)					
	20	40	60	80	90	100
$f_{ck,cube}$ (MPa)						
20/25	0,64	0,60	0,50	0,31	0,17	0
40/50	0,51	0,48	0,40	0,25	0,14	0
60/75	0,41	0,38	0,32	0,20	0,11	0
80/95	0,33	0,31	0,26	0,16	0,09	0
90/105	0,30	0,28	0,23	0,15	0,05	0

Tableau 1. Dessiccation du béton en fonction de sa classe et humidité relative

❖ **Résistance en compression et traction du béton**

Les résistances caractéristiques sont définies à partir des essais de traction ou compression. On appelle la résistance caractéristique, à la valeur de résistance obtenue pour un ensemble d'essais réalisés, dont la valeur est au plus supérieure à 5 % de l'ensemble des résultats. Ensuite pour obtenir les résistances du calcul, il faudra appliquer deux coefficients à la résistance caractéristique, un coefficient relatif au béton et un autre relatif aux effets à long terme concernant la résistance en traction ou compression du béton, ainsi comme la manière dont la charge est appliquée.

❖ **Contrainte-déformation du béton**

Il est possible d'exprimer cette relation avec plusieurs types de diagrammes. Car le comportement du béton ce n'est pas élastique et dans le cadre des théories des petits déformations, on peut utiliser des diagrammes simplifiés, tels comme le diagramme bilinéaire et le rectangle.

Ci-dessous trois différents types de diagrammes contrainte-déformation du béton.

ϵ_{c2} : déformation atteinte pour la contrainte maximale ;

ϵ_{cu2} : Déformation ultime ;

f_{ck} : Résistance caractéristique en compression du béton ;

f_{cd} : Résistance de calcul en compression du béton.

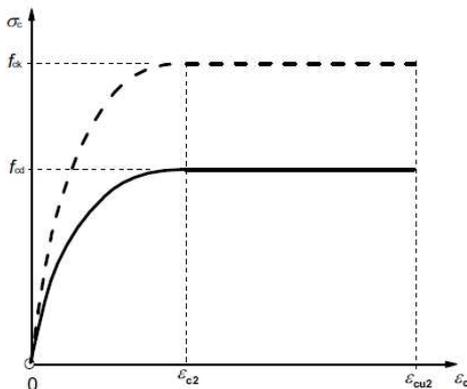


Figure 3. Diagramme parabole-rectangle pour un béton comprimé

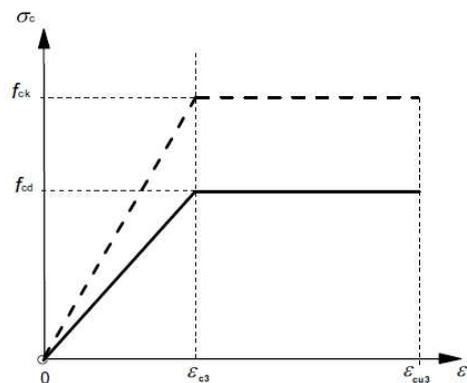


Figure 2. Diagramme bilinéaire

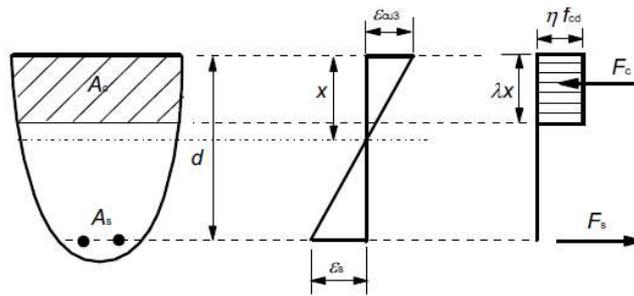


Figure 4. Diagramme rectangulaire

❖ **La traction due à la flexion**

Une sollicitation en flexion dans une section du béton quelconque produira des efforts de traction et compression dans les fibres extrêmes de la section. Ainsi notamment la résistance à la traction induite par une sollicitation en flexion sera en lien direct à la résistance en traction simple et à la hauteur de la section.

1.2. Aciers

La valeur moyenne de la masse volumique des aciers peut être prise égale à 7850 kg/m³ et le module de Young peut être pris égal à 200 GPa.

❖ **Resistance**

Pour déterminer la résistance, on définit deux paramètres principaux, la charge caractéristique pour laquelle on atteint la limite d'élasticité et la charge caractéristique maximale. La charge caractéristique définit la contrainte caractéristique, pour une déformation plastique de 0,2 % lors des essais en traction des éprouvettes. Ces deux paramètres donnent respectivement la limite d'élasticité et la résistance à la traction.

❖ **Caractéristiques de ductilité**

Les aciers de construction utilisés dans le béton armé doivent avoir une ductilité adéquate, cette caractéristique des aciers est définie en fonction du rapport entre la résistance en traction et la limite d'élasticité et en fonction de l'allongement sous un chargement maximal. [BAE, 2

Dans les images ci-dessous on peut voir l'évolution de la contrainte en fonction de l'allongement des aciers laminés à chaud et des aciers profilés à froid.

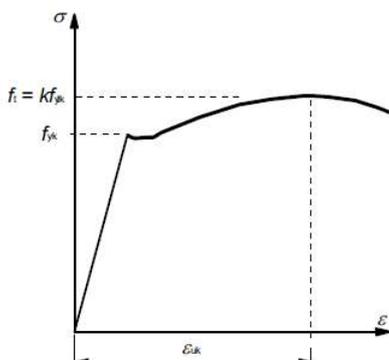


Figure 5. Acier laminé à chaud

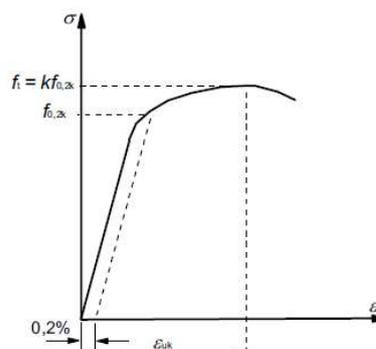


Figure 6. Acier laminé à froid

2. Propriétés des matériaux exposés au feu

Ici on présente les principales propriétés de l'acier et du béton définissant leur comportement au feu. Ces propriétés thermiques sont : l'allongement relatif, la chaleur spécifique et la conductivité thermique.

❖ Propriétés de résistance-déformation des aciers

Les propriétés thermiques varient au fur et à mesure de son exposition à la chaleur. Pour des vitesses d'évolution de la température comprise entre 2 K°/min et 50 K°/min on aura une évolution de la contrainte-déformation selon le graphique ci-dessous.

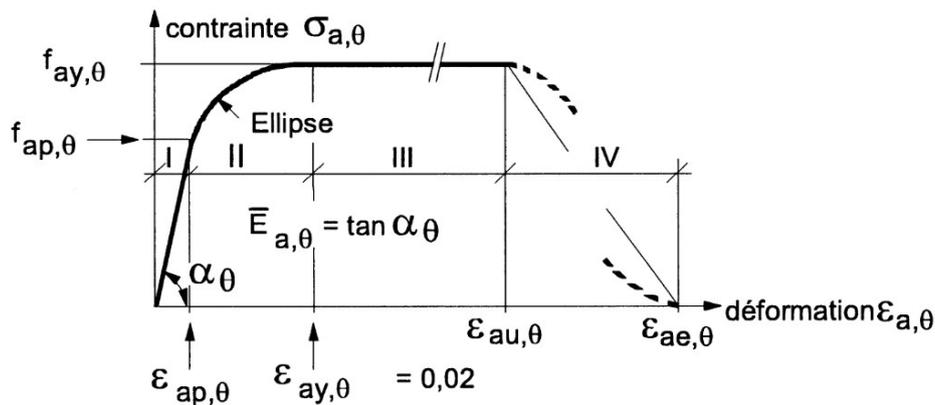


Figure 7. Diagramme contrainte-déformation de l'acier exposé à la chaleur

Dans le graphique ci-dessus on observe quatre zones, la I qui est la zone élastique, la II qui est une zone transitoire, la III qui est la zone plastique et la IV qui est la zone de ruine ou de rupture. Ainsi $\epsilon_{ap,\theta}$ est la déformation élastique maximale, $\epsilon_{ay,\theta}$ est la déformation maximale en prenant en compte la zone transitoire et $\epsilon_{au,\theta}$ qui représente la déformation ultime des aciers. Pour les contraintes, on a $f_{ap,\theta}$ comme contrainte maximale pour la zone d'élasticité linéaire et $f_{ay,\theta}$ la contrainte maximale de résistance.

L'allure de la courbe du graphique ci-dessus est conditionnée à l'évolution de la température θ .

Dans le tableau ci-dessous, on peut voir plus clairement l'évolution des différents paramètres du graphique contrainte-déformation, en fonction de la variation de température. Le facteur K définit le rapport entre les caractéristiques de l'acier de construction à température normale et à des températures plus élevées.

Température de l'acier θ_c (°C)	$K_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$K_{p,\theta} = \frac{f_{ap,\theta}}{f_{ay}}$	$K_{y,\theta} = \frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay}}$	$K_{u,\theta} = \frac{f_{au,\theta}}{f_{ay}}$
20	1	1	1	1,25
100	1	1	1	1,25
200	0,90	0,807	1	1,25
300	0,80	0,613	1	1,25
400	0,70	0,420	1	
500	0,60	0,360	0,78	
600	0,31	0,180	0,47	

700	0,13	0,075	0,23
800	0,09	0,050	0,11
900	0,0675	0,0375	0,06
1000	0,0450	0,0250	0,04
1100	0,0225	0,0125	0,02
1200	0	0	0

Figure 8. Coefficient de réduction des propriétés mécaniques de l'acier en fonction de la température

❖ Propriétés thermiques de l'acier

La dilatation thermique de l'acier, défini comme un allongement relatif $\frac{\Delta L}{L}$, peut être déterminé pour des rangs de température définis. Ainsi on a trois rangs principaux qui vont de 20 °C à 750 °C, de 750 °C à 860 °C et de 860 °C à 1200 °C.

Dans le graphique ci-dessous, on peut voir l'évolution de la dilatation thermique pour des aciers de construction et d'armature de toutes les nuances, pour les différents rangs de température.

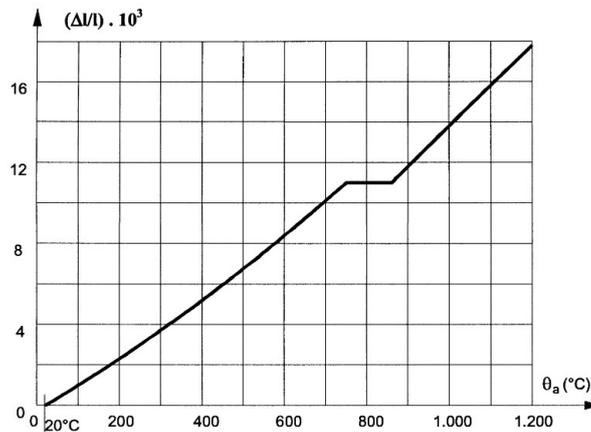


Figure 9. Allongement relatif de l'acier en fonction de la température

Une autre caractéristique thermique importante est la chaleur spécifique de l'acier c_a cette caractéristique permet de définir la quantité d'énergie par unité masse du matériau qu'il faut fournir pour élever la température d'un Kelvin. Ce paramètre est défini en quatre rangs de température : de 20 °C à 600 °C, de 600 °C à 735 °C, de 735 °C à 900 °C et de 900 °C à 1200 °C.

Dans le graphique ci-dessous, on peut voir l'évolution de la chaleur spécifique de l'acier en fonction des différentes températures.

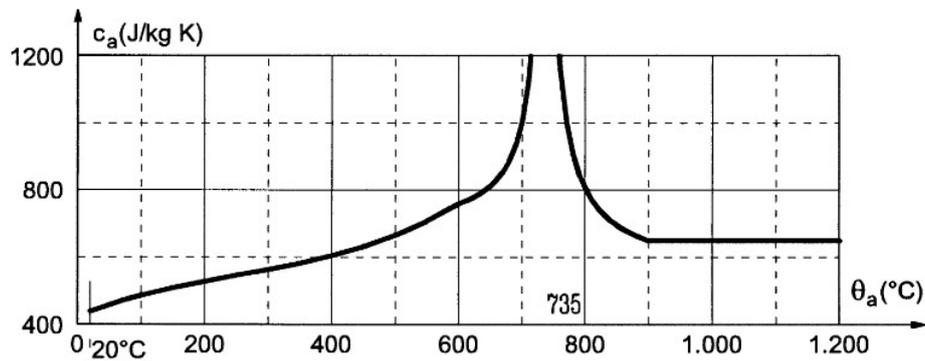


Figure 10. Chaleur spécifique de l'acier en fonction de la température

Finalement la conductivité thermique λ_a , ce paramètre représente la capacité d'un matériau de transmettre de la chaleur. Ce paramètre peut être défini selon deux rangs de température allant de 20 °C à 800 °C et de 800 °C à 1200 °C. Aussi dans des calculs simplifiés on peut considérer que la conductivité thermique est indépendante de la température et prend une valeur de $\lambda_a = 45 \frac{W}{mK}$.

Dans le graphique ci-dessous, on voit l'évolution de la conductivité thermique pour les deux rangs de température.

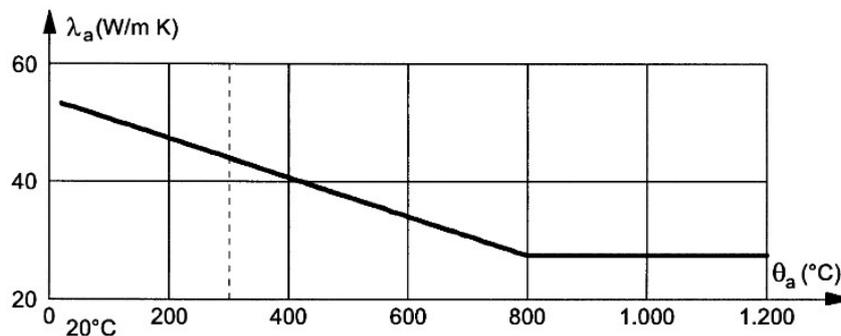


Figure 11. Conductivité thermique de l'acier en fonction de la température

❖ Propriétés de résistance-déformation du béton

Comme pour l'acier, pour des vitesses d'évolution de la température comprises entre 2 K°/min et 50 K°/min, on peut définir un schéma contrainte-déformation.

Dans le graphique ci-dessous, on voit la contrainte en compression à une température donnée et la déformation correspondante à l'état de contrainte. On peut distinguer deux zones, dans la première on atteint la résistance maximale et dans la deuxième zone la résistance diminue.

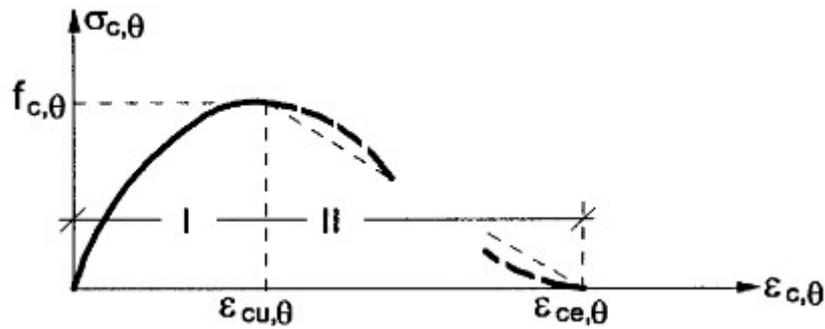


Figure 12. Contrainte de résistance à la compression du béton en fonction de la température

Sur le tableau ci-dessous on voit l'évolution du rapport de la résistance en compression du béton à 20 °C et à des températures plus élevées. On distingue deux types de béton, un de masse volumique courante (NC) et l'autre de masse volumique correspondant à un béton légère (LC). On voit aussi pour le béton courant, l'évolution du rapport des déformations.

Température du béton θ_c (°C)	$K_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_c}$		$\epsilon_{cu,\theta} \cdot 10^3$
	NC	LC	
20	1	1	2,5
100	1	1	4
200	0,95	1	5,5
300	0,85	1	7,0
400	0,75	0,88	10,0
500	0,60	0,76	15,0
600	0,45	0,64	25,0
700	0,30	0,52	25,0
800	0,15	0,40	25,0
900	0,08	0,28	25,0
1000	0,04	0,16	25,0
1100	0,01	0,04	25,0
1200	0	0	---

Tableau 2. Coefficient de réduction de la résistance du béton en fonction de la température

❖ Propriétés thermiques du béton

La dilatation thermique du béton $\frac{\Delta L}{L}$ peut être défini en deux rangs allant de 20 °C à 700 °C et de 700 °C à 1200 °C ci-dessous le graphique montrant son évolution, pour un béton de masse volumique courante (NC) et pour un béton léger (LC). Pour le béton léger, on peut utiliser la formule suivante :

$$\frac{\Delta L}{L} = 8 * 10^{-6} * (\theta_c - 20) \quad (1)$$

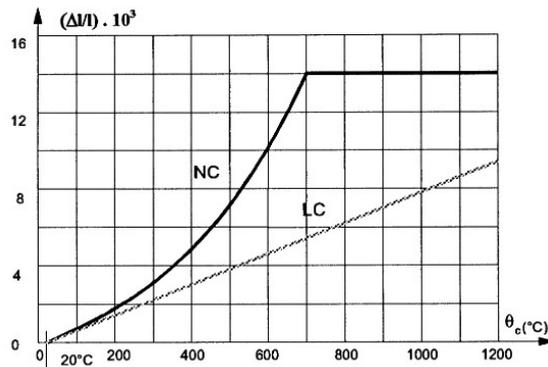


Figure 13. Allongement relatif pour un béton courant et un béton léger en fonction de la température

La chaleur spécifique C_c est définie en suivant quatre rangs de température allant de 20 °C à 100 °C, de 100 °C à 200 °C, de 200 °C à 400 °C et de 400 °C à 1200 °C. Dans un calcul simplifié, on peut considérer la valeur $C_c = 1000 \frac{J}{kgK}$. Ci-dessous, le graphique montrant son évolution pour un béton courant (NC) et un béton léger (LC). Pour le béton léger, on peut prendre $C_c = 840 \frac{J}{kgK}$.

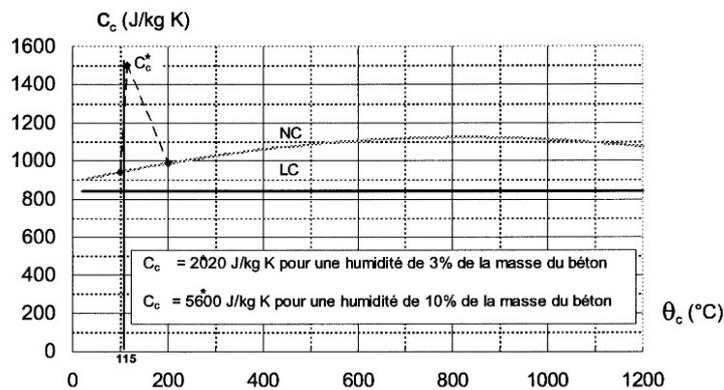


Figure 14. Chaleur spécifique pour un béton courant et un béton léger en fonction de la température

La conductivité thermique est définie pour le béton courant dans le rang de température de 20 °C à 1200 °C. Il est déterminé une limite supérieure et une limite inférieure. Pour un béton léger, cette propriété est définie dans les rangs de 20 °C à 800 °C et supérieurs à 800 °C. Le graphique ci-dessous montre son évolution pour les deux types de béton.

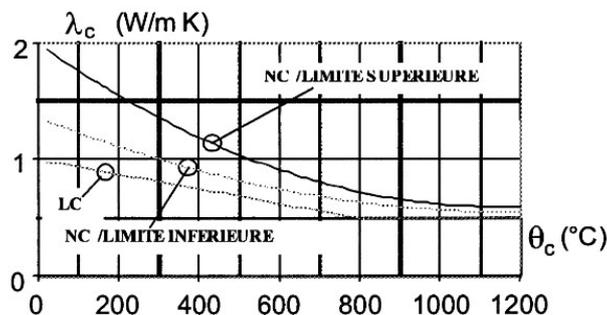


Figure 15. Conductivité thermique pour un béton courant et un béton léger en fonction de la température

3. Dalles mixtes

Dans une dalle mixte, pour considérer qu'elle travaille comme tel, il faut avoir une connexion efficace entre la plaque nervurée et le béton. Cette connexion doit être capable de transmettre l'effort de cisaillement dans la surface de contact avec le béton. Ainsi on peut trouver plusieurs méthodes de connexion telle comme ceux qui sont montrés dans les images ci-dessous.

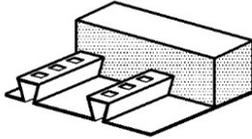


Figure 16. Liaison mécanique par indentations ou bossages

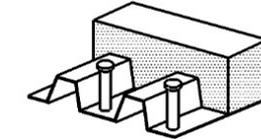
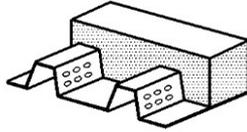


Figure 17. Liaison par ancrages d'extrémité soudés à travers la tôle

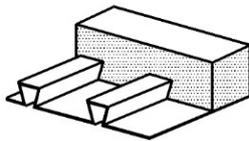


Figure 18. Ancrage par déformation de nervure à l'extrémité

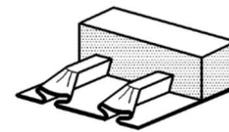
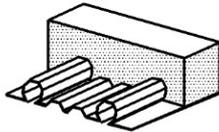


Figure 19. Ancrages par frottement

Il faut noter qu'on peut avoir une connexion totale ou partielle entre la plaque nervurée et le béton. Ainsi on considère qu'une travée de dalle présente une connexion totale si le fait d'augmenter la résistance dans le sens longitudinal de la connexion n'implique pas l'augmentation de la résistance en flexion de cette travée. [NF EN 1994-1-1, 2005]

❖ Dispositions constructives

D'abord, on peut noter qu'il y a deux principaux types de nervures utilisés dans les dalles mixtes. On a des nervures rentrantes et des nervures sortantes.

Dans les images ci-dessous on peut voir ces deux types de nervures avec ses caractéristiques géométriques.

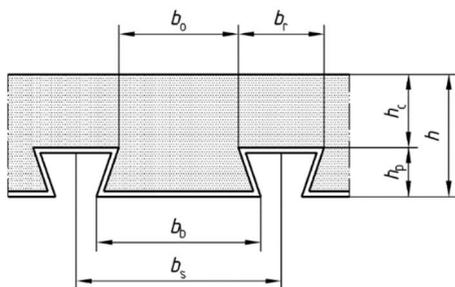


Figure 20. Nervures rentrantes

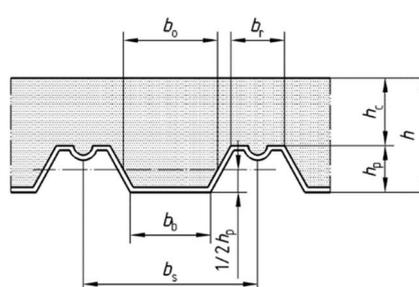


Figure 21. Nervures sortantes

Concernant les dispositions constructives il est conseillé que la hauteur h soit supérieure à 80 mm et la hauteur h_c soit supérieure à 40 millimètres.

Dans le cas d'une dalle mixte, fonctionnant ensemble avec une poutre mixte fonctionnant comme diaphragme, alors il convient d'augmenter les valeurs minimales d' h et h_c de 10 mm respectivement.

C'est nécessaire de mettre des armatures longitudinales et transversales dans l'épaisseur h_c de béton. Ces armatures doivent avoir un ratio d'acier d'au moins $80 \text{ mm}^2/\text{m}$ dans les deux sens et l'espacement ne doit pas être supérieur à 350 millimètres ou à 2 h. [NF EN 1994-1-2, 2006]

4. Types de feu

Ci-dessous, on détaille les caractéristiques des principaux types de feu.

4.1. Feu nominal

C'est un feu normalisé auquel est exposée la structure. Dans cette situation, la structure garantit certaines conditions, selon les spécifications, en même temps ou séparément.

- La condition de résistance (R) définit la fonction porteuse et établit que la structure ne doit pas atteindre la ruine avant un temps d'exposition au feu précisé.
- Les conditions d'étanchéité (E) et isolation (I) définissent la fonction séparative de la structure. Le critère d'isolation implique le fait que la face qui n'est pas exposée au feu n'atteigne pas une variation de sa température moyenne supérieure à 140 °Kelvin et que la température dans un point quelconque de cette surface n'atteigne pas une variation supérieure à 180 °Kelvin .
- La fonction porteuse et séparative peut être vérifiée si les trois conditions sont présentes.

On peut appliquer les mêmes critères pour les feux extérieurs ou les feux des hydrocarbures, mais en se référant à la courbe spécifique à ces cas. [STS 22-3, 2020]

4.2. Feu paramétrique

Dans un feu paramétrique, la fonction de résistance est accomplie lors que la structure n'atteint pas la ruine avant un temps d'exposition au feu prévu.

Concernant la fonction d'étanchéité par rapport à l'isolation, ce critère est vérifié lors qu'il est atteint la température maximale du gaz sur la face exposée au feu. Quand cette température maximale est atteinte, alors sur la face non exposée la variation moyenne de la température ne doit pas être supérieure à 140 °Kelvin et la variation de température maximale sur un point quelconque de cette face ne doit pas être supérieure à 240 °Kelvin . [STS 22-3, 2020]

4.3. Types de courbes température-temps

Dans le tableau 3, on montre l'équation des trois types de courbes définissant la température du feu au sein d'un compartiment :

Équations		
Courbe température-temps normalisé	Courbe de feu extérieur	Courbe d'hydrocarbure
$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$ $^{\circ}\text{C}$	$\theta_g = 600(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313^{-3,8t}) + 20$ $^{\circ}\text{C}$	$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675^{-2,5t}) + 20$ $^{\circ}\text{C}$
θ_g : Température du gaz du compartiment T : temps en minutes a_c : coefficient de transfert thermique par convection: $25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$		a_c : coefficient de transfert thermique par convection: $50 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$

Tableau 3. Différentes courbes modélisant un feu. [NF EN 1991-1-2, 2003]

4.4. Modèles de feu naturel

Dans le tableau 4, on répertorie les différents types de feu naturel et leurs modèles permettant leur étude.

Modèles de feu simplifiés		Modèles de feu avancés
Feux de compartiment	Feux localisés	
Détermination de la température en prenant en compte la densité de charge calorifique et les conditions de ventilation.	Pris en compte lorsque la propagation du feu est peu probable.	Prends en compte les données suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Les propriétés des gaz • L'échange de masse • L'échange d'énergie
a_c : coefficient de transfert thermique par convection: $35W/m^2K$		

Tableau 4. Différents modèles pour un feu naturel. [NF EN 1991-1-2, 2003]

Méthode de calcul

1. Calcul des dalles mixtes

Dans cette partie, on montre les principales vérifications à faire pour garantir que la dalle mixte a été bien dimensionnée.

❖ Actions et situations de calcul

Dans le tableau ci-dessous, on répertorie les principales actions qui agissent sur une dalle mixte :

Phase de construction	Phase mixte
<ul style="list-style-type: none"> • Poids propre de tôles nervurées • Poids du béton et les armatures • Surcharge de construction (peut être prise égale à 10% du poids du béton) • Charges de stockage s'il y a lieu 	<ul style="list-style-type: none"> • Poids propre de la dalle mixte • Surcharges permanentes • Surcharges variables • Surcharges accidentelles

Tableau 5. Charges à prendre en compte dans la phase de construction et la phase mixte.

Les charges de construction comprennent le poids du matériel du bétonnage, le poids des ouvriers et l'effet dynamique lors du coulage du béton.

❖ Modes de ruine

Le schéma suivant répertorie les trois principaux modes de ruines qui peuvent se produire dans une dalle mixte :

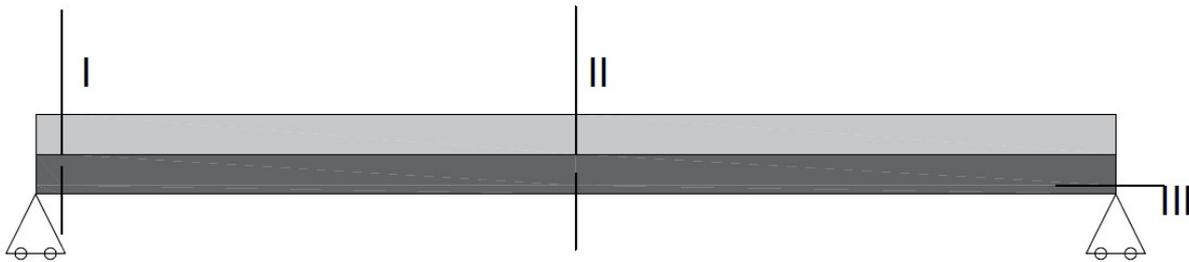


Figure 22. Zones présentant les différents modes de ruine

- Le mode de ruine par flexion se présente principalement dans des dalles avec une portée moyenne ou grande. Il faut aussi une résistance au cisaillement longitudinale assez bonne. Pour atteindre ce mode de ruine, le moment sollicitant de flexion doit être supérieur au moment plastique de résistance.
- Le deuxième mode de ruine, concernant le cisaillement longitudinal et atteint lors que la résistance de calcul dans l'interface de connexion entre le béton et la tôle est dépassée. Il faut calculer aussi la résistance au cisaillement transversale.
- Le troisième mode de ruine se présente, en général, dans les dalles à faible portée, dans ces cas, une grande épaisseur de la dalle est soumise à des charges importantes. Ce phénomène se développe généralement près des appuis.

2. Vérification à l'ELU

Dans cette partie, on détaille les principales vérifications à faire à l'ELU dans une dalle mixte.

2.1. Flexion

On peut réaliser un calcul plastique en prenant en compte les différents matériaux composant la section et bien sûr la plaque nervurée avec sa limite d'élasticité correspondante appelée $f_{yp,d}$

Une manière simplifiée d'obtenir les valeurs de z et M_{pr} est la suivante :

$$z = h - 0,5h_c - e_p + (e_p - e) \frac{N_{cf}}{A_{pe}f_{yp,d}} \quad (2)$$

$$M_{pr,d} = M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf}}{A_{pe}f_{yp,d}} \right) \leq M_{pa} \quad (3)$$

e_p : distance entre l'axe neutre plastique et la fibre inférieure ;

e : distance entre le centre de gravité et la fibre inférieure ;

A_{pe} : Aire effective de la plaque nervurée.

❖ Moment positif

Ci-dessous, on détaille le calcul du moment positif en considérant l'axe neutre au-dessus de la tôle métallique et dans la tôle métallique.

Axe neutre au-dessus de la tôle

On peut calculer le moment de flexion positif dont l'axe neutre se retrouve au-dessus de la plaque nervurée en suivant le diagramme de contraintes suivantes :

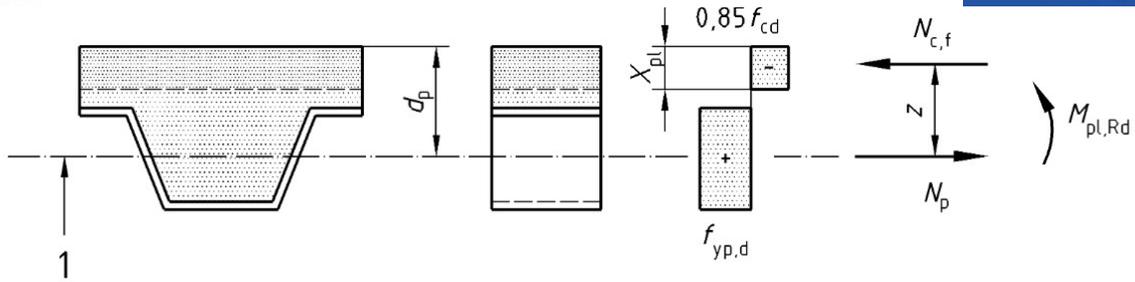


Figure 23. Diagramme de contraintes pour un moment positif avec axe neutre au-dessus de la nervure

$$x = \frac{A_p f_{yp,d}}{0,85 b f_{cd}} \quad (4)$$

$$z = d_p - \frac{x}{2} \quad (5)$$

$$M_{pl,Rd} = A_p f_{yp,d} z \quad (6)$$

A_p : aire de la section transversale de la tôle nervurée ;

$f_{yp,d}$: valeur de calcul de la limite élastique de la tôle nervurée ;

b : largeur unitaire de la tôle nervurée ;

d_p : distance entre la fibre supérieure et le centre de gravité de la tôle ;

x : hauteur de béton comprimée ;

z : bras de levier.

Axe neutre dans la tôle

Pour une section dont l'axe neutre se retrouve au niveau de la plaque d'acier nervurée, on peut calculer le moment de flexion positif avec le diagramme de contrainte suivant :

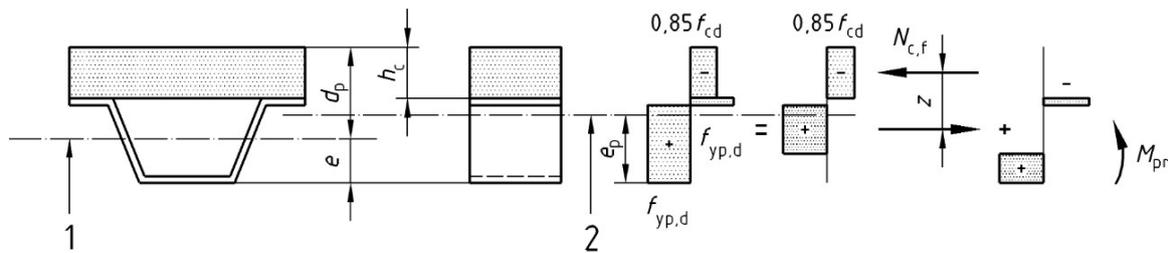


Figure 24. Diagramme de contraintes pour un moment positif avec axe neutre dans la nervure

$$z = h - \frac{h_c}{2} - e_p + (e_p - e) \frac{0,85 f_{cd} b h_c}{A_{pe} f_{yp,d}} \quad (7)$$

$$M_{pr} = 1,25 M_{pa} \left(1 - \frac{0,85 f_{cd} b h_c}{A_{pe} f_{yp,d}} \right) \leq M_{pa} \quad (8)$$

$$M_{pl,Rd} = 0,85 f_{cd} b h_c z + M_{pr} \quad (9)$$

A_{pe} : aire efficace de la section transversale de la tôle ;

e_p : distance entre la face inférieure de la tôle et la mi-hauteur de la même ;

e : distance entre la face inférieure de la tôle et le centre de gravité de la même ;

M_{pa} : moment résistant plastique de la section efficace de la tôle ;

M_{pr} : moment résistant plastique réduit en raison de l'effort axial N_c ,f.

❖ **Moment négatif**

Ci-dessous, on détaille le calcul du moment de flexion négatif selon le diagramme de contraintes suivante :

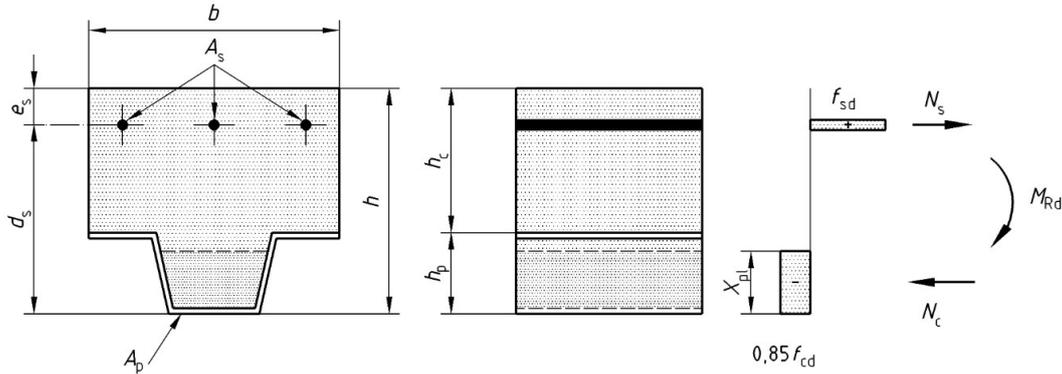


Figure 25. Diagramme de contraintes pour un moment négatif

$$x = \frac{A_s f_{s,d}}{0,85 f_{cd} b_c} \quad (10)$$

$$z = d_s - \frac{x}{2} \quad (11)$$

$$M_{pl,Rd} = A_s f_{s,d} z \quad (12)$$

2.2. Effort tranchant

On considère que l'effort tranchant est repris entièrement par le béton. On calcule la résistance à l'effort tranchant avec la formule suivante :

$$V_{Rd} = b_0 d_p v_{min} \quad (13)$$

$$v_{min} = 0,035 \left(1 + \sqrt{\frac{200^{\frac{3}{2}}}{d_p}} \right) \sqrt{f_{ck}} \quad (14)$$

d_p : distance entre la fibre supérieure comprimée et le centre de gravité de la tôle (limité à 200 mm) ;

d_s : distance entre la fibre inférieure de la tôle et le centre de gravité des armatures tendues ;

v_{min} et f_{ck} : en N/mm^2 .

Si la zone concernée est soumise à un moment négatif, alors il faut utiliser d_s au lieu de d_p .

2.3. Poinçonnement

Dans le cas, où l'on a une charge concentrée, alors on doit vérifier au poinçonnement. On considère que cette charge se propage à travers la dalle en suivant un angle de 45° . Ainsi on peut déterminer le périmètre critique avec la formule suivante :

$$c_p = 2\pi h_c + 2(b_p + 2h_f) + 2(a_p + 2h_f + 2d_p - 2h_c) \quad (15)$$

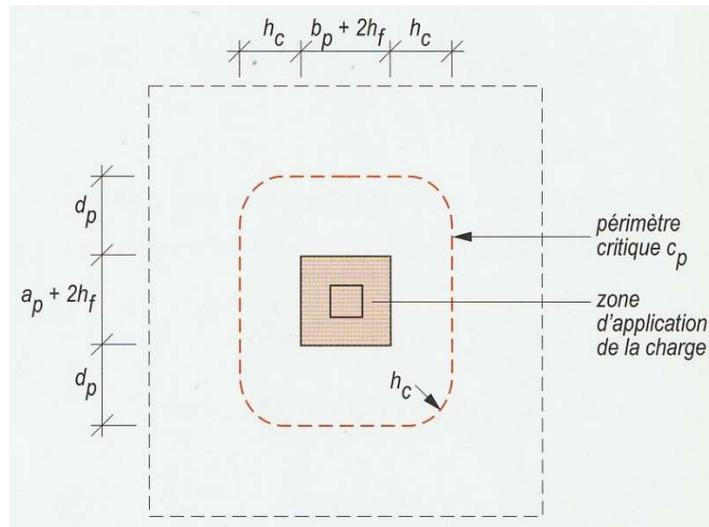


Figure 26. Périmètre critique sous une charge concentrée

En connaissant A_s/hc , alors les pourcentages d'armatures transversales ρ_x et longitudinales ρ_y sont déterminées par :

$$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} \leq 0,02 \quad (16)$$

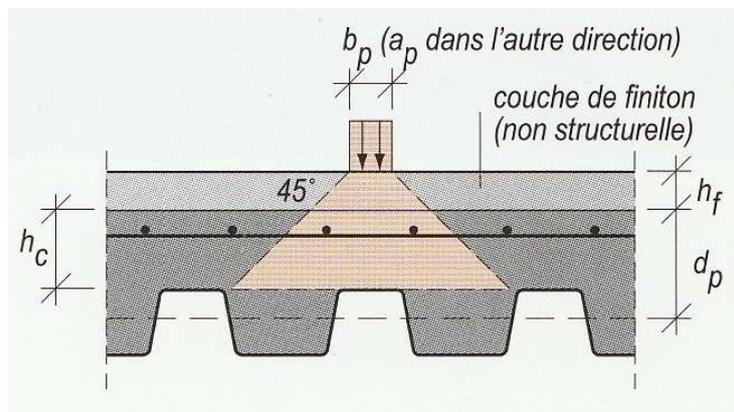


Figure 27. Coupe transversale montrant la diffusion de la charge concentrée

Ensuite, on détermine la valeur de calcul de l'effort tranchant par unité de longueur en suivant la formule :

$$V_{Rd} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \sqrt[3]{100 \rho f_{ck}} \geq v_{min} \quad (17)$$

Avec :

d : Moyenne des hauteurs utiles de la dalle par rapport aux deux directions d'armatures (max 200 mm) ;

γ_c : Coefficient de résistance du béton, égale à 1,5.

Donc finalement on obtient la résistance au poinçonnement par :

$$V_{p,Rd} = V_{Rd}c_p d \quad (18)$$

2.4. Cisaillement longitudinal

Sur cette partie on détaille la méthode m-k pour le calcul du cisaillement longitudinal entre la tôle métallique et le béton.

❖ Méthode m-k

Dans cette méthode, les facteurs m et k déterminent le comportement au cisaillement longitudinal de la dalle mixte. Ces facteurs sont fournis par les fabricants et sont obtenus grâce à des essais d'au moins 6 éprouvettes. On réalise 3 essais dans la zone A à faible longueur de cisaillement et 3 dans la zone B à grandes longueurs de cisaillement. Ensuite, on trace une droite passant pour les valeurs minimales des deux zones d'essais.

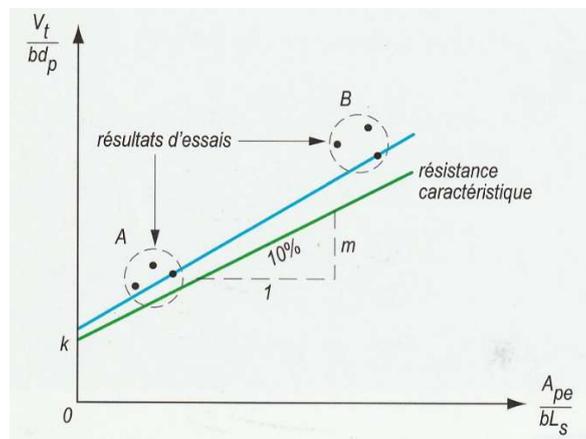


Figure 28. Graphique montrant les différents essais et la droite m-k

La résistance au cisaillement longitudinal limite l'effort tranchant à :

$$V_{I,Rd} = \frac{bd_p \left(m \frac{A_{pe}}{bL_s} + K \right)}{\gamma_{vs}} \quad (19)$$

L_s : portée de cisaillement en mm ;

γ_{vs} : facteur de sécurité pour la connexion à l'ELU= 1,25.

La résistance de calcul du moment de flexion est donnée par

$$M_I = V_{I,Rd} L_s = \frac{bd_p}{\gamma_{vs}} \left(m \frac{A_{pe}}{b} + k L_s \right) = \frac{1}{\gamma_{vs}} (m d_p A_{pe} + K b d_p L_s) \quad (20)$$

3. Calcul des planchers mixtes exposés au feu

Dans cette section, on va détailler une méthode de calcul simplifié pour l'évaluation de la résistance des planchers mixtes exposés au feu.

❖ Valeurs de calcul

Les valeurs concernant les résistances et déformations pour les matériaux définis peuvent être prises comme suit :

$$X_{fi,d} = K_{\theta} \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (21)$$

X_k : représente les résistances caractéristiques en déformation d'un matériau à une température de 20 °C ;

K_{θ} : facteur de réduction d'une propriété du matériau exposé au feu par rapport à sa température.

Concernant les coefficients partiels en situation d'incendie les valeurs à utiliser sont : $\gamma_{M,fa} = 1$, $\gamma_{M,fs} = 1$, $\gamma_{M,fc} = 1$ et $\gamma_{M,fv} = 1$.

3.1. Combinaison d'actions accidentelles

La combinaison de charges en situation accidentelle d'incendie se fait selon :

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (22)$$

Les coefficients $\psi_{1,1}$ et $\psi_{2,1}$ sont choisis en fonction de la situation accidentelle correspondante. A_d représente aussi l'action thermique indirecte due à l'incendie. [NF EN 1990, 2003]

Situation du projet	Action permanente		Action accidentelle	Action variable d'accompagnement	
	Favorable	Défavorable		Principal	Autres
Accidentelle	$G_{k,sup}$	$G_{k,inf}$	A_d	$\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

Tableau 6. Combinaison d'actions accidentelle.

3.2. Dalles mixtes non protégées

Cette méthode s'applique au calcul des dalles mixtes exposées à un feu normalisé, la dalle est composée des tôles nervurées avec ou sans armature de renfort. La dalle peut être simplement appuyée ou continue.

Ici, on traite les dalles exposées au feu sans aucune protection. L'effet de l'empêchement de la dilatation dans l'axe de la dalle n'est pas considéré dans le calcul de la résistance de cette méthode.

Dans cette méthode, il est possible d'établir deux critères de calcul de résistance au feu. Un concernant l'isolation thermique et un autre considérant la résistance mécanique et la résistance aux moments négatifs et positifs. La dalle mixte doit tenir au moins 30 minutes. Dans l'image ci-dessous on peut voir deux types de dalles mixtes.

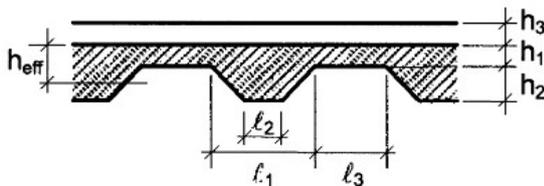


Figure 30. Dalle mixte avec plaques trapézoïdales en acier

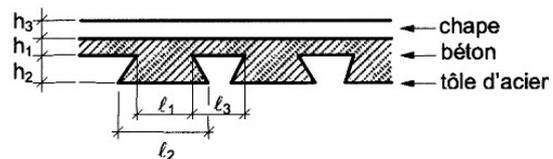


Figure 29. Dalle mixte avec plaques rentrant en acier

3.3. Dalles mixtes avec protection contre le feu

Il est possible de mettre en place des mécanismes permettant de protéger la tôle en acier, et ainsi empêcher la diffusion de la chaleur vers la dalle et donc améliorer la résistance de l'ensemble.

Le système d'isolation thermique mis en place définit une épaisseur de béton équivalent qui nous permettra de vérifier le critère thermique.

Le critère mécanique sera vérifié si la température de la plaque nervurée ne dépasse pas les 350 °C. La dalle mixte doit tenir 30 minutes.

4. Calcul d'une dalle mixte non protégée exposée à un feu

Pour une dalle mixte nervurée, le temps de résistance à un feu normalise en fonction de l'isolation thermique peut-être déterminée avec la formule suivante :

$$t_i = a_0 + a_1 + h_1 + a_2 \varphi + a_3 \frac{A}{L_r} + a_4 \frac{1}{l_3} + a_5 \frac{A}{L_r l_3} \quad (23)$$

t_i : résistance en minutes par rapport à l'isolation thermique ;

A : volume de la section de la nervure par mètre linéaire ;

L_r : aire exposée de la nervure par mètre linéaire ;

l_3 : largeur de la semelle supérieure.

Dans le graphique ci-dessous on peut voir les différents paramètres géométriques qui interviennent dans les calculs.

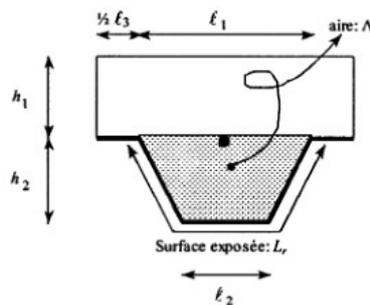


Figure 31. Section type d'une dalle mixte

La détermination du rapport $\frac{A}{L_r}$ Est obtenue directement de la géométrie de la coupe ci-dessus.

$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \right)}{l_2 + 2 * \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2}} \quad (24)$$

Les coefficients peuvent être obtenues du tableau suivant en fonction du type de béton utilisé.

	a_0 (min)	a_1 (min /mm)	a_2 (min)	a_3 (min /mm)	a_4 (mm min)	a_5 (min)
Béton de masse volumique normale	-28,8	1,55	-12,6	0,33	-735	48
Béton léger	-79,2	2,18	-2,44	0,56	-542	52,3

Tableau 7. Coefficients ai de l'équation du temps de résistance au feu d'une dalle mixte

La formule de la configuration de la semelle supérieure définit par le paramètre φ peut être obtenue à partir de :

$$\varphi = \frac{\left(\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)^2} \right)}{l_3} \quad (25)$$

4.1. Calcul du moment résistant positif

La température de la semelle inférieure, ou de la semelle supérieure ou de l'âme de la plaque nervure peut-être donnée par la formule suivante :

$$\theta_a = b_0 + b_1 \frac{1}{l_3} + b_2 \frac{A}{L_r} + b_3 \varphi + b_4 \varphi^2 \quad (26)$$

Les coefficients de cette formule peuvent être obtenus à partir du tableau suivant où l'on peut choisir en fonction du temps de tenue au feu, du type de béton et de la position dans la plaque nervurée.

Béton	Résistance au feu (min)	Plaque nervurée en acier	b_0 (°C)	b_1 (°C) mm	b_2 (°C) mm	b_3 (°C)	b_4 (°C)
Béton de masse volumique normale	60	Semelle inf.	951	-1197	-2,32	86,4	-150,7
		Âme	661	-833	-2,96	537,7	-351,9
		Semelle sup.	340	-3269	-2,62	1148,4	-679,8
	90	Semelle inf.	1018	-839	-1,55	65,1	-108,1
		Âme	816	-959	-2,21	464,9	-340,2
		Semelle sup.	618	-2786	-1,79	767,9	-472,0
	120	Semelle inf.	1063	-679	-1,13	46,7	-82,8
		Âme	925	-949	-1,82	344,2	-267,4
		Semelle sup.	770	-2460	-1,67	592,6	-379,0
Béton léger	30	Semelle inf.	800	-1326	-2,65	114,5	-181,2
		Âme	483	-286	-2,26	439,6	-244,0
		Semelle sup.	331	-2284	-1,54	488,8	-131,7
	60	Semelle inf.	955	-622	-1,32	47,7	-81,1
		Âme	761	-558	-1,67	426,5	-303,0
		Semelle sup.	607	-2261	-1,02	664,5	-410,0
	90	Semelle inf.	1019	-478	-0,91	32,7	-60,8
		Âme	906	-654	-1,36	287,8	-230,3
		Semelle sup.	789	-1847	-0,99	469,5	-313,0
	120	Semelle inf.	1062	-399	-0,65	19,8	-43,7
		Âme	989	-629	-1,07	186,1	-152,6
		Semelle sup.	903	-1561	-0,92	305,2	-197,2

Tableau 8. Coefficients b (i) pour l'équation de la température de la plaque nervurée

La température θ_s des barres d'acier supplémentaire dans la dalle peut être obtenue avec la formule suivante.

$$\theta_s = c_0 + \left(c_1 \frac{u_3}{h_2} \right) + (c_2 z) + \left(c_3 \frac{A}{L_r} \right) + (c_4 \alpha) + \left(c_5 \frac{1}{l_3} \right) \quad (27)$$

$$z = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} \quad (28)$$

Les différents paramètres géométriques peuvent être identifiés dans le schéma suivant :

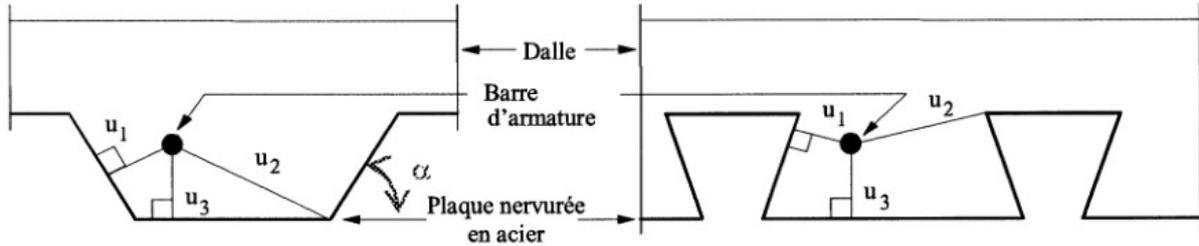


Figure 32. Schéma montrant les paramètres géométriques pour déterminer la température des aciers supplémentaires

Les coefficients c_i de la formule, peuvent être obtenues à partir du tableau ci-dessous :

Béton	Résistance au feu (min)	c_0 (°C)	c_1 (°C)	c_2 (°C).mm ^{0,5}	c_3 (°C)mm	c_4 (°C/°)	c_0 (°C)mm
Béton de masse volumique normale	60	1191	-250	-240	-5,01	1,04	-925
	90	1342	-256	-235	-5,30	1,39	-1267
	120	1387	-238	-222	-4,79	1,68	-1326
Béton léger	30	809	-135	-243	-0,70	0,48	-315
	60	1336	-242	-292	-6,11	1,63	-900
	90	1381	-240	-269	-5,46	2,24	-918
	120	1397	-230	-253	-4,44	2,47	-906

Tableau 9. Coefficients c_i pour l'équation de la température des aciers supplémentaires

4.2. Calcul du moment résistant négatif

L'apport à la résistance de la plaque nervurée peut être négligé face à un moment négatif qui générera des efforts de compression sur la fibre inférieure de la dalle, donc sur la plaque nervurée. Le calcul est fait pour une section réduite et jusqu'à une température limite maximale.

Les sections sont dimensionnées par rapport à l'isotherme correspondant à une température limite. Pour tracer ces isothermes, on considère 4 points.

Le point I se situe dans l'axe de la nervure, à une distance de la semelle inférieure déterminée en fonction de la température limite.

Le point IV se situe dans l'axe de deux nervures à une hauteur qui est en corrélation avec la température limite.

Le point II se situe dans une ligne qui passe par le point I et qui est parallèle à la semelle inférieure. Ce point se situe à une distance de la semelle inférieure égale à la distance de l'âme de la plaque nervurée.

Le point III se situe dans une ligne qui passe par la semelle supérieure de la nervure et une distance de l'âme de la nervure égale à la distance du point IV à la semelle supérieur.

Dans la figure ci-dessous on peut voir les différentes isothermes pour une section transversale.

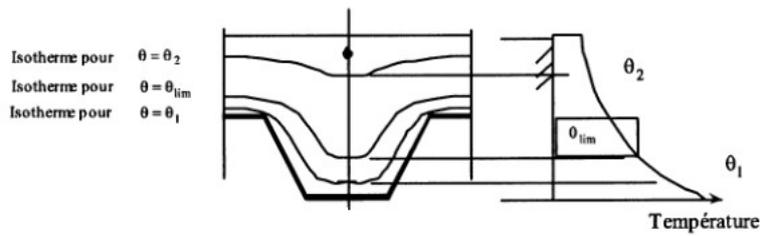


Figure 33. Isothermes pour une section type d'une dalle mixte

Dans la figure ci-dessous on peut voir l'établissement de l'isotherme correspondant à la température limite.

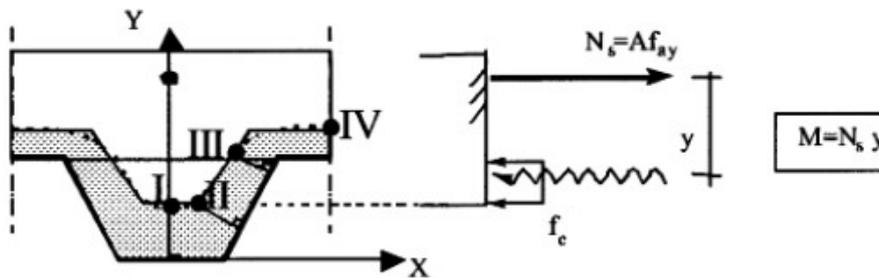


Figure 34. Schéma montrant le tracé de l'isotherme correspondant à la température limite

La température limite peut être obtenue par la formule suivante :

$$\theta_{lim} = d_0 + d_1 N_s + d_2 \frac{A}{L_r} + d_3 \varphi + d_4 \frac{1}{l_3} \quad (29)$$

N_s : effort normal exercé dans la barre d'armature

Les coefficients de l'équation peuvent être obtenus à partir du tableau suivant :

Béton	Résistance au feu (min)	d_0 (°C)	d_1 (°C).N	d_2 (°C).mm	d_3 (°C)	d_4 (°C).mm
Béton de masse volumique normale	60	867	$-1,9 \cdot 10^{-4}$	-8,75	-123	-1378
	90	1055	$-2,2 \cdot 10^{-4}$	-9,91	-154	-1990
	120	1144	$-2,2 \cdot 10^{-4}$	-9,71	-166	-2155
Béton léger	30	524	$-1,6 \cdot 10^{-4}$	-3,43	-80	-392
	60	1030	$-2,6 \cdot 10^{-4}$	-10,95	-181	-1834
	90	1159	$-2,5 \cdot 10^{-4}$	-10,88	-208	-2233
	120	1213	$-2,5 \cdot 10^{-4}$	-10,09	-214	-2320

Tableau 10. Coefficients d (i) pour l'équation de la température limite

Pour déterminer les coordonnées, on peut utiliser les formules suivantes :

Points	
X	Y
$X_I = 0$ (30)	$Y_I = Y_{II} = \frac{1}{\left(\frac{1}{z} - \frac{4}{\sqrt{l_1 + l_3}}\right)^2}$ (31)
$X_{II} = \frac{1}{2}l_2 + \frac{Y_I}{\sin\alpha}(\cos\alpha - 1)$ (32)	$Y_{III} = h_2$ (33)
$X_{III} = \frac{1}{2}l_1 - \frac{b}{\sin\alpha}$ (34)	$Y_{IV} = h_2 + b$ (35)
$X_{IV} = \frac{1}{2}l_1 + \frac{1}{2}l_3$ (36)	
$\alpha = \arctan\left(\frac{2h_2}{l_1 - l_2}\right)$ (37)	
$a = \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{\sqrt{h_2}}\right)^2 l_1 \sin\alpha$ (38)	
$c = -8(1 + \sqrt{1+a})$ si $a \geq 8$ (39)	
$c = 8(1 + \sqrt{1+a})$ si $a < 8$ (40)	

Tableau 11. Tableau montrant le calcul des points permettant de tracer l'isotherme.

Le paramètre z peut être obtenu à partir de l'équation de la température de la barre d'armature. Pour cela, on suppose la valeur $\frac{u_3}{h_2} = 0,75$ et en utilisant la température limite $\theta_s = \theta_{lim}$

Si Y_I supérieur à h_2 Alors on peut utiliser le tableau suivant pour obtenir l'évolution de la température pour une dalle de 100 mm d'épaisseur.

Haut. x mm	Température θ_c [°C] après une durée d'exp. au feu en min. de					
	30'	60'	90'	120'	180'	240'
5	535	705				
10	470	642	738			
15	415	581	681	754		
20	350	525	627	697		
25	300	469	571	642	738	
30	250	421	519	591	689	740
35	210	374	473	542	635	700
40	180	327	428	493	590	670
45	160	289	387	454	549	645
50	140	250	345	415	508	550
55	125	200	294	369	469	520
60	110	175	271	342	430	495
80	80	140	220	270	330	395
100	60	100	160	210	260	305

1 - Face inférieure de la dalle exposée au feu

Tableau 12. Tableau de valeur tabulé pour le tracé de l'isotherme de la température limite

❖ Épaisseur efficace d'une dalle mixte

Ci-dessous, on montre le calcul de la hauteur efficace d'une dalle mixte. Le critère d'isolation I est déterminé en déduisant la hauteur efficace de l'épaisseur de béton équivalent avec le système de protection.

$$h_{eff} = h_1 + 0,5h_2 \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \text{ pour } \frac{h_2}{h_1} \leq 1,5 \text{ et } h_1 > 40 \text{ mm} \quad (41)$$

$$h_{eff} = h_1 \left[1 + 0,75 \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \right] \text{ our } \frac{h_2}{h_1} > 1,5 \text{ et } h_1 > 40 \text{ mm} \quad (42)$$

Dans le tableau suivant, on peut voir la résistance au feu normalisé en fonction de la hauteur effective du plancher. Où h_3 représente la hauteur de la Chappe s'il y en a.

4.3. Détermination des moments résistants

Dans les dalles mixtes, l'axe neutre plastique peut être déduit de la formule suivante :

$$\sum_{i=1}^n A_i K_{y,\theta,i} \frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} + \alpha_{dalle} \sum_{j=1}^m A_j K_{c,\theta,j} * \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) = 0 \quad (43)$$

$\alpha_{dalle} = 0,85$: coefficient prenant en compte du bloc de contrainte rectangulaire dans le calcul des dalles ;

$f_{y,i}$: limite d'élasticité nominale de l'acier pour l'élément A_i ;

$f_{c,j}$: résistance de calcul de compression du béton pour l'élément A_i ;

$K_{y,\theta,i}$, $K_{c,\theta,j}$: coefficient reliant les résistances de l'acier et du béton à une température donné par rapport à leur résistance à 20 °C.

Pour le calcul du moment résistance, on peut utiliser :

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i K_{y,\theta,i} \frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi}} + \alpha_{dalle} \sum_{j=1}^m A_j z_j K_{c,\theta,j} * \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad (44)$$

Avec :

z_i , z_j : distances entre l'axe neutre plastique et le centre de gravité de l'élément A_i ou A_j .

Exemples d'application

Sur cette partie, il est présenté le calcul de la résistance au feu pour deux configurations mécaniques de dalles mixtes, l'une est simplement appuyée et l'autre est continue. On vérifiera si ces dalles vérifient l'exigence de résistance au feu pendant 60 minutes.

1. Calcul d'une dalle simplement appuyée

On a une dalle mixte acier-béton nervuré qui est simplement appuyée, avec une portée de 3 m. On a une charge permanente $g_k = 3,5 \text{ KN/m}^2$ et une charge variable $q_k = 4 \text{ KN/m}^2$ avec $\psi_0 = 0,5$. Le béton utilisé est un C 25/30 avec une résistance de 25 MPa. Les barres d'armature sont disposées en raison de 1 $\Phi 8$ par nervure avec une résistance $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$. La tôle nervurée en acier présente une nuance S235 et une épaisseur de 1 millimètre. [MAQ, 2011]

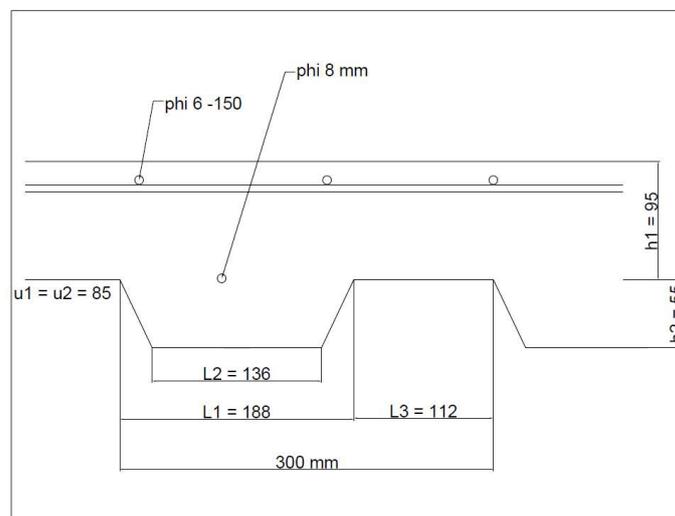


Figure 35. Schéma montrant les dimensions et caractéristiques de la dalle mixte simplement appuyée

Pour voir le détail de calcul concernant ce plancher simplement appuyé, se référer à l'annexe 1.

1.1. Critère d'isolation thermique

La résistance au feu d'une dalle mixte nervuré dépend principalement de la largeur des nervures et du facteur géométrique A/L_r .

Facteur de vue	Facteur géométrique	
Φ	A	L_r
0,78	8910 mm²	258 mm

Tableau 13. Valeur de calcul du facteur de vue et du facteur géométrique.

En prenant en compte les valeurs du tableau 12 on obtient une résistance au feu relatif à l'étanchéité égale à : $t = 128$ minutes.

Ces résultats montrent que l'isolation thermique est garantie pour cette configuration de plancher. À l'instant $t = 60$ minutes, qui est le temps de résistance au feu sollicité, la température dans la face du plancher non exposé au feu sera inférieure à la température maximale permise selon la norme.

1.2. Critère de résistance mécanique

Après combinaison de charges en situation d'incendie on obtient une charge égale à $q_{fi,d} = 5,5 \frac{KN}{m^2}$ et un moment sollicitant égal à $M_{fi,Ed} = 6,2 \text{ KNm}$.

La température dans la tôle est calculée en considérant un angle α d'inclinaison de l'âme de $64,7^\circ$. Ensuite à l'aide du tableau qui répertorie le facteur de réduction $K_{y,\theta}$ on peut déterminer la limite élastique à des températures élevées comme suit :

Facteurs de réduction de résistance				
	Semelle inférieure	Semelle supérieure	Âme	Barres d'armatures
θ	835 °C	703 °C	756 °C	145 °C
$K_{y,\theta}$	0,099	0,238	0,167	1
Avec $\rightarrow z = 2,84$				

Tableau 14. Facteurs de réduction de résistance mécanique en fonction de la température de l'élément.

En prenant en compte les facteurs de réduction de différents éléments repères dans le tableau ci-dessus, on peut déterminer la résistance en traction de la nervure et finalement calculer le moment résistant.

Force de traction dans les aciers	Bras de levier
131,4 KN/m	99,7 mm
Moment résistant	Moment sollicitant
13,1 $\frac{KNm}{m}$	6,2 $\frac{KNm}{m}$

Tableau 15. Comparaisons des valeurs du moment de résistance et de sollicitation.

Donc la dalle mixte traitée ici satisfait aussi le critère de résistance mécanique pour une exposition au feu de 60 minutes.

2. Calcul d'une dalle continue

On considère les mêmes caractéristiques que celles prises pour la dalle simplement appuyée de l'exemple antérieur. Ainsi dans cet exemple d'application la dalle comporte des barres d'armature dans les appuis intermédiaires constitués de treillis $\Phi 6 - 150$ avec $f_{y,k} = 500 \text{ MPa}$. La dalle n'est pas munie d'armatures sur travée, il y a que la tôle qui tient en traction à cet endroit. La distance des armatures sur appuis jusqu'à la face supérieure de la dalle est de 18 mm [MAQ, 2011].

Ici, on cherchera aussi à vérifier la résistance de la dalle pendant 60 minutes d'exposition au feu, on vérifiera sa résistance en travée et en extrémité de la dalle.

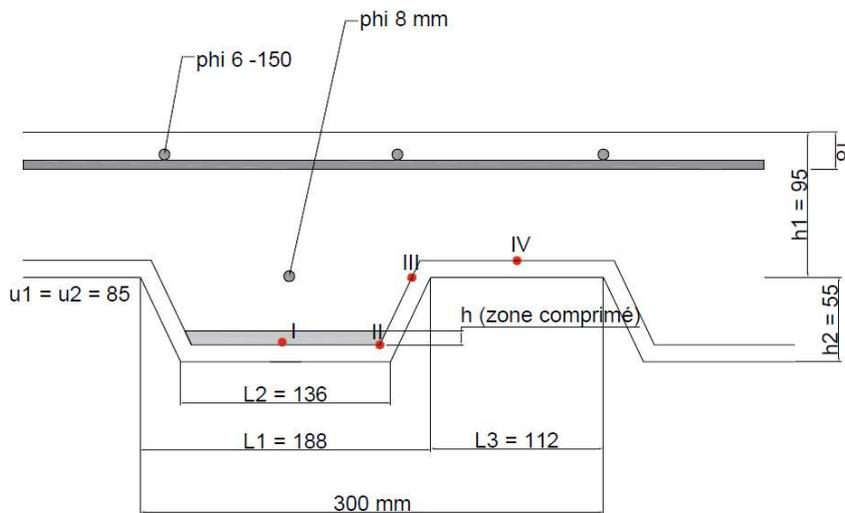


Figure 36. Schéma montrant les dimensions et caractéristiques de la dalle mixte continue

Avec :

$$\begin{aligned} X_I &= 0 \text{ mm} & Y_I &= 10 \text{ mm} \\ X_{II} &= 61,7 \text{ mm} & Y_{II} &= 10 \text{ mm} \\ X_{III} &= 84 \text{ mm} & Y_{III} &= 55 \text{ mm} \\ X_{IV} &= 150 \text{ mm} & Y_{IV} &= 64 \text{ mm} \end{aligned}$$

Pour voir le détail de calcul concernant ce plancher continu, se référer à l'annexe 2.

2.1. Procédure de calcul

D'abord, on va analyser une section intermédiaire dans la dalle continue. On évaluera le moment résistant négatif sur appui.

Le moment résistant dans l'appui intermédiaire est calculé d'abord en calculant la température limite $\theta_{lim.}$ ensuite, on aura besoin de calculer l'effort de traction dans les armatures supérieures aussi.

Facteur de vue	Facteur géométrique		Résistance en traction
Φ	A	L_r	N_s
0,78	8910 mm ²	258 mm	28274 N
Température limite			
$\theta_{lim.} = 451 \text{ } ^\circ\text{C}$			

Tableau 16. Valeur de calcul de la température limite.

En sachant que le calcul est réalisé dans ce cas pour une section réduite, c'est précisément cette température limite que va définir une isotherme dans la section de la nervure. La partie en dessous de l'isotherme est négligée. Les points permettant de tracer l'isotherme sont obtenus en considérant les valeurs $\frac{u_3}{h_2} = 0,75$ et $\theta_{lim.} = \theta_s$.

X	Y
$X_I = 0 \text{ mm}$	$Y_I = 10 \text{ mm}$
$X_{II} = 61,7 \text{ mm}$	$Y_{II} = 10 \text{ mm}$
$X_{III} = 84 \text{ mm}$	$Y_{III} = 55 \text{ mm}$
$X_{IV} = 150 \text{ mm}$	$Y_{IV} = 64 \text{ mm}$

Tableau 17. Point permettant de tracer l'isotherme.

Hauteur de béton comprimé	Bras de levier
$x = 10,3 \text{ mm}$	$z = 116,9 \text{ mm}$
Moment résistant	
$M_{fi,Rd}^- = 11 \frac{\text{KN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$	

Tableau 18. Valeur de calcul du moment résistant négatif.

La somme des moments sollicitant à la même valeur que celle de l'exemple précède, c'est égal à $M_{fi,Ed} = 6,2 \text{ KN} \cdot \text{m}$.

En travée intermédiaire, la résistance est satisfaite, car le moment résistant sur appui est supérieur à la différence entre le moment résistant sur appui et le moment sollicitant sur travée intermédiaire, on peut voir ça dans le fait que le moment négatif sollicitant en travée intermédiaire c'est inférieur à celui sur appui.

À continuation, on analyse la travée de rive. On évaluera le moment résistant positif. Il faut noter qu'il n'y a pas d'armatures inférieures, alors on a seulement la participation de la tôle métallique à la résistance. Donc le moment en travée sans armature donne :

Force de traction dans les aciers	Bras de levier
$F = 47,3 \text{ KN/m}$	$z = 115,3 \text{ mm}$
Moment résistant	
$M_{fi,Rd}^+ = 5,5 \frac{\text{KNm}}{\text{m}}$	

Tableau 19. Valeur de calcul du moment résistant positif.

À cause de l'incendie, le plancher peut fléchir assez vite, la déformation thermique joue un rôle principal dans ce processus. Donc c'est dans les appuis intermédiaires où l'on attendra la résistance limite en premier.

Ensuite concernant la travée de rive la sollicitation maximale se situe à une distance de $0,4L$ à partir de l'appui de rive. Dans notre cas, la somme de moments résistants en travée de rive dans l'endroit le plus sollicité c'est $0,4 \cdot 11 + 5,5 + 9,9 \text{ KNm/m}$, ce qui est supérieur à la somme du moment sollicitant à cet endroit qui est égale à $6,2 \text{ KNm/m}$.

3. Autres configurations de dalle mixte

Les graphiques ci-dessous ont été déterminés par des calculs prenant en compte la théorie des petits déplacements.

Dans la figure 37, on voit l'évolution du temps de résistance d'une dalle sur une seule travée, en fonction du niveau de chargement et des différentes épaisseurs des tôles métalliques utilisées. Il faut préciser aussi qu'il n'y a pas des aciers de renfort.

C'est qu'on note d'abord, c'est qu'il n'y a pas de différence par rapport au temps de résistance au feu pour des chargements inférieurs à 5 KN/m^2 . Ensuite pour des chargements plus élevés, on observe un temps de résistance au feu décroissant pour les planchers à tôles métalliques de $1,2 \text{ mm}$, 1 mm et $0,8 \text{ mm}$ respectivement.

Maintenant si l'on compare ce cas par rapport au premier exemple traité sur la partie III, on observe qu'on n'atteint pas le temps de résistance au feu de 60 minutes souhaité. En effet, pour un plancher à une seule travée, avec une dalle mixte de 150 mm d'épaisseur, une tôle métallique de 1 mm

d'épaisseur et un chargement uniforme de 5,5 kN/m² on atteint approximativement 53 minutes de résistance au feu.

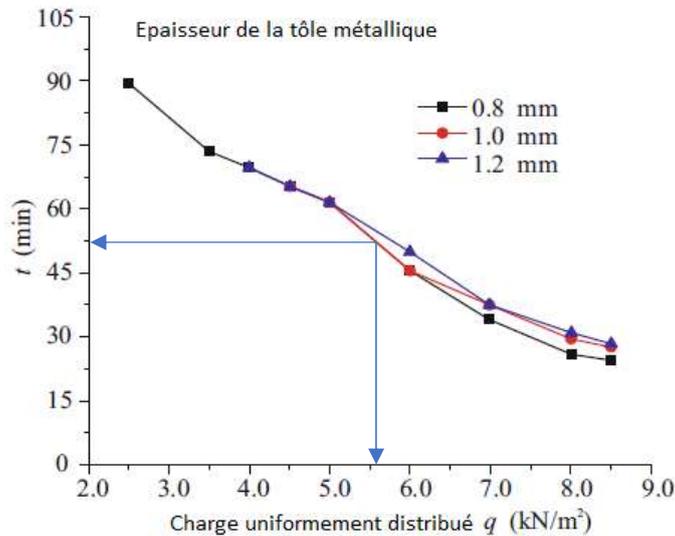


Figure 37. Temps de résistance au feu pour dalles sans acier de renfort.

Dans la figure 38, on peut observer le temps de résistance au feu de plusieurs configurations de dalles mixtes. Le type de dalle évalué a une épaisseur de 150 mm et est continu sur deux travées.

Sur le graphique, on voit le temps de résistance en fonction du niveau de chargement et le type de renforcement utilisé. Cet exemple nous permet d'avoir une vision globale de la résistance au feu des planchers mixtes en fonction du rajout des chargements.

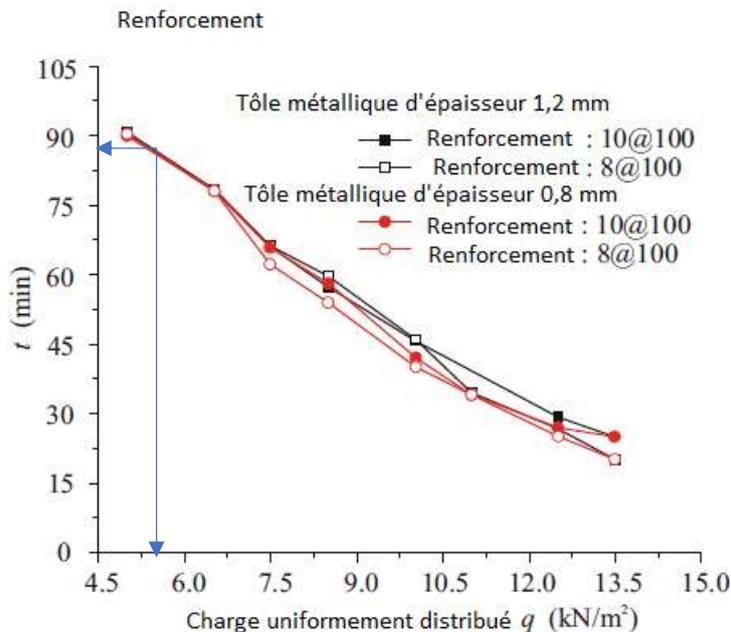


Figure 38. Temps de résistance au feu pour différentes configurations de dalles.

Ainsi d'après les données fournies sur la figure 38 on peut comparer les résistances au feu, pour les différentes configurations des planchers mixtes proposés ici et le plancher traité dans le premier ou deuxième exemple traité au début de la partie III.

Si l'on évalue la résistance des différentes configurations de plancher proposées dans la figure 38 en considérant le même chargement utilisé dans les deux premiers exemples au début de la partie III (5,5 KN/m²), alors on peut voir que les configurations proposées ici vérifient aussi la résistance à 60 minutes.

D'après la figure 38, on peut noter que plus les chargements sont élevés, plus l'influence de l'exposition au feu est importante sur les aciers de renfort. On observe aussi une évolution presque linéaire du temps de résistance au feu par rapport au niveau de chargement mis en place, cela se répète pour les quatre configurations de renfort de dalle mixte proposé dans la figure 38.

4. Effet membrane dans une dalle de béton armé

La théorie des lignes de rupture de Johansen [SZI, 1974] a été toujours considérée comme une des meilleures méthodes de prédiction de la charge ultime pour le béton armé. Cependant quand cette théorie a été utilisée pour le design des planchers avec le déplacement latéral bloqué, la valeur réelle a été considérablement plus grande que la valeur calculée à cause de l'effet membrane de compression [OUI, 1983].

Il a été réalisé un grand nombre d'essais qui ont permis d'obtenir des résultats très divers. Basé dans la présomption de la résistance ultime en flexion atteinte lors de l'obtention d'une flèche équivalente à la moitié de l'épaisseur de la dalle, PARK et GAMBLE [PAR, 1980] proposent une méthode de calcul de la charge ultime que cependant n'été pas très exact lors de la prédiction des résultats dans des essais, cela à cause du fait que la charge ultime de flexion dépend aussi d'autres paramètres.

RANKIN et LONG [RAN, 1997] ont présenté une nouvelle méthode qui prend en compte la charge de retenue latérale en plus de la charge de flexion et la charge supplémentaire en arc à trois articulations. Dans leur méthode, ils ont employé en plus, deux variables qui permettaient de créer une relation entre l'arc de charge supplémentaire et la flèche au milieu. Par exemple, dans le cas des fibres en plastique, utilisées en dalles renforcées, cette méthode donnait une prédiction de la charge ultime assez proche des tests.

Dans son travail [WAN, 2011] propose une méthode pour le calcul de la charge ultime basé dans la théorie des lignes de rupture dans des planchers renforcés, il considère aussi l'effet membrane de compression à l'état ultime et les assumptions de l'arc à trois articulations. Ainsi, il a réalisé des essais permettant d'évaluer la précision de sa méthode et l'influence de certains paramètres dans la résistance à la flexion des planchers.

4.1. Principe de la méthode

Comme on peut voir dans la figure 39, l'action de traction au milieu du plancher est contraire à la réaction dans les appuis. En considérant un plancher avec les déplacements horizontaux bloqués, la charge répartie sur le plancher génère des efforts de compression aux extrémités, ces efforts de compression permettent la formation d'un arc de charges supplémentaires à trois articulations. La formation de cet arc de charges rajoute au plancher une résistance supplémentaire avant d'atteindre la charge ultime.

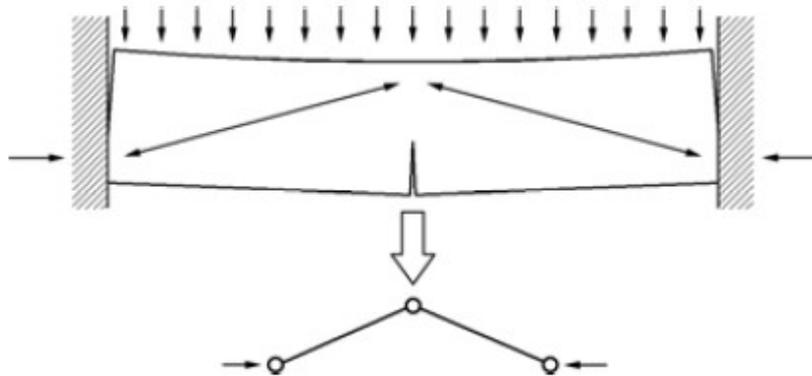


Figure 39. Schéma montrant la formation de l'arc de charges à trois articulations.

Donc pour prendre en compte la résistance supplémentaire produit de la formation de l'arc de charges à trois articulations, il a été développé une méthode de calcul qui se réalise en deux temps :

- D'abord, il est calculé la résistance à la flexion en suivant une méthode traditionnelle comme la méthode des lignes de rupture par exemple ;
- Ensuite, on calcule la charge ultime en rajoutant, à la charge limite obtenue par la méthode de lignes de rupture, la charge supplémentaire développée à cause de l'effet membrane.

4.2. Présentation des résultats

Dans les graphiques ci-dessous, on présente les résultats obtenus. Ces graphiques permettent d'analyser certains paramètres influençant la charge maximale de flexion et la charge supplémentaire nécessaire pour atteindre la charge ultime.

Les résultats montrant la comparaison entre les essais, la méthode des lignes de rupture, la méthode Rankin et la méthode proposée par [WAN, 2011] sont montrés ci-après.

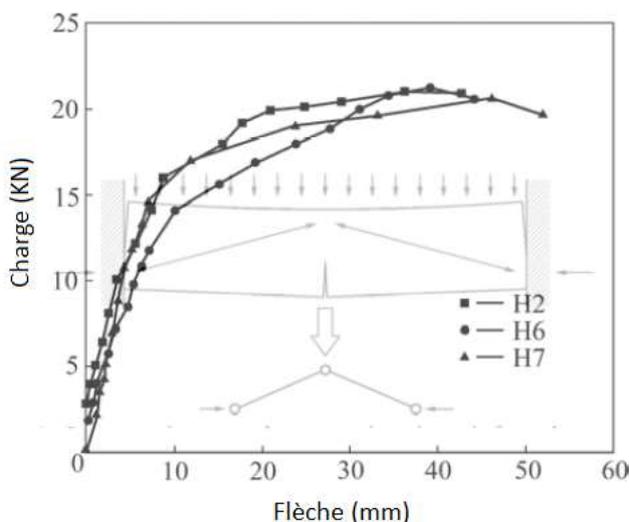
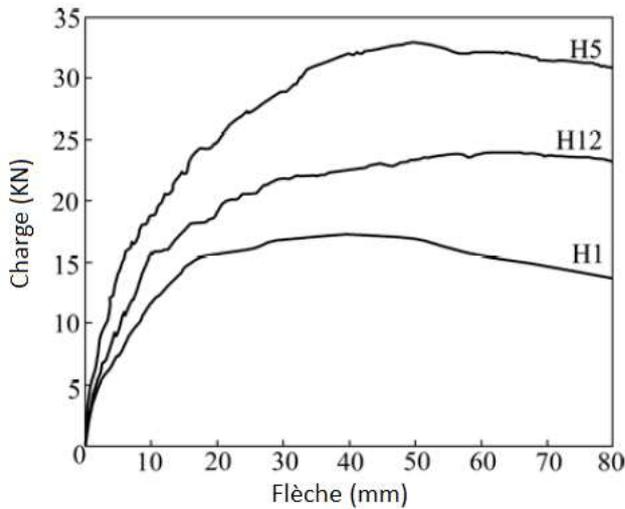


Figure 40. Graphique de charge vs flèche pour les spécimens H2, H6 et H7

Dans la figure 40, on observe les spécimens H2, H6 et H7. Les charges initiales appliquées sont légèrement différentes. Cependant, on observe une évolution des respectifs graphiques charge-flèche assez similaires pour les 3 spécimens.

Cela nous fait conclure que les charges initiales n'ont pas d'effet significatif dans la charge ultime. En revanche, d'après les essais il a été observé que le nombre de fissures générées à la rupture ont été respectivement de 12, 5 et 3 dans les spécimens H7, H2 et H6.



Dans la figure 41, on observe l'évolution du graphique charge-flèche pour les spécimens H5, H12 et H1 qui ont un rapport de portée-hauteur de 20, 24 et 30 respectivement.

On observe une augmentation de la charge maximale avec la diminution du rapport portée-hauteur.

Figure 41. Graphique de charge vs flèche pour les spécimens H5, H12 et H1

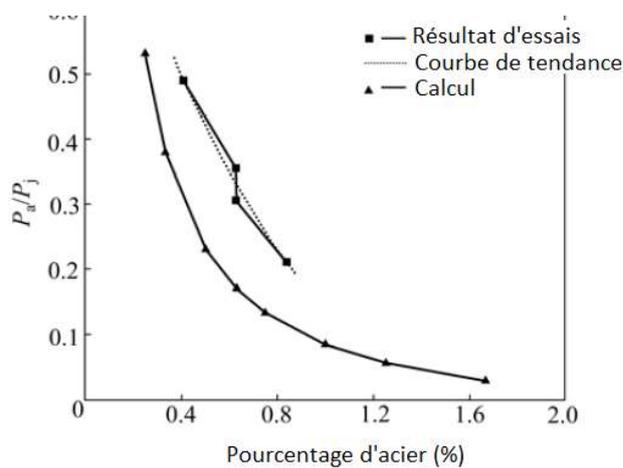


Figure 43. Relation entre la charge supplémentaire et le ratio portée-hauteur.

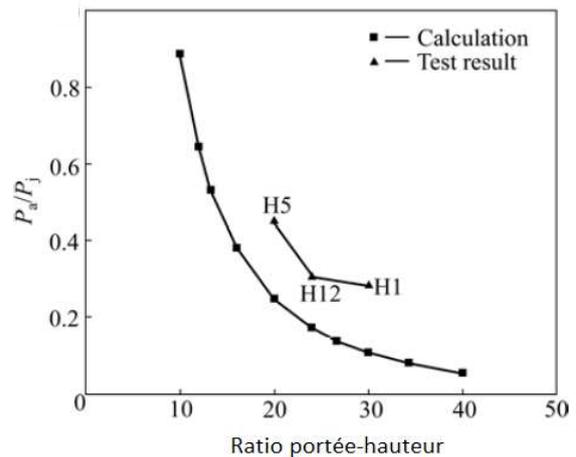


Figure 42. Relation entre la charge supplémentaire et le pourcentage d'acier

Dans la figure 42 et la figure 43, on peut observer respectivement, l'influence du pourcentage d'acier et du ratio portée-hauteur dans la charge supplémentaire développée avant d'atteindre la charge ultime. On voit que la charge supplémentaire due à l'effet membrane augmente avec la diminution du pourcentage d'acier, cela peut être dû au fait que la présence des flèches plus importantes favorise le développement de l'arc de charge à trois articulations et donc l'effet membrane. Ce facteur pourrait être intéressant à exploiter dans le but d'économiser dans les quantités d'aciers.

La figure 43 montre que dans la même ligne que la charge maximale de flexion est influencée positivement par la diminution du ratio portée-hauteur, la charge supplémentaire développée est aussi influencée positivement. Cela peut être expliqué par le fait de la diminution du ratio entre la portée et la hauteur et donc, une augmentation de l'inertie de la section, une moindre portée ou les deux en même temps, facilitant de cette manière la formation de l'arc de charges supplémentaires à trois articulations.

Planchers	Résultat d'essai Pt (KN)	Calcul avec lignes de rupture Pj (KN)	Calcul RANKIN Pr (KN)	Méthode proposée Pc (KN)	Pt/Pj	Pt/Pr	Pt/Pc
H1	20.3	15.85	17.34	17.49	1.281	1.171	1.161
H2	24.4	20.32	23.21	23.83	1.201	1.051	1.024
H3	27.4	20.97	24.34	25.06	1.307	1.126	1.094
H4	31.3	20.32	23.21	23.83	1.540	1.349	1.313
H5	36.9	25.44	31.32	31.79	1.450	1.178	1.161
H6	24.6	20.32	23.21	23.83	1.211	1.060	1.032
H7	24.0	20.32	23.21	23.83	1.181	1.034	1.007
H8	28.4	20.97	23.34	25.06	1.354	1.167	1.133
H9	24.0	16.12	19.94	20.78	1.489	1.204	1.155
H10	32.6	26.92	29.89	30.48	1.212	1.091	1.069
H11	20.4	9.91	14.55	13.42	2.059	1.402	1.520
H12	27.4	20.97	24.34	25.06	1.307	1.126	1.094
Valeur moyenne %					138.3	116.3	114.7

Tableau 20. Comparaison entre les différentes méthodes.

D'après le tableau 11, on peut conclure que la méthode RANKIN comme la méthode proposée se rapprochent plus des résultats obtenus dans les essais par rapport à une méthode classique basée dans les lignes de rupture par exemple. En effet, la méthode des lignes de rupture en moyenne sous-évalue la résistance du plancher avec une erreur de 38,3 % par rapport à la charge ultime réelle. À différence les méthodes RANKIN et la méthode proposée qui diffèrent par seulement 16,3 % et 14,7 % respectivement par rapport à la charge ultime réelle.

5. Conclusion

Après avoir vu dans les exemples précédents avec la méthode de calcul simplifiée pour la résistance au feu des planchers mixtes, on se rend compte que l'effet de l'exposition au feu fait diminuer considérablement la résistance et génère des flèches assez importantes dans les structures, cela fait que les méthodes classiques ne suffisent pas pour prédire le comportement structural des planchers et donc l'obtention de la charge ultime.

Donc, il semble très intéressant d'inclure dans les calculs de la résistance au feu des planchers mixtes, l'arc de charges de compression qui apparaît lors du développement de l'effet membrane, permettant de cette façon d'avoir un calcul qui se rapproche plus des résultats obtenus dans les essais et en même temps de faire des économies lors de la conception.

Conclusion de l'étude bibliographique

L'exposition au feu des structures est une situation accidentelle très déterminante, car son action entraîne une détérioration et des pertes de résistance assez importantes dans un laps de temps de quelques minutes. Donc dans le but de mieux concevoir les structures pour faire face à ce type de situations accidentelles, le dimensionnement au feu et l'étude de la résistance des structures en situation d'incendie jouent un rôle très important.

On a pu voir que l'acier, qui présente des caractéristiques de conductivité thermique assez bonnes, est pénalisé par la diminution de sa résistance à de hautes températures. Ainsi on a pu remarquer aussi, malgré que les structures mixtes acier-béton et plus spécifiquement les dalles nervurées qu'on a

traitées ici, sont très intéressants dû à sa polyvalence d'utilisation dans des conditions de température normales, ces structures peuvent présenter des performances mécaniques très réduites dans des situations d'incendie.

Pour étudier plus profondément cette problématique, il serait très intéressant d'évaluer les performances mécaniques des structures mixtes en prenant en compte l'application d'un produit de protection contre le feu.

Finalement, comme on a vu dans la section 4 de la partie III, l'analyse de la résistance supplémentaire d'un plancher en béton armé dû à l'effet membrane, peut nous permettre de concevoir des planchers plus performants et optimisés, maîtrisant mieux l'approche des calculs à la réalité et en même temps en faisant des économies.

Partie II

Dans cette partie, on étudiera différentes solutions de planchers disponibles sur le marché pour ensuite sélectionner la plus adéquate en fonction de certains critères. Donc on fera une étude qualitative par rapport à certains critères pour faire une présélection des systèmes qui pourront être analysés plus en profondeur dans la suite.

1. Classification de planchers

Dans les tableaux ci-dessous sont classifiés les différents systèmes de plancher proposés sur le marché actuellement. Les planchers proposés sont groupés dans 6 groupes et on répertorie pour chaque système de plancher ses principales caractéristiques.

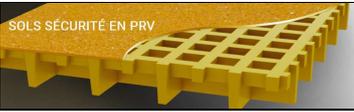
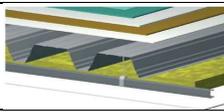
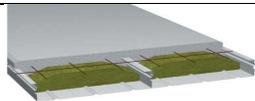
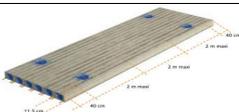
Plancher sec	
<p>1. Caillebotis en fibre de verre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Résistante à la corrosion • Portée bidirectionnelle • Résistance mécanique élevée • Résistant aux produits chimiques et ne conduit pas l'électricité • Facile à découper en formes complexes • Faible coût • Résistance comparable à un caillebotis métallique, mais plus légère 	<p>2. Support décibel cofradal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plancher composite et isolé, avec une portée allant jusqu'à 6 m • Épaisseur de 200 mm, constitués de lamelles de bois visés dans la partie supérieure du bac acier, un matériau isolant situé au-dessous du bac acier et un système de plafond suspendu en plaques de plâtre • Application dans de divers projets comme : réhabilitation, logements collectifs, maisons individuelles, bureaux, etc.
	
Plancher préfabriqué	
<p>3. Plancher préfabriqué cofradal 200</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plancher de largeur de 1,2 m et une portée de 7 m sans étaieement • Ce plancher intègre dans son épaisseur un isolant phonique et acoustique, ainsi comme un treillis soudé • On peut s'en passer de mettre une chape sur chantier et présente une sous-face galvanisée ou prélaquée • Structure assez légère, avec un poids de 200 kg/m² <p>Mise en œuvre rapide et facile, sans étaieement ni coulage sur site</p>	<p>4. Dalles alvéolaires (système KP1)</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation de la précontrainte permet de réaliser de grands portés. • Les différentes dalles sont assemblées par le béton de clavetage • Elles peuvent être fabriquées des différentes épaisseurs et longueurs en fonction du projet • On peut l'associer ou non à une dalle de compression coulée sur chantier • L'épaisseur et le poids propre de la dalle sont optimisés • La surface peut être crantée ou lisse • Portées jusqu'à 17 m et deux fois plus léger qu'une dalle pleine
	

Tableau 21. Caractéristiques des différents systèmes de plancher existants

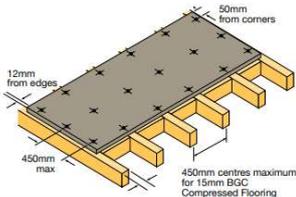
Panneaux de fibres		
<p>5. Panneau de fibres (Innova durafloor)</p>	<p>6. Structflor</p>	<p>7. Compressed flooring substrate</p>
<ul style="list-style-type: none"> •Panneau composé réalisé à partir de ciment et fibres de cellulose •Panneau résistant à l'eau et peut être utilisé dans l'extérieur comme à l'intérieur •Matériau résistant aux termites, non combustible et facile à installer •On peut avoir besoin de rajouter de l'isolation. •Travaille à des températures allant de 0 °C jusqu'à 95 °C 	<ul style="list-style-type: none"> •Les panneaux peuvent être stockés à l'extérieur pendant un maximum de 5 mois. •Trois types de panneaux : structuralflor gp (pour des utilisations classiques), structflor H2 (panneau traité contre les termites) et R-flor (panneau à faible émissivité) •Joints d'expansion pour prévenir de possibles variations d'hygrométrie des panneaux. •Résistance thermique au moins 4 fois supérieure à celle d'une dalle en béton. •La surface des panneaux peut recevoir tout type de finition. 	<ul style="list-style-type: none"> •Ces panneaux sont fabriqués à partir de ciment portland, du sable fin et des fibres de cellulose. •Permet de réaliser des portées jusqu'à 3 m. •Les panneaux sont dimensionnés pour supporter des charges réparties et concentrées ainsi comme la combinaison des charges.
		<p>FIGURE 9 // FIXING PATTERN</p> 
<p>8. Plancher intermédiaire équatio étage</p>	<p>9. Plancher KP1 silence</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Permet de supprimer les murs porteurs en l'associant à des poutres PPR (poutres pour plafond sans retombée) • Peu encombrant, facilitant la mise en œuvre sur chantier • Légèreté et résistance du plancher • Gain de surface habitable • Une palette d'entrevous rectolight pour 110 m² 	<ul style="list-style-type: none"> • Allègement de la structure et réductions des contraintes appliquées au sol • Facile à mettre en œuvre, il est possible une personnalisation ou intervention, même après gross œuvre (électricité, plomberie) • Ponts thermiques linéiques réduits de 70 % • Isolement aux bruits aériens et d'impact d'accord avec la réglementation • Réduction de la quantité de béton utilisé de 70 % par rapport à une dalle pleine • Conformité par rapport à la résistance au feu 	
	<p>PLANCHER SILENCE</p> 	

Tableau 22. Caractéristiques des différents systèmes de plancher existants

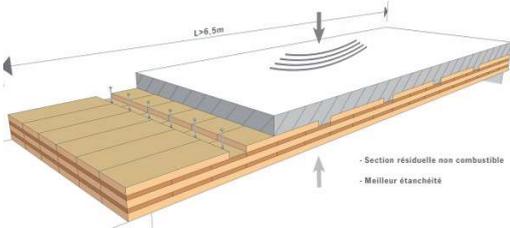
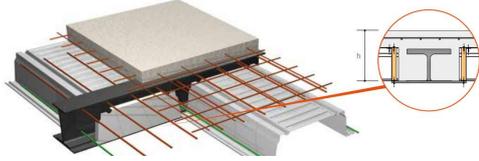
Plancher collaborant	
<p>10. Plancher collaborant en bois et béton</p> <ul style="list-style-type: none"> • Section résiduelle non combustible et bonne étanchéité • Résistante assez bonne à la traction, ce qui permet aux matériaux de travailler au maximum de ces capacités • Bonnes propriétés statiques permettant d'obtenir de grandes portées sans augmentation importante du poids de la dalle • La dalle en béton améliore les performances acoustiques du plancher • Trois systèmes de connexion : connexion par rainures, par tôles perforées et connexions visées 	<p>11. Plancher à bac collaborant (Système WING et SLIMFLOOR)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ses éléments peuvent être préalablement soudés ou boulonnés sur chantier. • Plancher permet une réduction du poids propre du plancher de 30 %. • Le système protège le profilé métallique naturellement contre le feu • Longue portée pour une faible épaisseur de la dalle • Un degré de résistance au feu de 90 minutes • Montage facile permettant d'avancer plus rapidement dans les travaux • C'est un concept économique et durable
	
Panneau composé bois	
<p>12. Panneau composé BALTEK SB</p> <ul style="list-style-type: none"> • Panneaux réalisés en bois de balsa • Bon comportement à la fatigue et à l'impact • Bonne isolation sonore et thermique • Fonctionne dans une étendue assez large de températures (-212 et +163 °C) 	<p>13. Panneau en bois lamellé</p> <ul style="list-style-type: none"> • On peut l' utiliser pour des planchers non visibles neufs comme pour la rénovation • C'est un élément autoporteur à forte reprise de charge avec un coût comparable au coût d'une dalle en béton • Elles peuvent être installées avec un certain jeu pour permettre de s'adapter s'il y a des variations d'humidité • Les panneaux sont réalisés en bois de classe C24
	

Tableau 23. Caractéristiques des différents systèmes de plancher existants

1.1. Critères pour choix du plancher

Dans le tableau ci-dessous, on répertorie les critères par rapport auxquels les systèmes de plancher proposés seront analysés. Ces critères cherchent à évaluer les caractéristiques des différents systèmes de plancher proposés dans la partie précédente dans le but d'obtenir une classification montrant les planchers du plus adapté au moins adapté pour le projet concernant les planchers en surélévation.

Critères pour la sélection du plancher					
Acoustique		Thermique (inertie thermique)		Résistance au feu	Hygrométrie
Performance mauvaise	acoustique	Performance mauvaise	thermique	Faible résistance au feu	Matériau imperméable
Performance moyenne	acoustique	Performance moyenne	thermique	Résistance au feu moyenne	Matériau régulateur de l'hygrométrie
Performance bonne	acoustique	Performance thermique bonne		Bonne résistance au feu	
Performance excellente	acoustique	Performance excellente	thermique	Excellente résistance au feu	
Préfabrication		Écologie		Disponibilité	Stockage
Pas de préfabrication		Réduction d'utilisation des ressources non renouvelables		Disponible hors Europe	Encombrement, besoin de beaucoup d'espace
Préfabrication d'une partie du plancher		Utilisation des matériaux biosourcés		Disponible sur le marché français	Faible encombrement
Possibilité de préfabriquer la totalité du plancher		Faible empreinte carbone			

Tableau 24. Critère d'évaluation par rapport à la pertinence des différents systèmes de plancher

1.2. Classification des meilleures solutions

Le tableau ci-dessous répertorie les différentes solutions proposées par rapport aux critères d'évaluation. Ainsi cette évaluation permet de classer les systèmes de plancher proposés.

Solutions	Critères								
	Acoustique	Thermique	Résistance au feu	Hygrométrie	Préfabrication	Écologie	Disponibilité	Stockage	Somme
Poids du critère	1	1	1	1	1	1	1	1	8
13	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0	6
3	1	0.5	1	0	1	0.33	1	1	5.83
10	0.5	1	1	1	0.5	0.66	1	0	5.66
11	0.5	1	0.75	0.5	0.5	0.33	1	1	5.58
2	0.75	0.25	0.75	0	1	0.66	1	1	5.41
12	0.5	0.5	1	1	1	1	0	0	5
4	0.5	1	1	0	1	0.33	1	0	4.83
8	1	1	1	0	0	0.66	1	0	4.66
9	1	1	1	0	0	0.66	1	0	4.66

1	0	0	0	0	1	1	1	1	4
5	0	0	0.25	0	1	1	0	1	3.25
7	0	0.25	0	0	1	1	0	1	3.25
6	0	0	0	0	1	1	0	1	3

Tableau 25. Classement de différents systèmes de plancher par rapport aux critères d'évaluation

Les possibles solutions des planchers du tableau 5 correspondent aux éléments suivantes : caillebotis en fibre de verre (1), plancher sec Support Décibel (2), cofradal 200 (3), dalle alvéolaire système KP1 (4), panneau de fibres Innova durafloor (5), structflor (6), COMPRESSED FLOORING SUBSTRATE (7), plancher intermédiaire équatio étage rectolight (8), plancher KP1 silence (9), plancher collaborant bois béton (10), plancher à bac collaborant du système WING et SLIMFLOOR (11), panneau composé BALTEK SB (12), panneau bois lamellé (13).

Dans le tableau ci-dessous, on a le bilan de la performance des différents systèmes de plancher proposés par rapport aux critères. Dans les cinq premières propositions et avec la possibilité de préfabrication, on a trois types principaux de planchers, tels que : le panneau en bois lamellé, le plancher mixte Cofradal 200, le plancher collaborant en bois et béton et le plancher sec Cofradal (Support Décibel). Ces quatre planchers sont susceptibles d'intéresser le projet. Mais dû à sa disponibilité, la possibilité d'une préfabrication complète des planchers à l'atelier et dus à ses remarquables capacités mécaniques, le plancher Cofradal 200 s'offre comme la solution étudiée en priorité pour la réalisation des surélévations.

Système de plancher	Points sur 8
13. Panneau bois lamellé	6
3. Cofradal 200	5.83
10. Plancher collaborant en bois et béton	5.66
11. Plancher à bac collaborant (Système WING et SLIMFLOOR)	5.58
2. Plancher sec (Support Décibel cofradal)	5.41
12. Panneau composé BALTEK SB	5
4. Dalle alvéolaire (système KP1)	4.83
8. Plancher intermédiaire équatio étage (rectolight)	4.66
9. Plancher KP1 silence	4.66
1. Caillebotis en fibre de verre	4
5. Panneau de fibres (Innova durafloor)	3.25
7. COMPRESSED FLOORING SUBSTRATE	3.25
6. Structflor	3

Tableau 26. Bilan concernant le classement des planchers du plus adapté au moins adapté

Dans l'histogramme de barres ci-dessous on observe l'importance et l'adéquation de chaque solution en proportion sur 100% et évaluée par rapport à chaque critère d'analyse. De manière visuelle on peut identifier que les meilleures solutions sont : 13. le panneau en bois lamellé, 3. le plancher mixte Cofradal 200, 10. le plancher collaborant en bois et béton et 2. le plancher sec Cofradal (Support Décibel).

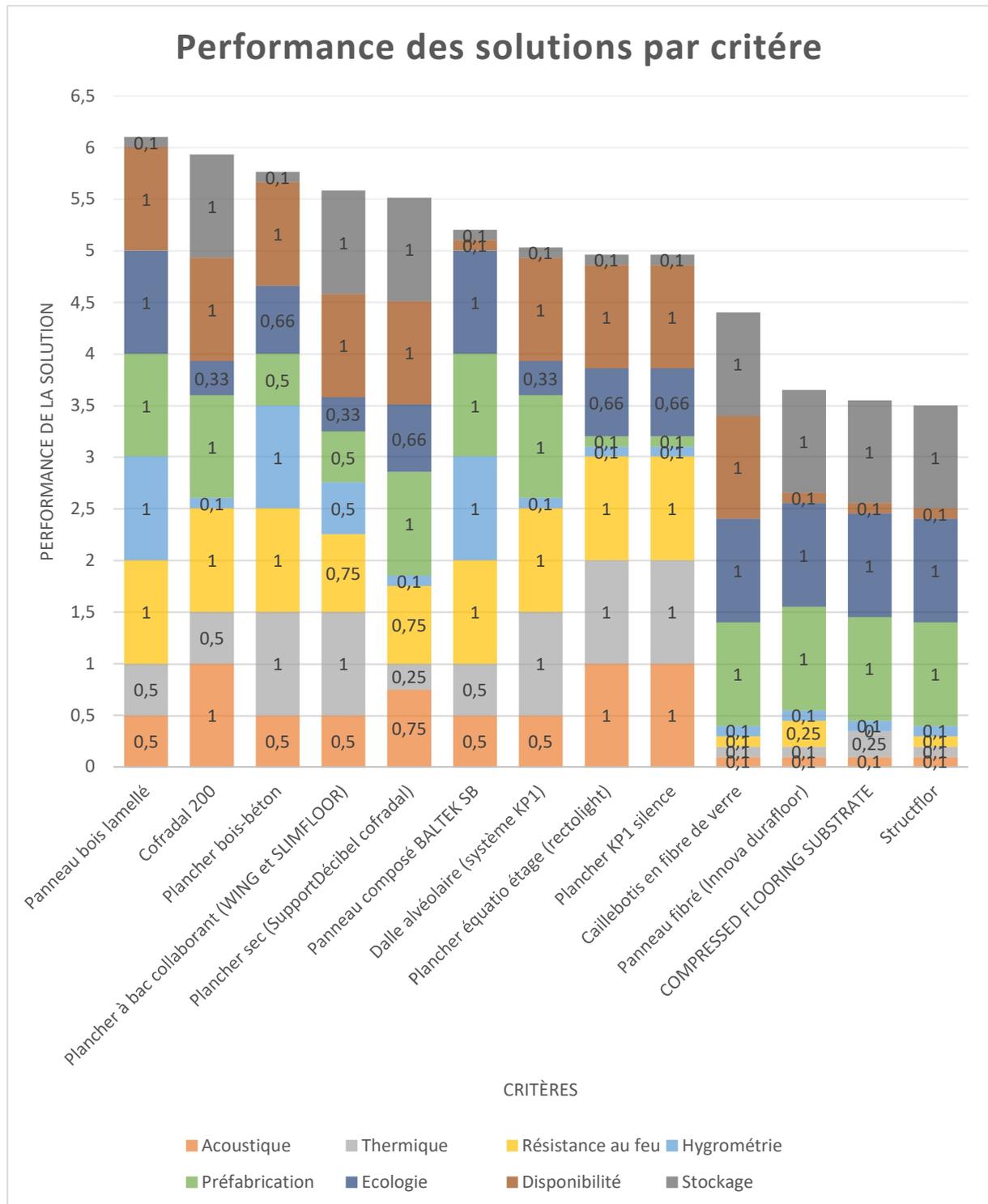


Figure 44. Histogramme comparatif de la pertinence des systèmes de plancher

1.3. Conclusion

D'après la classification réalisée pour les différents systèmes de planchers par rapport aux critères choisis, il semble que le plancher Cofradal 200 est la solution la plus adéquate, car permet de satisfaire la plupart des critères et sa disponibilité est garantie. Ce plancher est préfabriqué, présente de caractéristiques d'isolation thermique et acoustiques assez performantes, ainsi comme une portée et une résistance mécanique adéquates. Finalement le fait qu'est un plancher deux fois plus léger qu'un plancher courant et le gain de temps dans sa mise en place font de ce système de plancher le plus adapté pour la construction des planchers en surélévation.

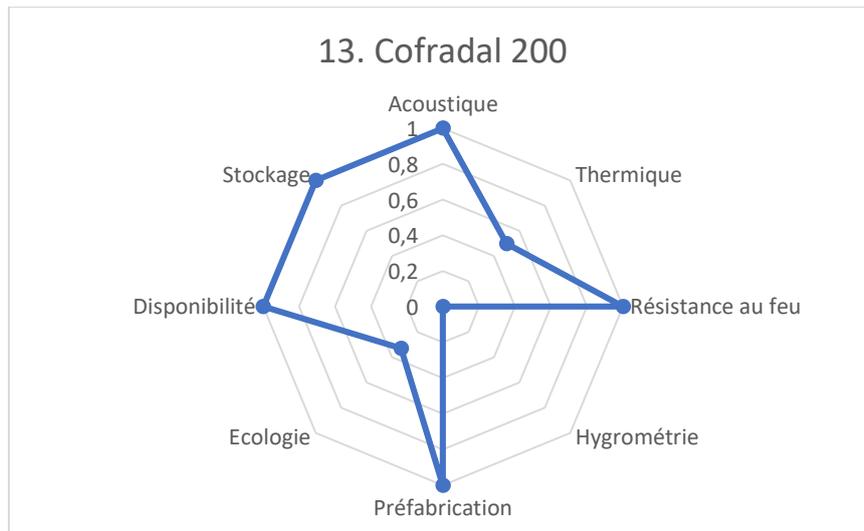


Figure 45. Radar du système de plancher choisi

2. Analyse de la section du plancher Cofradal 200

Dans l'image ci-dessous on a deux panneaux ensemble, on observe une coupe transversale montrant les différents éléments composant les panneaux classiques, chaque partie est référencée par nombres qui peuvent être identifiés dans la légende.

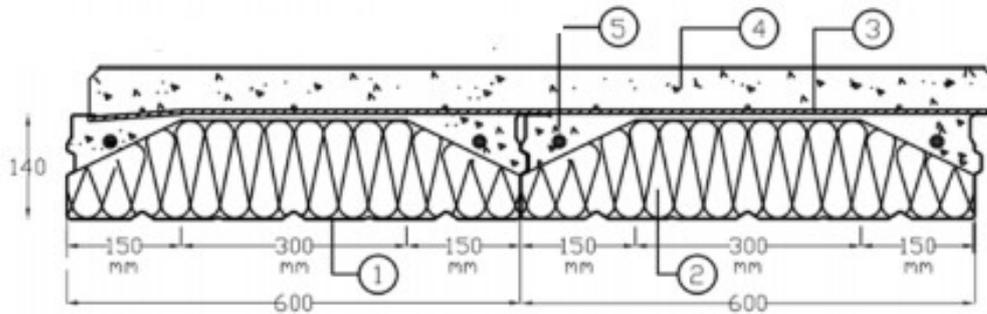


Figure 46. Coupe montrant les différents éléments du plancher Cofradal 200

Légende :

1. Plateau métallique Cofradal
2. Laine de roche
3. Treillis soudés aux plateaux en usine
4. Béton coulé en usine C30/37
5. Renfort au feu

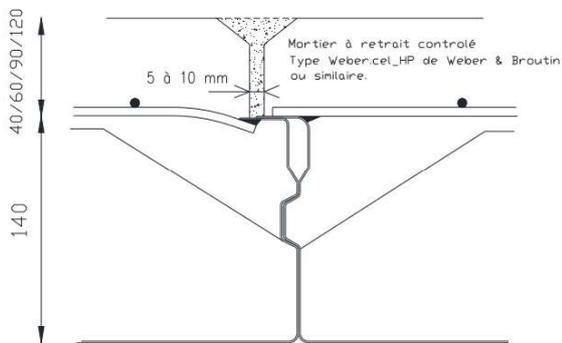


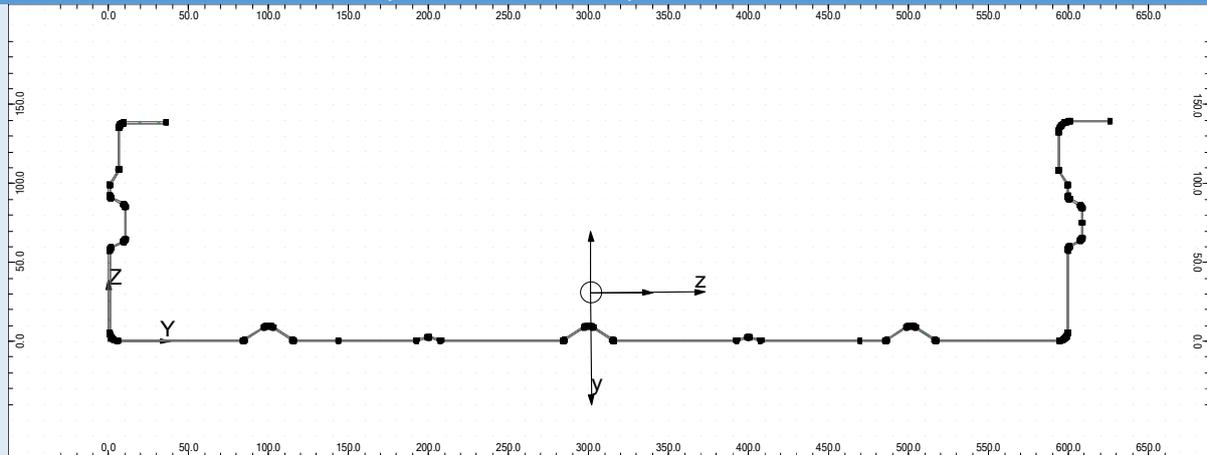
Figure 47. Détail des jonctions entre deux panneaux Cofradal

Dans l'image ci-contre on observe de détail de la jonction entre deux panneaux préfabriqués cofradal 200. Cette jonction est réalisée par un système tenon-mortaise pour finalement mettre un scellement avec un mortier à retrait compensé.

Dans le tableau ci-dessous, on répertorie les différents matériaux composant le plancher préfabriqué Cofradal 200. On a isolé la tôle métallique et on a analysé sa section à l'aide du logiciel ROBOT pour déterminer ses caractéristiques mécaniques et géométriques

comme son centre de gravité et inertie, ce qui sera utile pour la suite de l'analyse du plancher mixte.

Analyse de la section du plancher Cofradal 200



Plateau métallique Cofradal

- Plateau galvanisé ou prélaqué de type 140.600 réalisé selon la procédure Sendzimir par ArcelorMittal dans les usines de Montataire.
- Épaisseur 1mm ou 1.25 mm
- Limite élastique de 320 MPa
- Résistance à la traction de 390 MPa
- Allongement à la ruine 17%
- Module d'élasticité
- 210 MPa

Géométrie	Repère des axes principaux	Laine de roche	Treillis soudés
<p>Aire de la section A = 9.68 cm²</p> <p>Centre de gravité Yc = 301.6 mm Zc = 30.9 mm</p> <p>Périmètre S = 1938.7 mm</p> <p>Matériau de base : ACIER E = 210000.00 MPa dens. = 7852.83 kg/m³ p.un. = 7.60 kG/m</p>	<p>Angle Alpha = 89.8 Deg</p> <p>Moments d'inertie Ix = 0.00 cm⁴ Iy = 4952.88 cm⁴ Iz = 11.47 cm⁴</p>	<p>Masse volumique de 50 kg/m³</p> <p>Béton</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il est utilisé un béton de sables et des granulats avec une classe de résistance au moins égale à C30/37 (dans l'analyse on considérera un béton C 25/30) 	<ul style="list-style-type: none"> • Treillis du type PAF10 • Maille carrée de 200/200 et de diamètre 5.5/5.5 • Limite élastique de 500 MPa et allongement sous charge maximale de 2.5%

Tableau 27. Détail des caractéristiques de matériaux composant le plancher Cofradal 200

2.1. Résistance du plancher Cofradal sans renfort

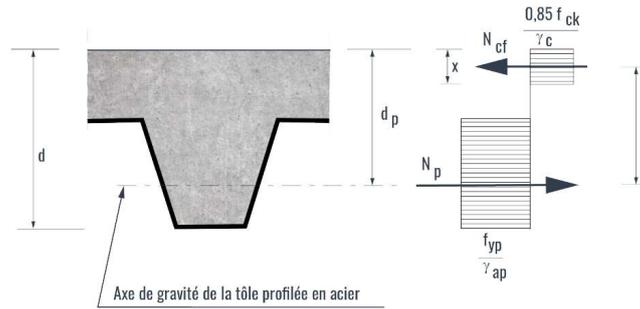


Figure 48. Schéma de calcul de la résistance d'un plancher mixte

Les données ci-dessous correspondent à l'analyse de la résistance réalisée pour un plancher Cofradal 200. On analyse la résistance au moment fléchissant et la flèche maximale développée due au chargement.

2.1.1. Capacité portante

Dans le graphique ci-dessous, on observe la charge résistante maximale par mètre carré en fonction de la portée et la charge sollicitant par mètre carré en fonction de la portée. Pour la charge résistante, le trait gris représente la charge résistante, mais après application de deux coefficients de sécurité de 1,2 et 1,5 dans le but de comparer les calculs aux résultats trouvés sur l'avis technique du plancher préfabriqué.

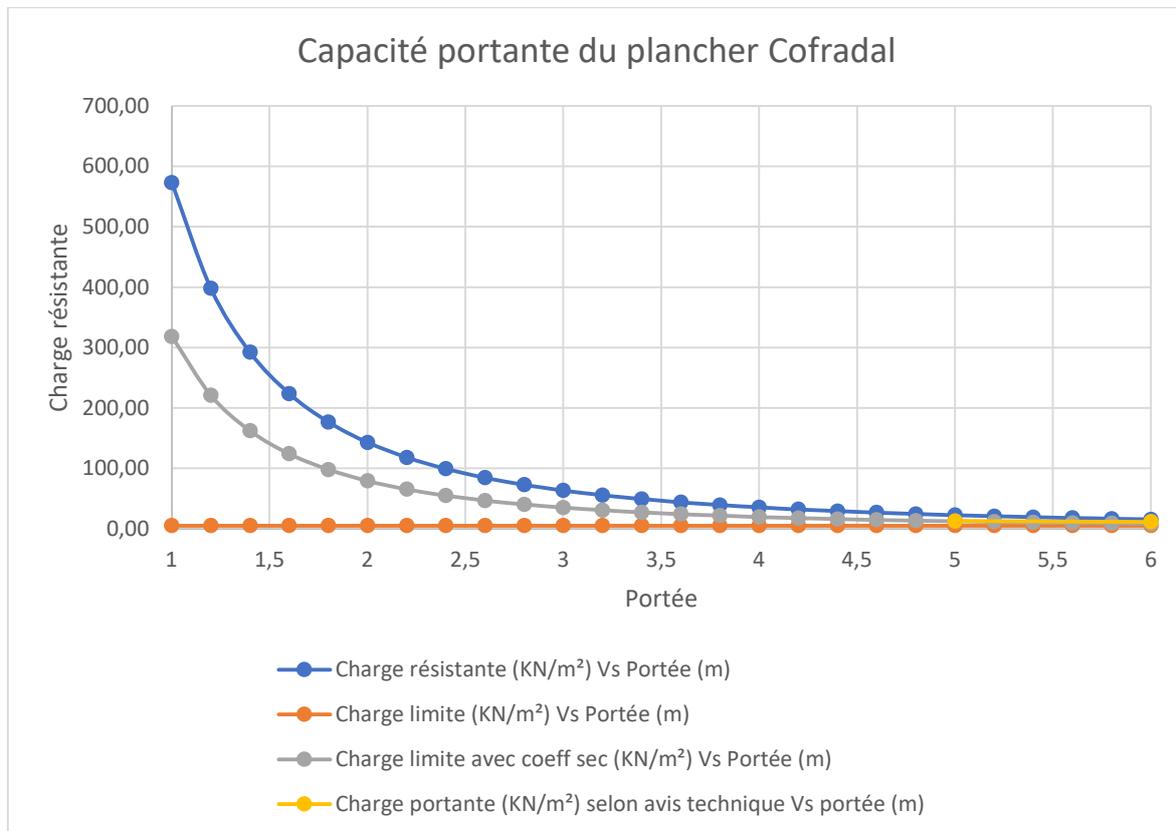


Figure 49. Capacité portante des planchers Cofradal 200 avec et sans coefficient de sécurité

Dans le graphique ci-dessous, on se concentre dans l'analyse de capacités portantes pour des portées qui varient de 5 à 6 m, concernant au domaine visé par l'avis technique sur le produit Cofradal 200.

On observe des capacités portantes inférieures pour les résultats issus des calculs par rapport aux résultats récupérés dans l'avis technique. Cela peut être dû en partie au fait qu'on n'a pas considéré les armatures de renfort dans les calculs. Cependant dans les deux cas on reste dans des capacités résistantes supérieures aux sollicitations.

On peut remarquer que par rapport à la charge sollicitant en combinaison à l'ELU le système de plancher Cofradal 200 présente une capacité portante suffisante.

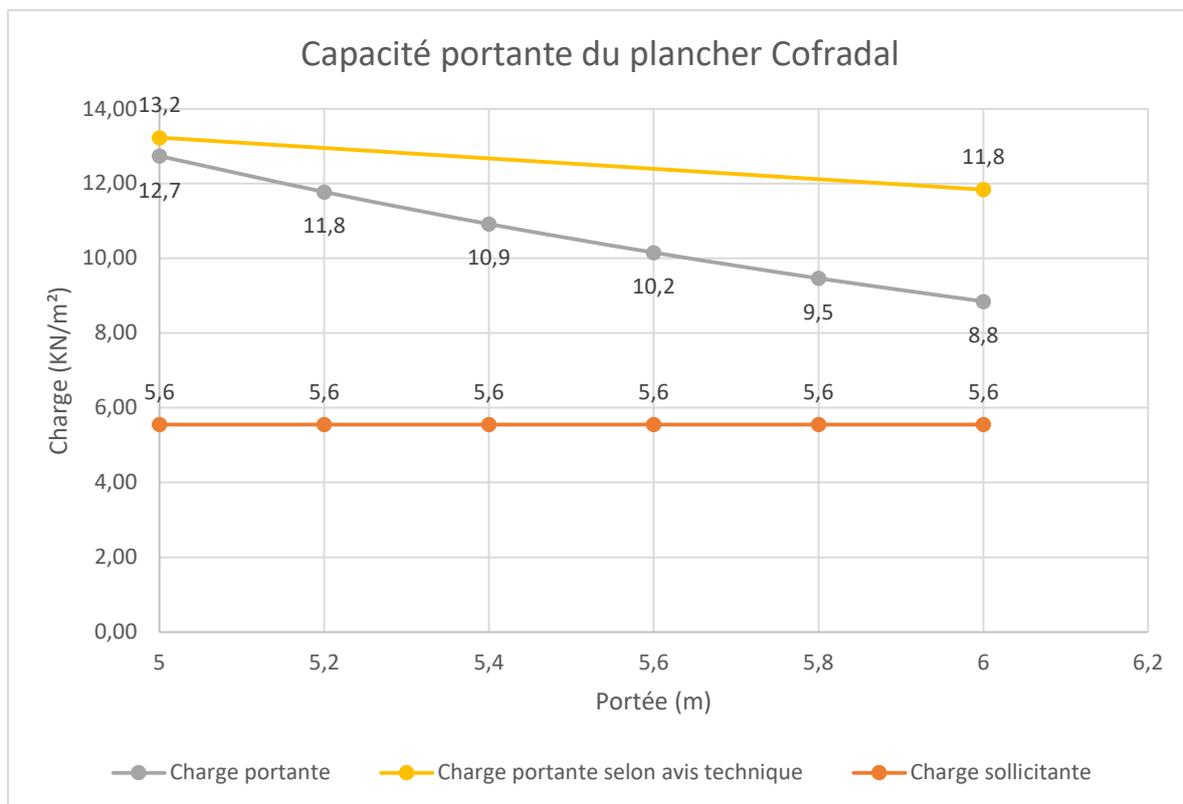


Figure 50. Comparaison de la capacité portante par rapport aux données de l'avis technique du plancher

L'estimation de la charge de sollicitation, pour le plancher cofradal comme pour le plancher supportsol, est établie dans les annexes.

2.1.2. Flèche et ratio (capacité portante/poids propre)

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve la flèche maximale due à la charge de sollicitation et la flèche limite en fonction de la portée. Dans notre cas avec les charges considérées, on observe qu'on est au-dessous de la flèche maximale de 1/500 de la portée qui est demandée.

Le critère de flèche a été définie à 1/500^{ème} de la portée dans le but de pouvoir mettre en place des revêtements rigides de type céramique. Dans les cas où il est possible de mettre un revêtement souple, la limitation de flèche peut être limité à 1/300^{ème} de la portée.

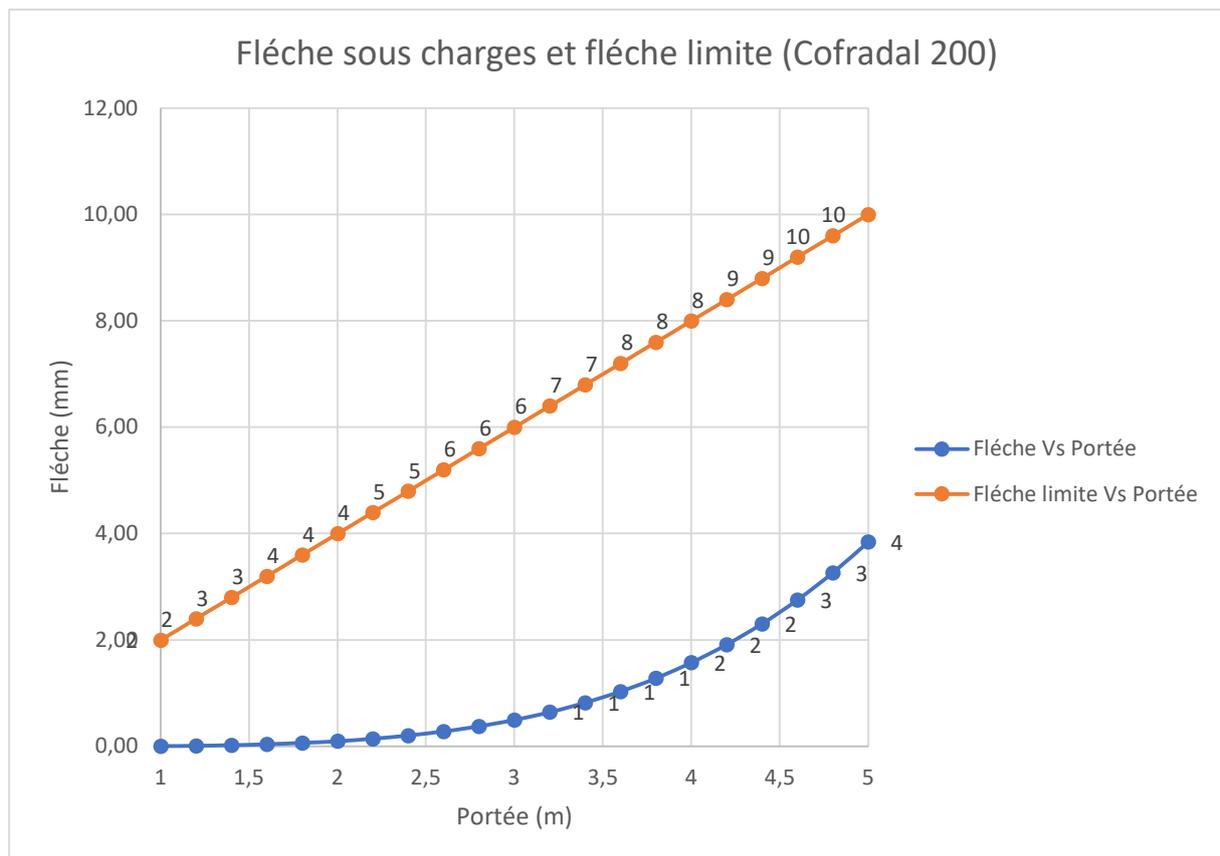


Figure 51. Évolution de la flèche et la flèche limite en fonction de la portée

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve le ratio correspondant à la charge résistante maximale par mètre carré par rapport au poids par mètre carré du plancher. Ce graphique nous permet de voir la légèreté du système de plancher mixte Cofradal par rapport à ses performances mécaniques et notamment sa capacité portante.

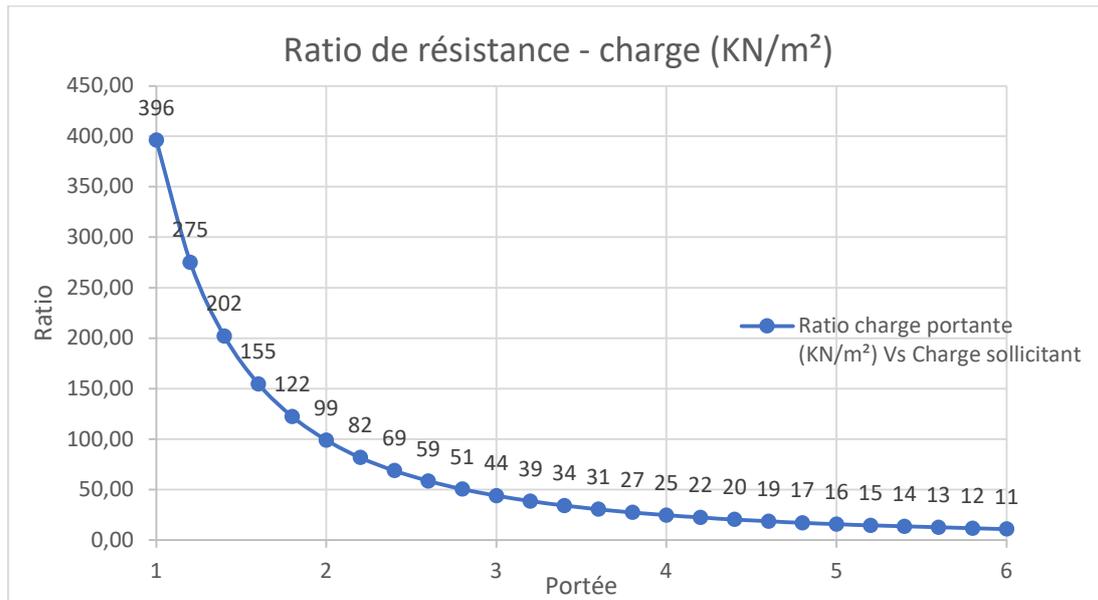


Figure 52. Ratio entre la capacité portante et le poids propre du plancher

Comparaison avec d'autres systèmes

Dans le graphique ci-dessous, on observe trois graphiques correspondant à trois systèmes qu'on va comparer. Le trait en gris représente le plancher mixte Cofradal de 200 millimètres de hauteur, le trait jaune représente le plancher Cofradal de 180 millimètres de hauteur et le trait vert représente les systèmes à poutres en C évalués. Les traits orange et bleu représentent respectivement les charges de sollicitation concernant le système de plancher mixte Cofradal et les systèmes à poutres en C respectivement.

D'après le graphique ci-dessous, on voit que la capacité portante des systèmes de plancher Cofradal est surdimensionné par rapport à la sollicitation définie par les charges du projet présentées dans les annexes. D'autre part, le système de poutres en C présente une capacité portante moins importante, cela est plus adéquat mécaniquement par rapport aux besoins dans le projet. Avec ce système et pour les sollicitations dans le projet, on peut atteindre des portées supérieures à 6 mètres.

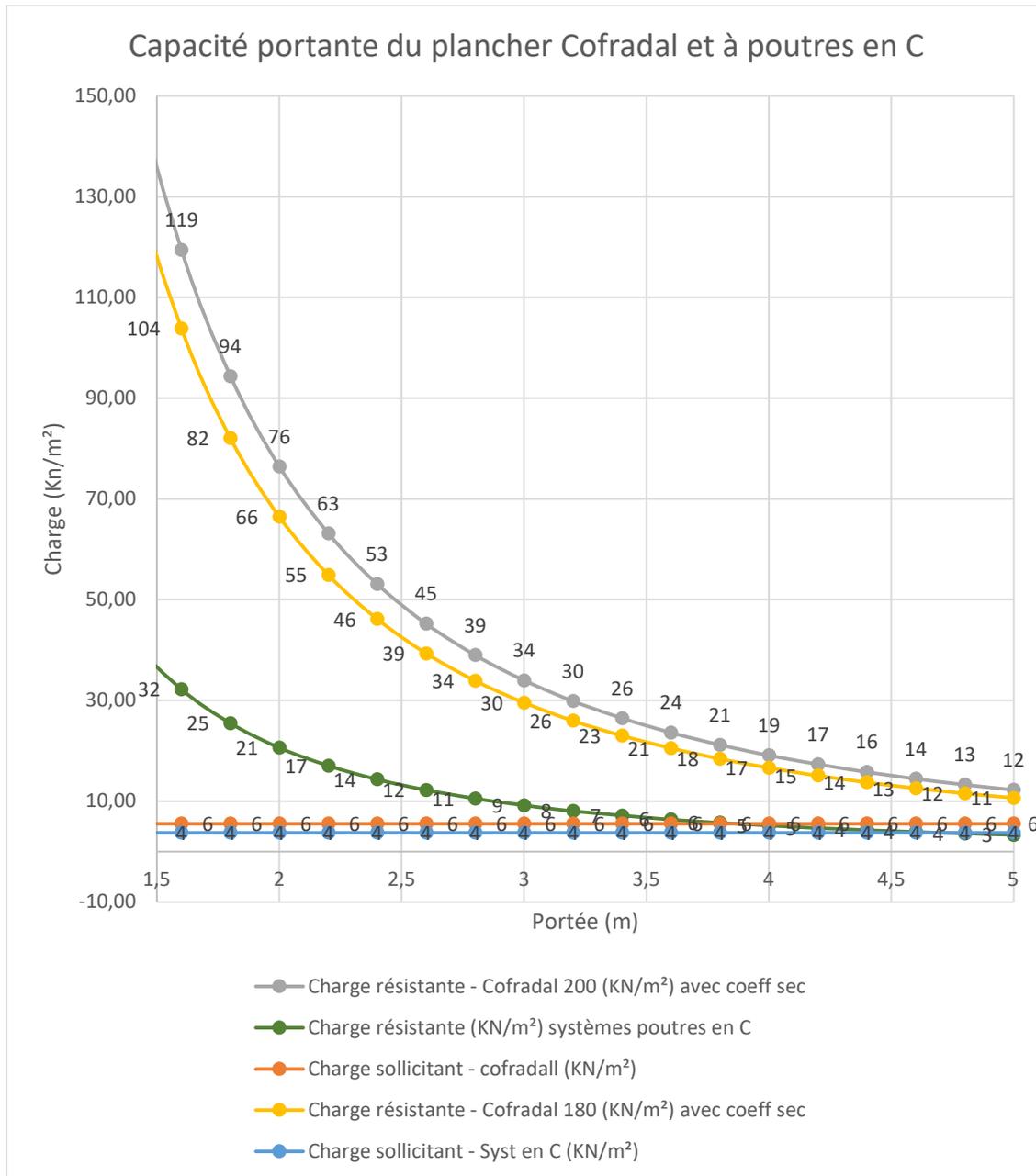


Figure 53. Capacité portante en fonction de la portée des planchers Cofradal et à poutres en C et charge sollicitant

Les différents systèmes de planchers à poutres en C sont présentés dans les annexes dans un tableau répertoriant les entraxes, les section et leurs portées maximales.

2.2. Analyse en intégrant un profilé IPE 140 et IPE 160

Dans cette partie, on analysera la résistance du plancher mixte en prenant en compte l'intégration d'un profilé métallique IPE 140 et IPE 160. On considérera que la liaison entre les profilés métalliques et les planchers préfabriqués Cofradal 200 est totale. Donc on analysera une coupe du plancher mixte comme celle montrée ci-dessous, où on retrouve un profilé métallique avec des goujons liés aux planchers Cofradal qui seront posés transversalement aux profilées IPE.

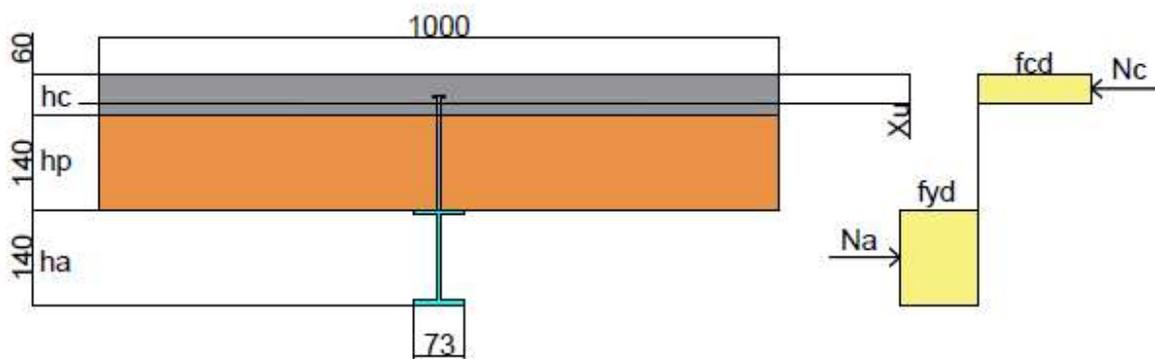


Figure 54. Schéma représentant le plancher mixte avec un IPE 140 ou 160

Dans le tableau ci-dessous, on donne les caractéristiques concernant la résistance mécanique des profilés métalliques utilisés et celle du béton.

IPE 140		Béton C25/30	IPE 160	
Section (mm ²)	fyk (MPa)	fck (MPa)	Section (mm ²)	fyk (MPa)
1640	235	25	2010	235

Tableau 28. Caractéristiques de résistance des profilées et du béton

Dans le tableau ci-dessous, on montre les caractéristiques géométriques pour une coupe comme celle de la figure 9. Certaines valeurs liées aux caractéristiques des profilés utilisés changent pour les configurations des planchers mixtes avec un profilé IPE 200 ou un IPE 180.

IPE 140	Valeur	Unité	IPE 160	Valeur	Unité
b0 =	0,25	m	b0 =	0,25	
beff =	1,25	m	beff =	1,25	m
hc =	60	mm	hc =	60	mm
ha =	140	mm	ha =	160	mm
hp =	140	mm	hp =	140	mm
h =	200	mm	h =	200	mm
I0 =	5410000	mm ⁴	I0 =	8690000	mm ⁴

Tableau 29. Caractéristiques géométriques des planchers mixtes

2.3. Plancher mixte avec IPE 140

Dans le graphique ci-dessous, on observe la charge portante maximale et la charge de sollicitation par mètre carré en fonction de la portée. La section analysée correspond à un plancher mixte composé par un plancher préfabriqué Cofradal 200 et un profilé IPE 140. Par rapport à la charge, on observe que la portée du plancher mixte Cofradal et IPE 140 est limitée à une portée de 5,8 mètres.

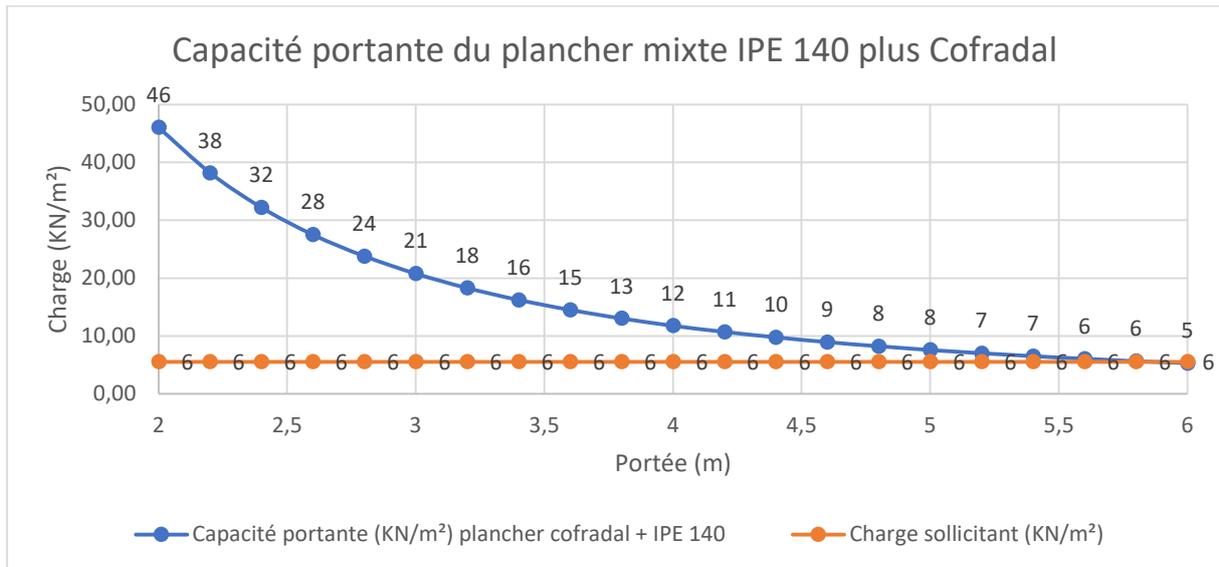


Figure 55. Capacité portante et charge sollicitant du plancher mixte

Dans le graphique ci-dessous on observe la flèche due à la charge sollicitant et la flèche limite limitée à 1/500^{ème} de la portée en fonction de la portée. La portée maximale qu'on peut atteindre sans dépasser la flèche limite est de 4 mètres.

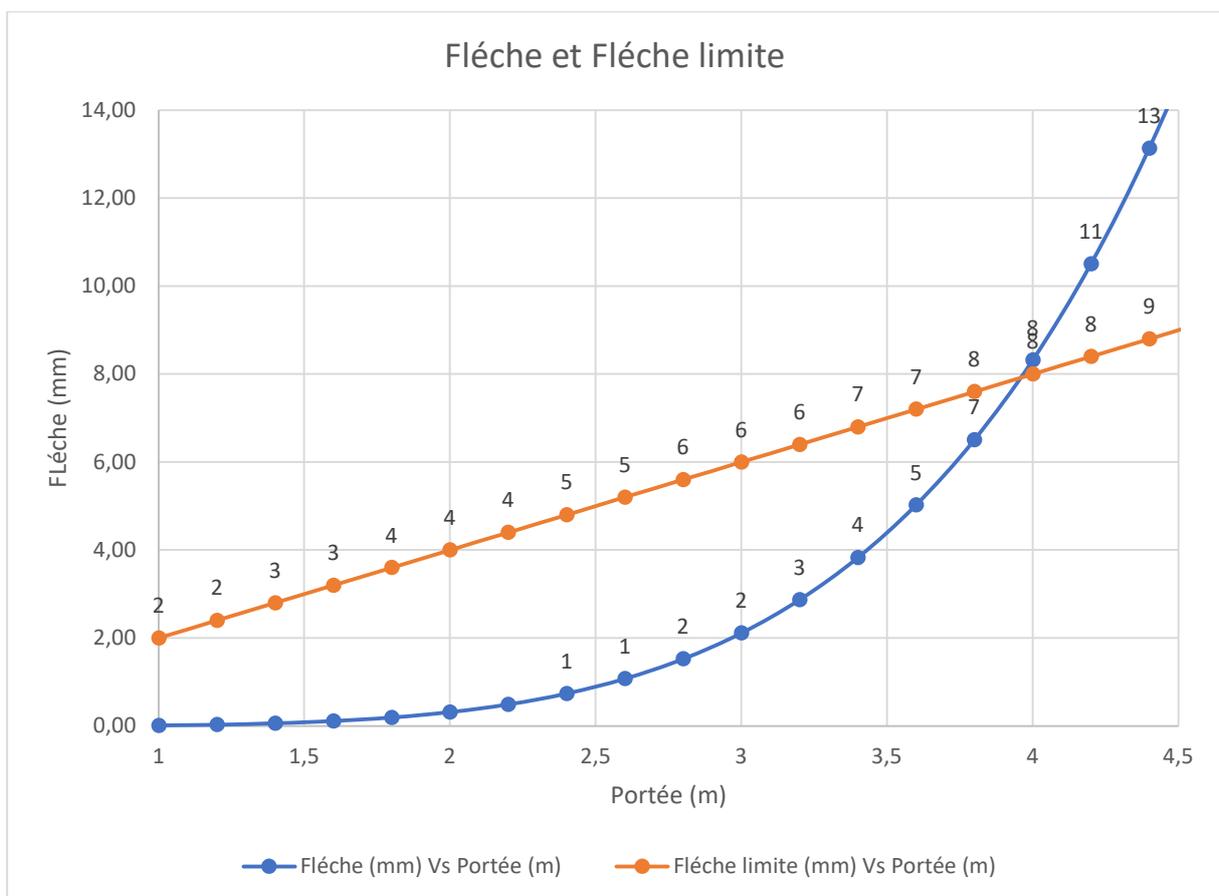


Figure 56. Flèche sous chargement et flèche limite du plancher mixte

2.4. Plancher mixte avec IPE 160

Dans le graphique ci-dessous, on observe la charge résistant par mètre carré en fonction de la portée et la charge sollicitante par mètre carré en fonction de la portée. Par rapport à la charge de sollicitation, le plancher mixte Cofradal plus IPE 160 est limité à une portée de 6,2 mètres.

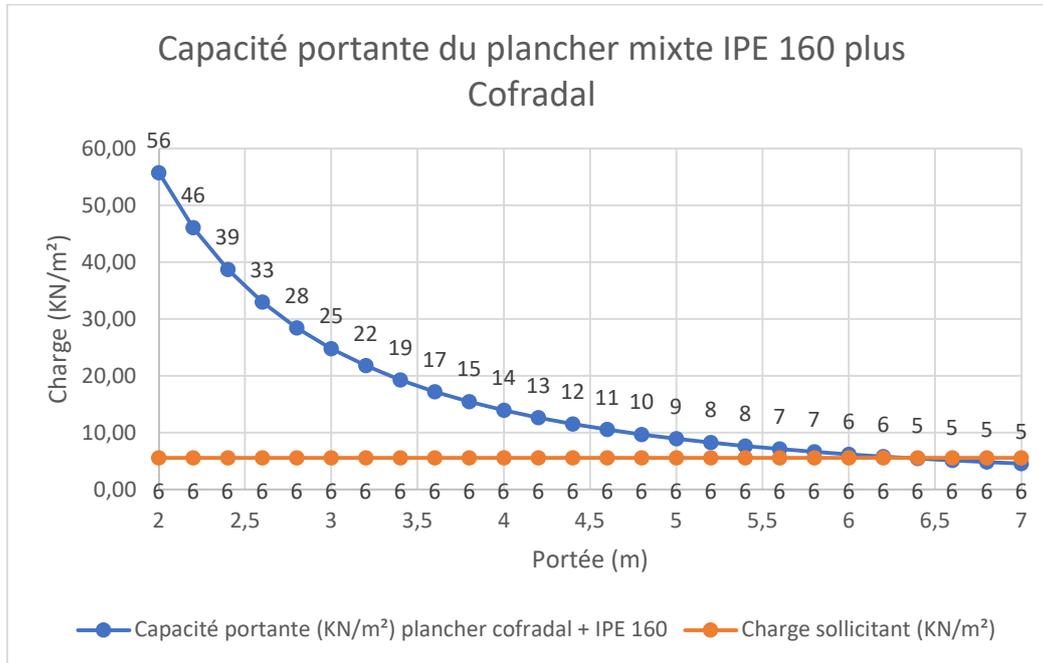


Figure 57. Capacité portante et charge de sollicitation du plancher mixte

Dans le graphique ci-dessous, on observe la flèche due à la charge de sollicitation en fonction et la flèche limite à respecter en fonction de la portée. On observe qu'on peut atteindre une portée maximale de 4,4 mètres avant de dépasser la flèche limite.

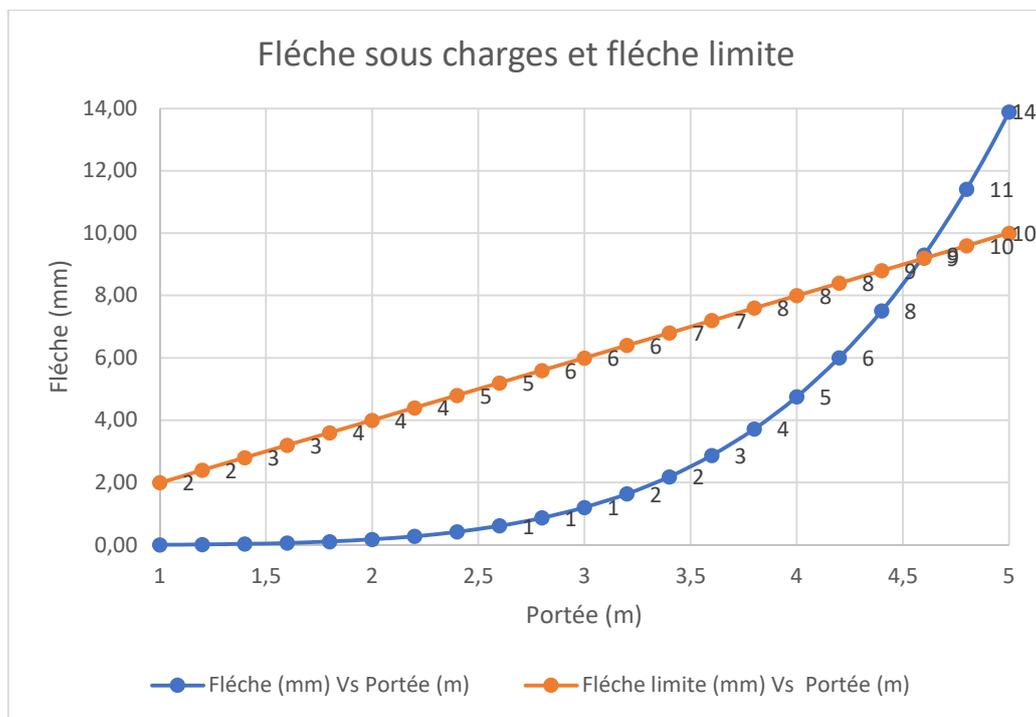


Figure 58. Flèche sous chargement et flèche limite du plancher mixte

Dans le graphique ci-dessous, on observe le ratio de la charge portante maximale par mètre carré, par rapport au poids par mètre carré du plancher en fonction de la portée. Le trait bleu correspond à un plancher mixte Cofradal 200 avec une profilée métallique IPE 140 et le trait orange correspond à un plancher mixte intégrant un profilé métallique IPE 160.

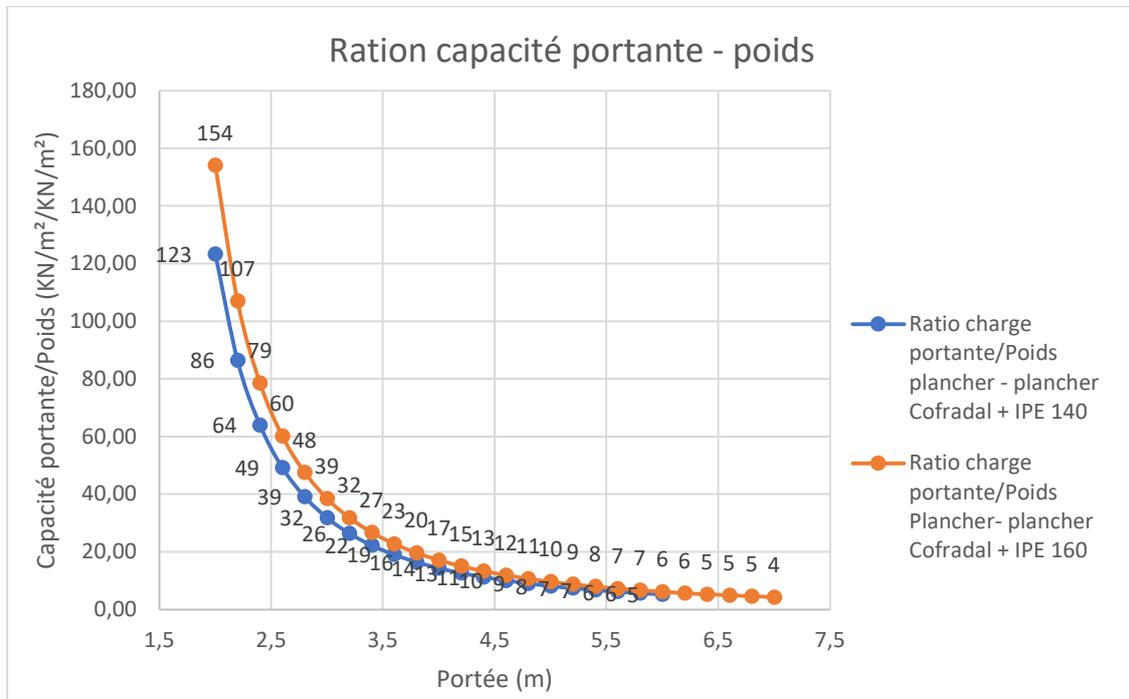


Figure 59. Ratio charge portant – poids propre des planchers mixtes avec IPE 140 et 160 en fonction de la portée

2.5. Comparaison avec des profilés en C

Dans le graphique ci-dessous, on montre une comparaison des résultats obtenus concernant la capacité portante en KN/m² entre une section de plancher mixte (Plancher Cofradal 200 plus un IPE 140) et différents systèmes à poutres de section en C. Dans le système de plancher mixte on a considéré un entraxe de 3,7 m ce qui est supérieur aux entraxes évalués pour les sections en C qui varient de 2,5 m jusqu'à 0,8. Il faut remarquer que les cinq systèmes en C présentent une capacité portante similaire évaluée en KN/m². Donc d'après le graphique on observe qu'avec le système mixte on a un gain concernant l'entraxe et la capacité portante en général.

D'après le graphique, on voit que le plancher est surdimensionné pour des portées inférieures à quatre mètres.

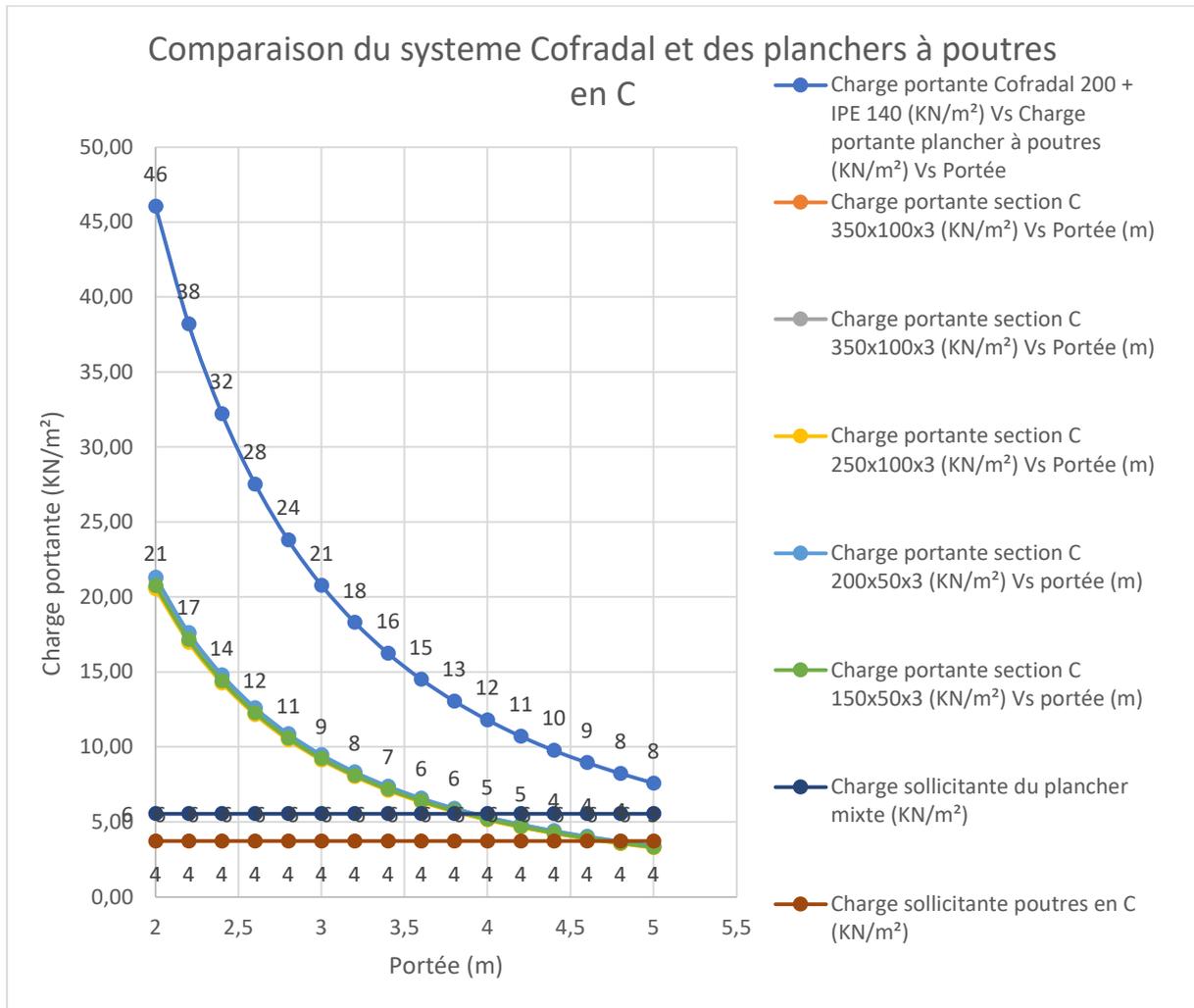


Figure 60. Capacité portante du plancher mixte avec IPE 140 comparé à celle du système de poutres en C

Dans le graphique ci-dessous on observe la comparaison des charges portantes en KN/m^2 entre la section de plancher mixte composé par un panneau préfabriqué Cofradal 200 et du profilé métallique IPE 160 par rapport aux différents profilés des poutres en C travaillant seules. Les conditions sont les mêmes que dans le cas précédent, on a réalisé les calculs dans le cas du plancher mixte pour un entraxe de 3,7 m et dans le cas des profilés en C pour un entraxe qui varie de 2,5 m jusqu'à 0,8 m. Le graphique présente la capacité portante du système mixte et des configurations avec des poutres en C (comme remarque, toutes présentent une capacité portante très similaire), on remarque du graphique qu'on a un gain en capacité portante très importante dans le système mixte par rapport au système simple avec des poutres en C.

Dans ce cas comme dans le cas d'avant on voit des portées surdimensionnées pour des portées inférieures à 4 mètres.

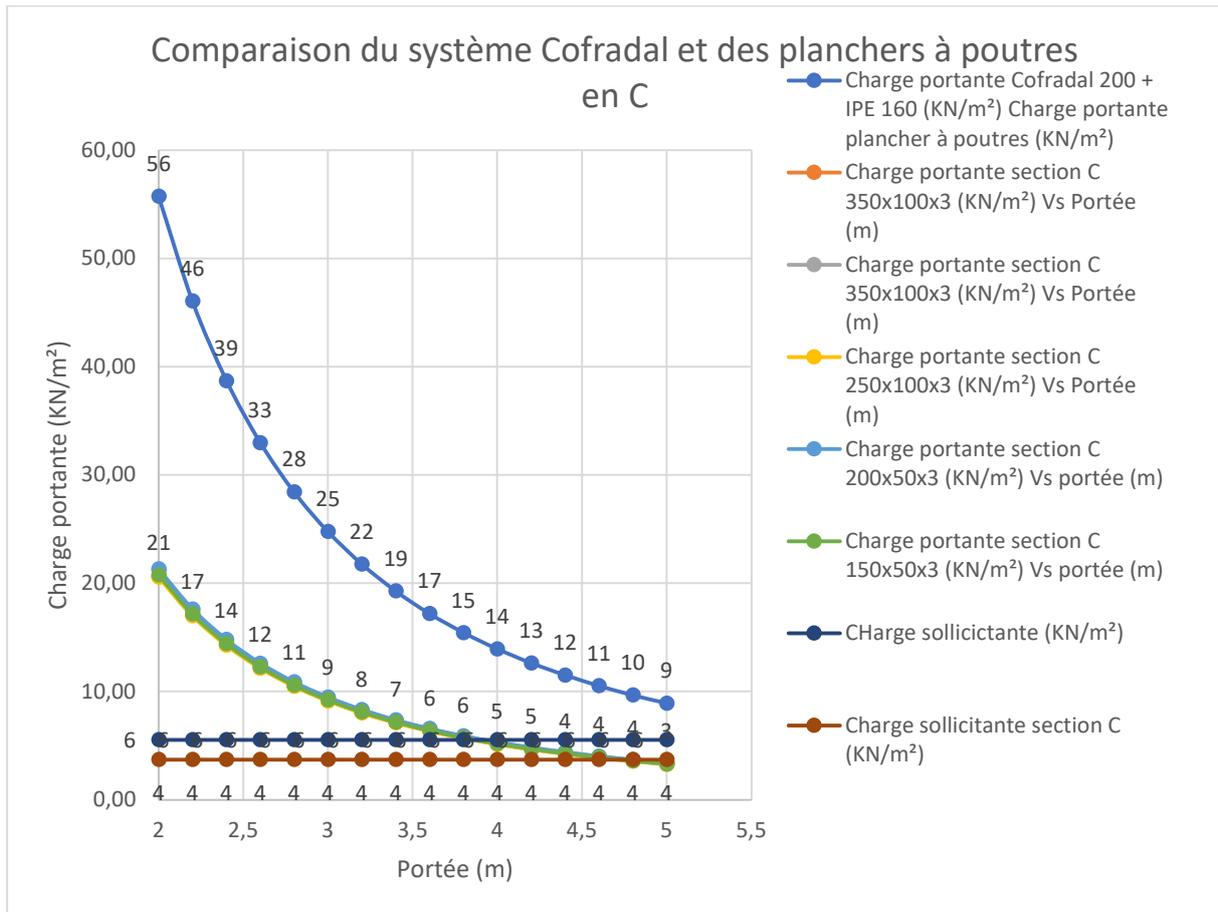


Figure 61. Capacité portante du plancher mixte avec IPE 140 comparé à celle du système de poutres en C

2.6. Modèle numérique sur SCIA Engineering

Ci-dessous, on détaille le modèle de calcul utilisé pour l'analyse du plancher dans le logiciel SCIA ENGINEERING et les résultats obtenus.

2.6.1. Modèle de calcul

Dans le tableau ci-dessous, on répertorie les différents éléments composant le modèle ainsi comme la théorie flexionnelle utilisée pour l'analyse du plancher mixte. Le calcul réalisé est linéaire.

Nombre d'éléments 2D	256
Nombre d'éléments 1D	265
Nombre de nœuds du maillage	394
Nombre d'équations	2364
Théorie flexionnelle pour l'analyse des plaques/coques.	Mindlin

Tableau 30. Donnée concernant le modèle du logiciel SCIA ENGINEERING

Dans le graphique ci-dessous on observe le modèle de calcul utilisé sur le logiciel SCIA ENGINEERING pour évaluer le comportement du plancher mixte d'épaisseur 200 mm composés de panneaux Cofradal 200 assemblés à des profilés IPE 140. Le modèle est composé des 25 poteaux CS2 – IPE 240 qui sont encastés en partie inférieure et articulé en partie supérieure. Ensuite, la stabilité d'ensemble est garantie grâce au plancher mixte. Le plancher mixte a été découpé en quatre parties en libérant les rotations dans les bords de manière à avoir des travées isostatiques. On considère que la liaison entre les profilés en acier IPE 140 et les panneaux Cofradal 200 est totale.

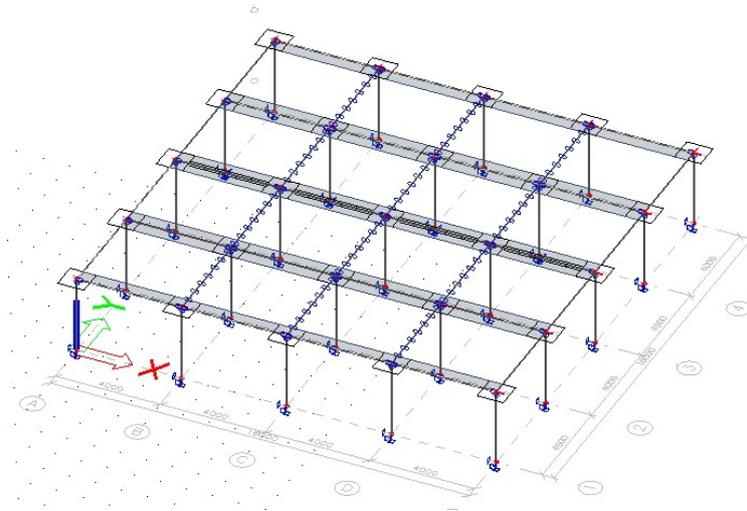


Figure 62. Schéma du modèle numérique analysé

- **Charges exploitation**

Dans le graphique ci-dessous, on montre la charge répartie homogène d'exploitation de 1,50 KN/m².

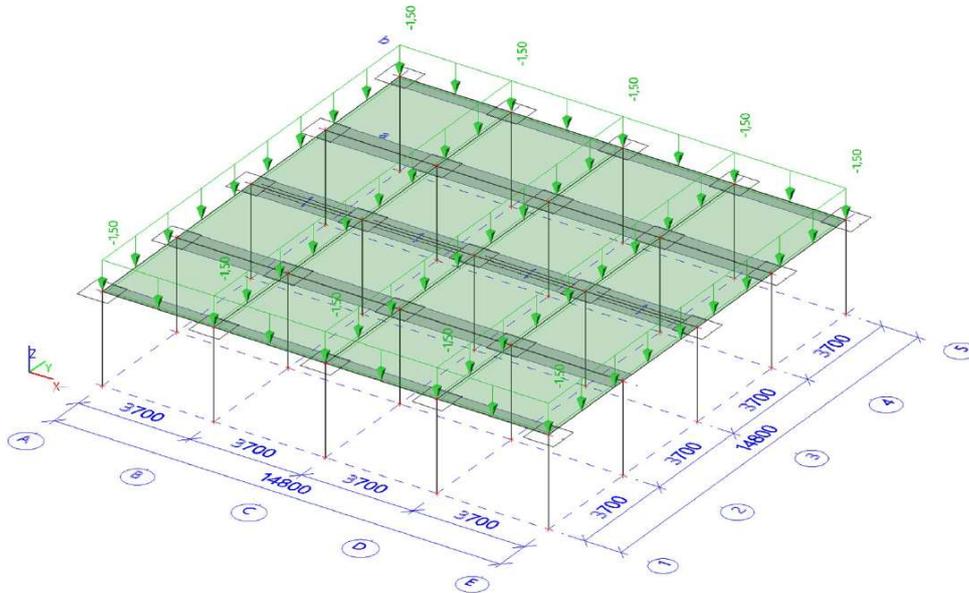


Figure 63. Charge d'exploitation du projet

- **Charge permanente**

Dans le graphique ci-dessous, on montre la charge répartie concernant le poids propre du plancher mixte et la charge permanente qui correspond au carrelage, cloisons, entre autres.

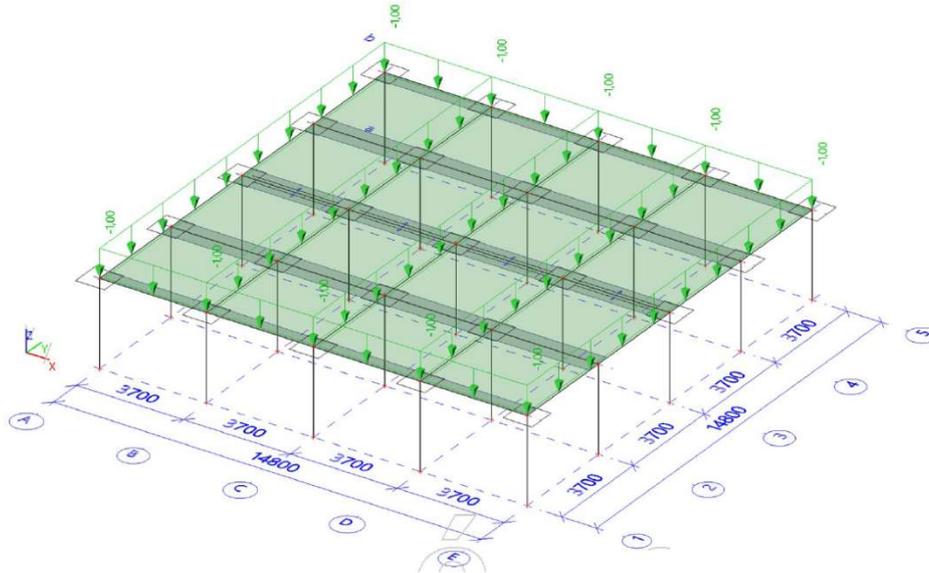


Figure 64. Charge permanente du projet

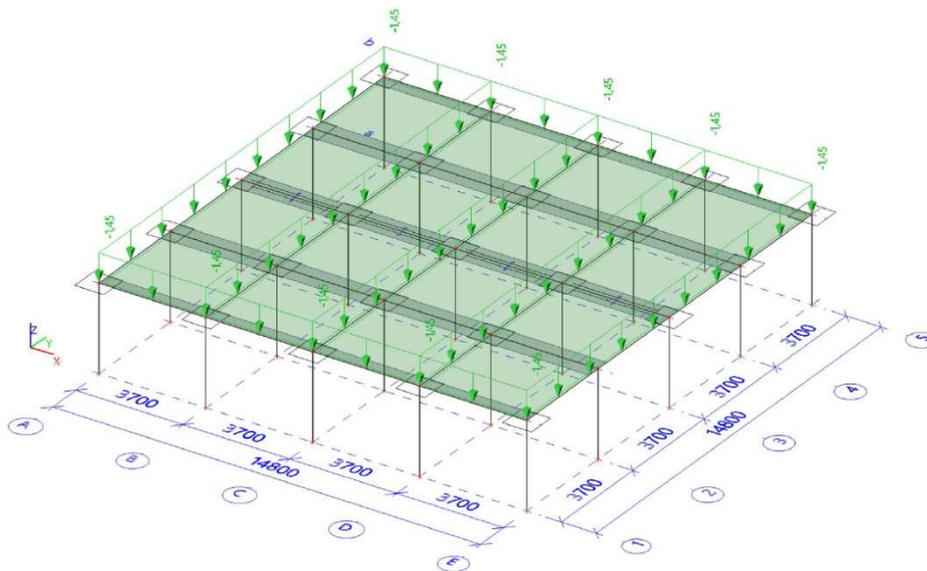


Figure 65. Poids propre du plancher mixte

2.6.2. Résultat de calcul avec le logiciel SCIA ENGINEERING

Dans le graphique ci-dessous, on observe la déformation dans le plancher dû à une combinaison des charges à l'ELS. En sachant que le sens de portée a été défini dans le sens des Y et que les principaux éléments porteurs dans le plancher sont les profilées en liaison parfaite avec le plancher on observe comme attendu une flèche maximale au milieu de poutres mixtes. On obtient dans le modèle numérique d'éléments finis réalisé sur le logiciel SCIA ENGINEERING, une flèche maximale de 4,6 millimètres ce qui représente, pour une portée de 3,7 mètres, 80% de la valeur de la flèche obtenue dans les calculs faits sur Excel et présentés précédemment.

Valeur: u_z
Calcul linéaire
Combinaison: ELS
Extrême: Global
Sélection: Tout
Position: Aux noeuds, moyenne sur macro. Système: SCL maillage EF

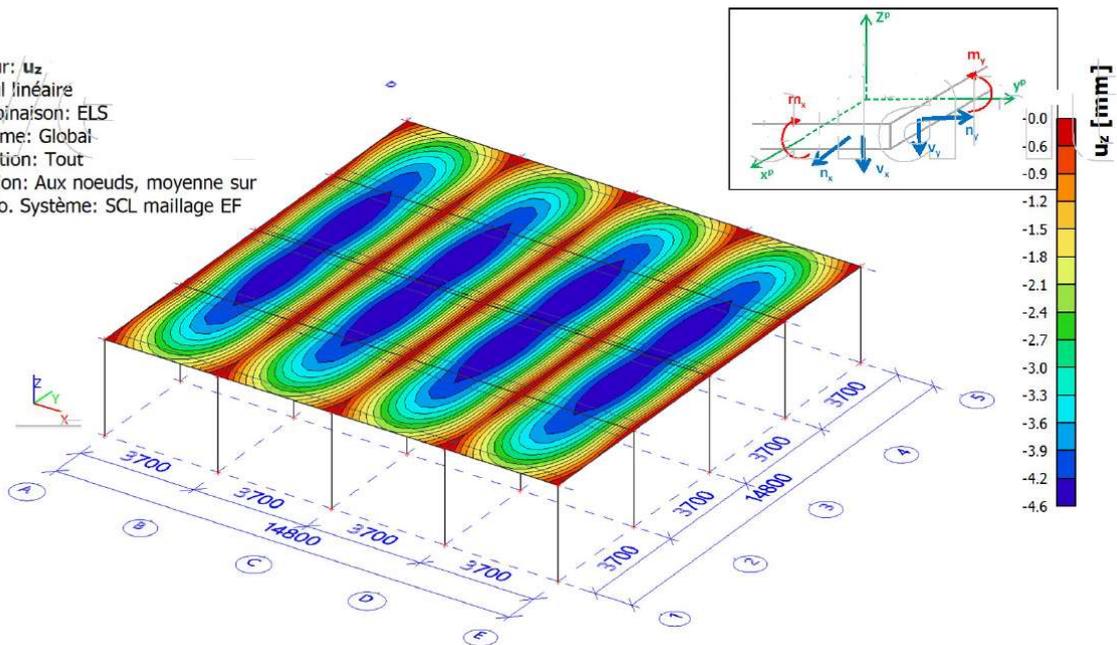


Figure 66. Résultat des déplacements verticaux du plancher en mm

Valeur: v_y
Calcul linéaire
Combinaison: ELU
Extrême: Global
Sélection: Tout
Position: Aux noeuds, moyenne sur macro. Système: SCL maillage EF

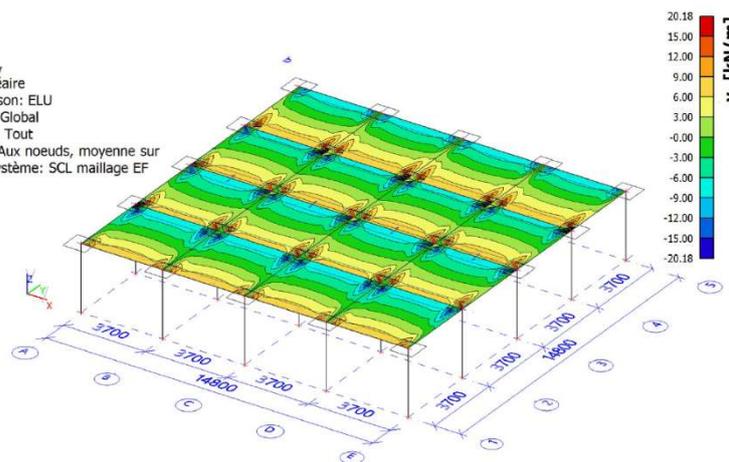


Figure 67. Effort interne v_y en KN dans le plancher mixte

Dans la figure 23, on observe l'effort interne dans la direction Y. On observe des valeurs élevées autour des têtes des poteaux et autour des poutres mixtes définies par les profilés métalliques IPE 140 posé longitudinalement dans le sens des X. autour des poteaux on atteint une valeur de 20,18 KN et autour des poutres mixtes on atteint 9 KN.

Valeur: m_y
Calcul linéaire
Combinaison: ELU
Extrême: Global
Sélection: Tout
Position: Aux noeuds, moyenne sur macro. Système: SCL maillage EF

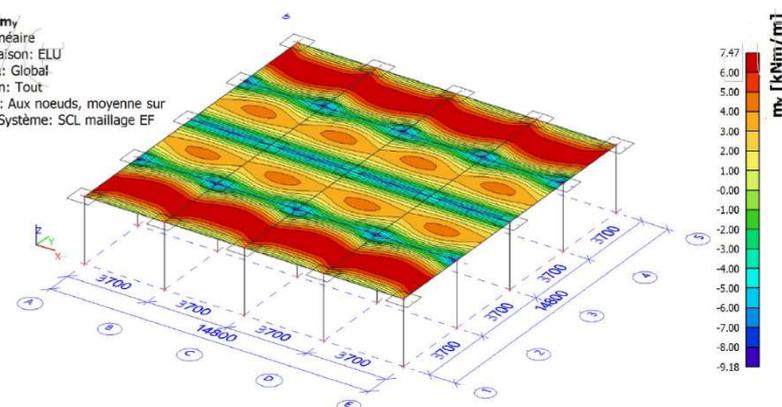


Figure 68. Effort interne m_y en KNm dans le plancher mixte

Dans la figure 24, on observe l'effort du moment fléchissant. On observe qu'on atteint des valeurs maximales négatives autour des têtes des poteaux et poutres mixtes (-9,48 kNm/m), par contre on a des valeurs maximales positives en milieu de travée dans le sens des Y dans la zone rouge (7,47 kNm/m).

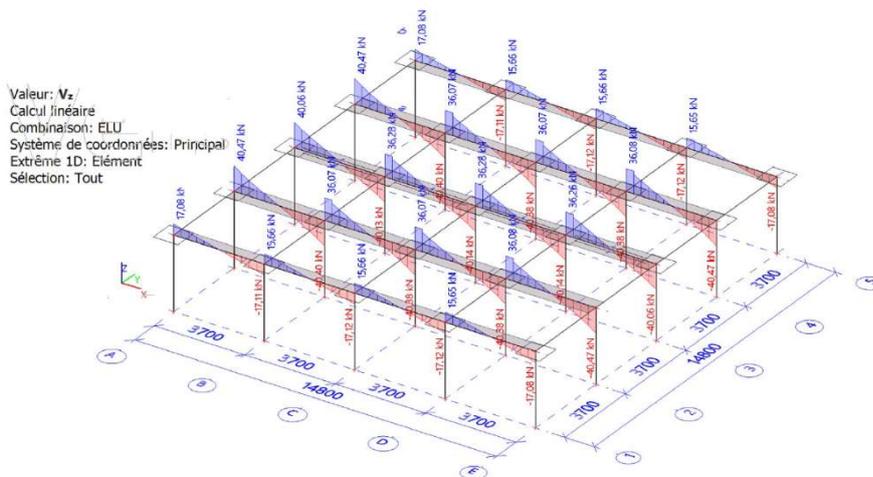


Figure 69. Effort Vz en KN dans les poutres mixtes

Dans la figure 26, on observe l'effort interne tranchant dans la direction Z concernant les poutres mixtes qui sont orientées longitudinalement dans le sens des X. Ces poutres sont isostatiques et supportent un effort tranchant maximal de 17,12 KN.

2.7. Bilan des systèmes analysés

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve un récapitulatif des résultats obtenus dans les analyses précédentes. Ces résultats sont valables pour les charges considérées dans le projet.

Bilan							
Cofradal 200 et 180 seul	Cofradal 200 + IPE 140		Cofradal 200 + IPE 160		Poutres de section en C		Modèle SCIA ENGINEERING
Limitation de flèche	Limitation de flèche	Limitation de capacité portante	Limitation de flèche	Limitation de capacité portante	Limitation de flèche	Limitation de capacité portante	Flèche maximale
Pour 5 m analysés pas de limitation de flèche ni de résistance	7,57 mm pour une portée de 4 m	5,67 KN/m ² pour une portée de 5,8 m	7,51 mm pour une portée de 4,4 m	5,80 KN/m ² Pour une portée de 6,2 m	6,18 mm pour une portée de 3,7 m	3,9 KN/m ² pour une portée de 4,6 m	4,6 mm pour une portée de 3,7 m

Tableau 31. Bilan des solutions de planchers évalués

D'après les résultats obtenus on peut conclure que les plancher Cofradal présente des performances mécaniques permettant de l'utiliser pour des portées supérieures à 5 mètres. Si l'on combine le plancher Cofradal avec des poutres IPE 140 ou 160 pour former des plancher mixtes, alors la portée du système peut diminuer à des valeurs autour de 4 mètres.

3. Plancher sec

En considérant que précédemment on est arrivé à la conclusion que les planchers composites Cofradal 200 et Cofradal 180 présentent des capacités portantes et des portées assez larges, supérieures à 5 mètres. Dans cette partie, on évaluera la pertinence d'utilisation des planchers secs, comme celui

appelé Supportsol par exemple. On évaluera la capacité portante et la flèche développée en considérant les charges de sollicitation du projet.

3.1. Plancher Supportsol 170

Dans le graphique ci-dessous, on a une vue en coupe transversale du système de plancher sec Supportsol 170. Celui-ci sera analysé dans les parties qui suivent pour évaluer sa capacité portante maximale tout en respectant la flèche limite de 1/500ème de la portée.



Figure 70. Vue transversale du plancher sec Supportsol 170

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve le modèle transversal de la section de la tôle métallique nervurée du plancher.

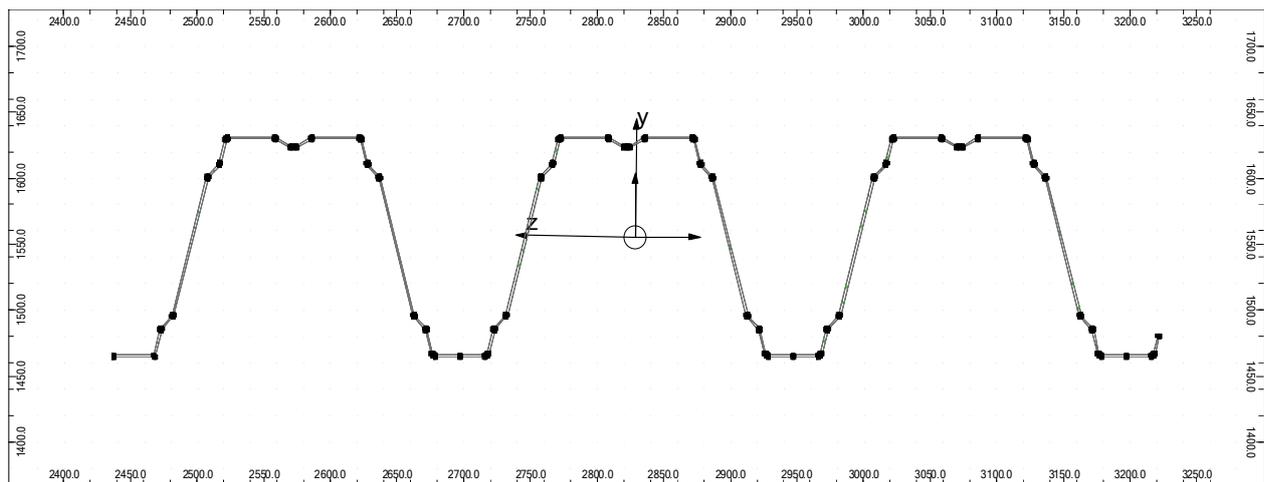


Figure 71. Modèle robot de la section du plancher Supportsol 170

Ci-dessous les caractéristiques géométriques, physiques et mécaniques de la tôle métallique nervurée.

Caractéristiques géométriques	Matériau	Moments d'inertie
<ul style="list-style-type: none"> Aire de la section À = 19.17 cm² Centre de gravité Y_c = 2828.6 mm Z_c = 1555.5 mm Périmètre S = 3069.7 mm 	<p>ACIER E = 210000.00 MPa dens. = 7852.83 kg/m³ p.un. = 15.05 kG/m</p>	<p>I_x = 0.00 cm⁴ I_y = 9658.62 cm⁴ I_z = 688.05 cm⁴</p>

Tableau 32. Caractéristiques de la section

3.1.1. Calcul du facteur de correction

Facteur qui prend en compte la variabilité de la limite élastique et des épaisseurs dans les tôles métalliques.

Pour les plaques nervurées ou les plateaux pour lesquels les parois comprimées présentent des rapports $\frac{b_p}{t}$ tel que le flambement local constitue clairement le mode de ruine : $\alpha = 0,5$.

Pour les essais sur des plaques nervurées ou des plateaux : $\beta = 2$.

$$u_R = \left(\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}} \right)^\alpha \left(\frac{t_{obs,cor}}{t_{cor}} \right)^\beta \quad (1)$$

$$f_{y,obs} > 75\% f_{yb} \quad (2)$$

$$t_{obs,cor} < 112\% f_{yb} \quad (3)$$

$$U_R = 0,69 \quad (4)$$

3.1.2. Fiche produit

Dans le graphique ci-dessous on retrouve la capacité portante du plancher sec Supportsol 170 en considérant la limitation de flèche à 1/300ème de la portée. Les capacités portantes sont exprimées en daN/m².

Épaisseur du profil (mm)				Portée (m)
0,75	0,88	1,00	1,25	
740	873	1002	1260	1,90
695	821	945	1188	2,00
656	774	893	1123	2,10
619	731	846	1064	2,20
586	692	802	1010	2,30
556	657	763	960	2,40
528	624	726	914	2,50
502	593	693	872	2,60
478	565	661	833	2,70
456	539	632	797	2,80
435	515	606	764	2,90
416	493	580	732	3,00

Tableau 33. Capacité portante en fonction de la portée et des épaisseurs de profil

Dans la figure 27, on retrouve l'évaluation de la flèche développée pour des charges et des portées données par le système de plancher Supportsol 170. Les valeurs de flèche attendues à chaque portée est la flèche limite à 1/300ème de la portée.

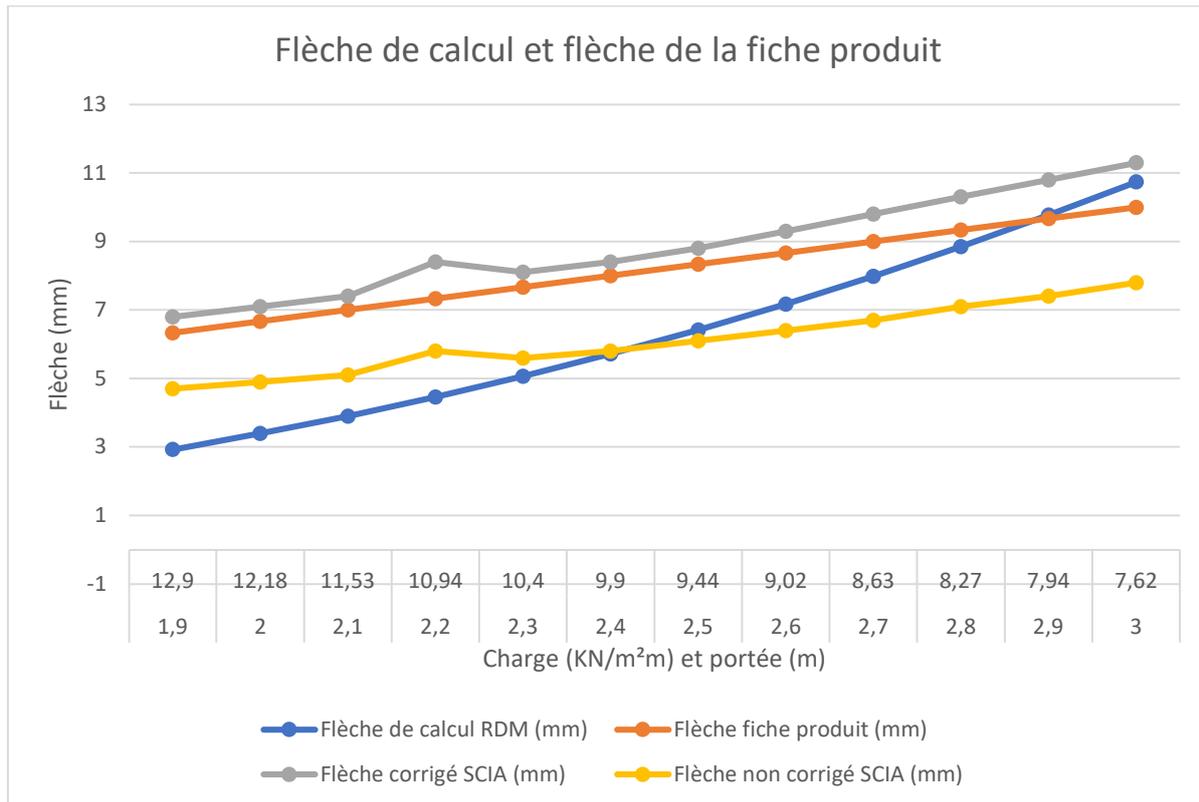


Figure 72. Estimation de flèche pour des chargements et portées données selon différentes méthodes

Dans la figure ci-dessus on voit que la meilleure estimation de la flèche par rapport aux données de la fiche produit est celle réalisée avec le logiciel SCIA ENGENERING. Le calcul réalisé sur ce logiciel est celui du trait gris. Les calculs réalisés incluent un coefficient de correction prenant en compte les variations d'épaisseur des tôles métalliques nervurées et la variabilité des limites élastiques. Ce coefficient de correction est défini dans la partie 3.1.1 du rapport.

Le calcul réalisé avec le logiciel SCIA et représenté dans le trait gris et est sécuritaire, car surestime légèrement la flèche développée par le plancher sous un chargement donné dans la fiche produit.

Donc dans la suite on calculera la flèche développée par le plancher sous le chargement défini pour le projet et en considérant une limitation de flèche à 1/500ème de la portée. En sachant que l'estimation réalisée par modélisation et calcul réalisé sur le logiciel SCIA est la meilleure, on prendra cette méthode pour déterminer une contrainte de portée maximale. Cependant, on réalisera la modélisation du plancher et l'estimation de la flèche avec d'autres logiciels et méthodes pour faire à la fin une comparaison.

3.2. Calcul de la flèche corrigé sur SCIA

Dans le graphique ci-dessous on retrouve les déplacements verticaux dans le plancher Supportsol 170 qui a été modélisé sur le logiciel SCIA. On a réalisé le calcul pour différentes portées et en considérant des travées isostatiques.

Valeur: u_z
Calcul linéaire
Cas de charge: Charge fiche produit
Extrême: Elément
Sélection: Tout
Position: Aux noeuds, moyenne sur macro. Système: SCL maillage EF

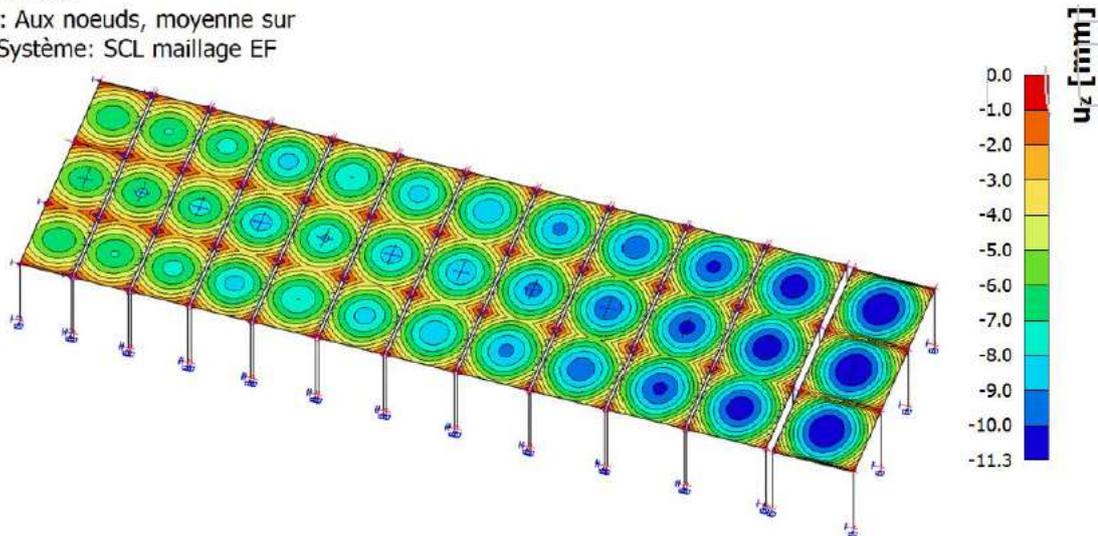


Figure 73. Calcul sur SCIA pour différentes portées avec les charges du projet

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve les flèches développées selon les portées et sous chargement du projet. On retrouve, d'après les calculs et l'estimation de la flèche réalisés par cette méthode, une flèche maximale de 1/500^{ème} et une limitation de la portée de 3 mètres.

Logiciel SCIA				
Portée (m)	Flèche (mm)	Flèche limite (mm)	limite	Vérification
1,9	1,6	3,8		OK
2	1,8	4		OK
2,1	2	4,2		OK
2,2	2,2	4,4		OK
2,3	2,4	4,6		OK
2,4	2,6	4,8		OK
2,5	2,9	5		OK
2,6	3,2	5,2		OK
2,7	3,5	5,4		OK
2,8	3,8	5,6		OK
2,9	4,2	5,8		OK
3	4,6	6		OK
4	11	8		PAS OK
5	23,8	10		PAS OK

Tableau 34. Comparatif entre la flèche calculée par le logiciel SCIA et la flèche limite

3.3. Calcul de la flèche corrigé sur ANSYS

Ci-dessous, on retrouve la modélisation par éléments finis réalisés sur le logiciel ANSYS. Le modèle numérique réalisée sur le logiciel ANSYS, à différence des données du fabricant et de la modélisation sur le logiciel SCIA, prene en compte la rigidité apportée par les panneaux en aggloméré de bois, car il a fallu inclure ces panneaux pour bien distribuer le chargement sur la tôle métallique nervurée. Le déplacement vertical sous chargement pour une portée de 2,5 mètres.

La flèche maximale développée par le modèle de plancher sec Supportsol 170 avec cette modélisation, pour une portée de 2,5 mètres et avec les charges du projet est de 2,08 millimètres.

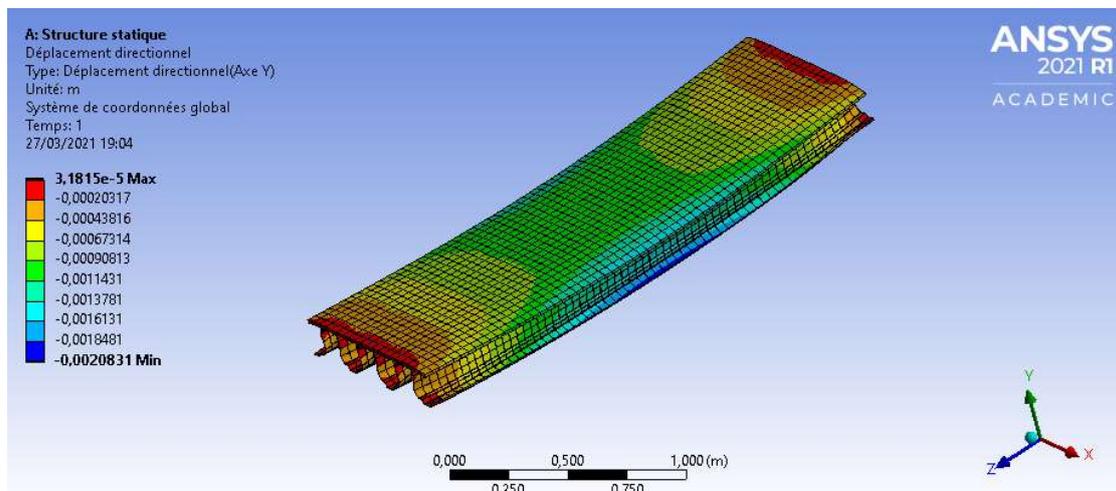


Figure 74. Calcul par éléments finis sur ANSYS pour une portée de 2,5 mètres

Dans la figure ci-dessous on retrouve la modélisation du même plancher, sous le même chargement et pour une portée de 5 mètres. La flèche maximale qu'on retrouve sous cette configuration est de 16,68 millimètres.

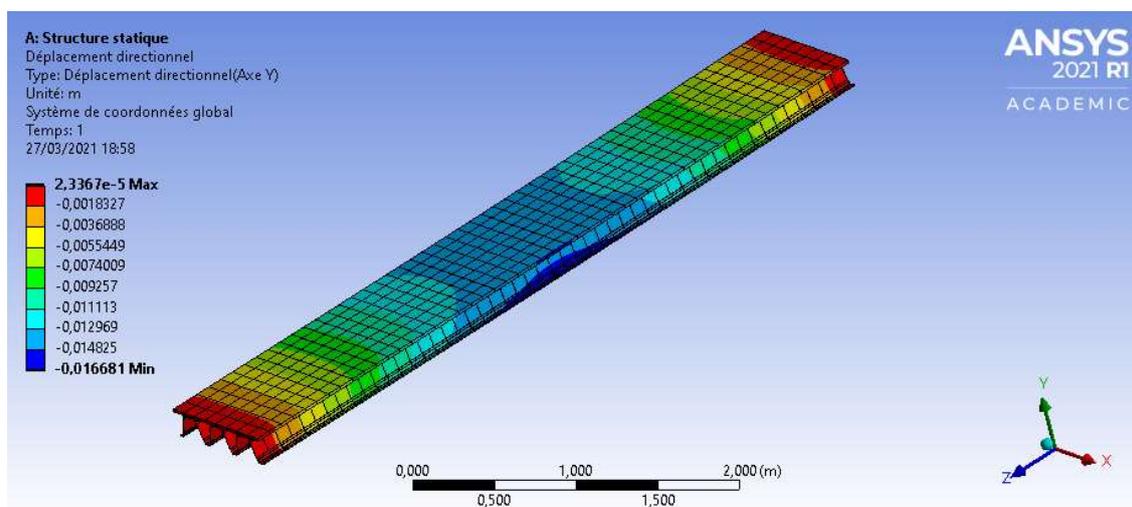


Figure 75. Calcul par éléments finis sur ANSYS pour une portée de 5 mètres

Comme on peut s'apercevoir on retrouve des valeurs de flèche inférieures à celles retrouvées dans le calcul réalisé sur le logiciel SCIA. Cela peut être dû au fait que le logiciel SCIA prend seulement en compte les tôles métalliques nervurées dans le calcul et l'on néglige le possible apport des panneaux en bois. À différence sur ANSYS les panneaux de bois qui nous servent bien distribuer le chargement et qui sont considérés comme parfaitement liés à la tôle.

3.4. Calcul flèche RDM

Dans le graphique ci-dessous, on montre l'estimation de la flèche selon la méthode de la résistance des matériaux. La courbe en bleu représente la flèche en fonction de la portée calculée et la courbe en gris montre la flèche en fonction de la portée après intégration du coefficient de correction définie dans la partie 3.1.1 du rapport, ce coefficient concerne la variabilité des épaisseurs et de la limite d'élasticité qui peut affecter les mesures de caractérisation de laboratoire réalisés sur les tôles métalliques nervurées.

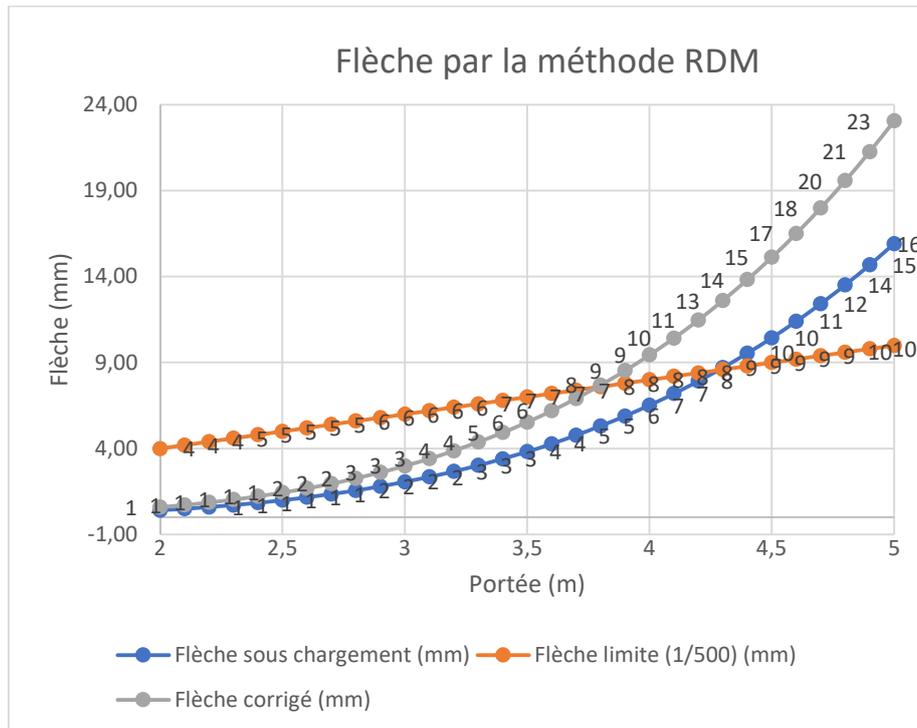


Figure 76. Flèche maximale selon les charges du projet et différentes portées

3.2. Comparaison des méthodes de calcul

Dans le graphique ci-dessous on a tracé l'estimation de la flèche développée par le plancher Supportsol 170 sous charges du projet. On peut voir l'évolution de la flèche en fonction de la portée. Ainsi on a en trait bleu l'estimation de la flèche selon la méthode de la résistance des matériaux et en considérant comme section résistante seulement la tôle métallique nervurée.

Dans la courbe en jeune on retrouve l'estimation de la flèche réalisée avec le logiciel de modélisation par éléments finis ANSYS, sur ce logiciel la flèche est sous-estimée du fait qu'il prend en compte la rigidité de panneau en aggloméré bois situé dans la partie supérieure du plancher.

Finalement, la courbe en gris représente l'estimation de la flèche selon la modélisation réalisée sur le logiciel SCIA. Cette méthode s'est révélée plus exacte et même plus sécuritaire dans la vérification réalisée dans la partie précédente avec les données fournies par le fabricant dans la fiche produit.

Le trait orange représente la flèche limite pour chaque portée et égale à $1/500^{\text{ème}}$ de la portée. On voit que la portée maximale avec le plancher Supportsol 170, en considérant les charges du projet, se situe autour de 3,20 mètres.

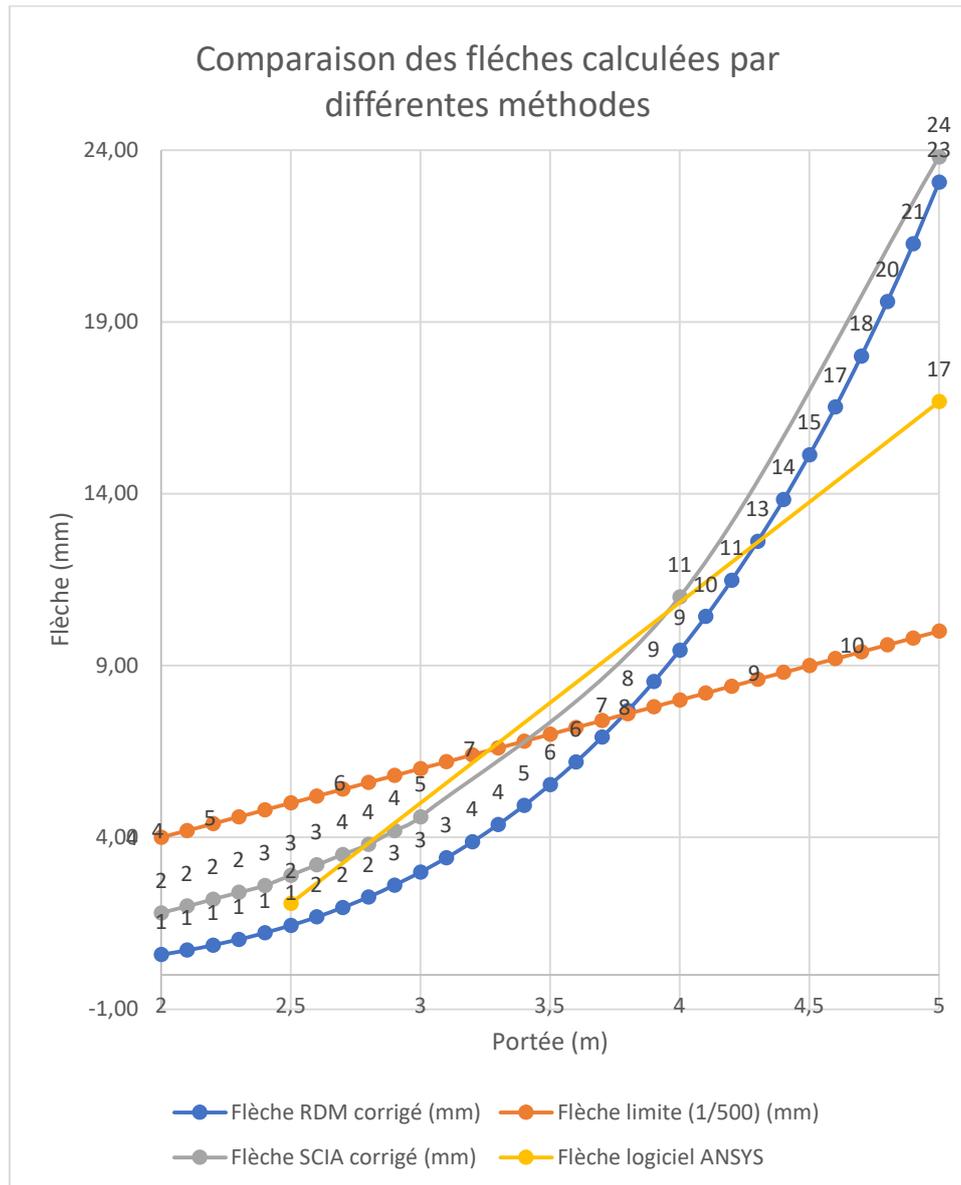


Figure 77. Comparaison de différentes méthodes de calcul

3.3. Conclusion

En considérant que le calcul réalisé sur le logiciel SCIA ENGINEERING se rapproche le plus des résultats quand on évalue les valeurs de capacité portante fournies par le fabricant, on choisit cette méthode pour évaluer les charges concernant le projet. Donc après analyse sur le logiciel SCIA en se fixant la flèche maximale à 1/500^{ème} de la portée on retrouve une portée maximale de 3 mètres pour le plancher analysé.

La méthode RDM et la modélisation sur le logiciel ANSYS sous-évaluent la flèche par rapport à ce qui est attendu dans la fiche des performances mécaniques fournies par le fabricant. Dans le cas du modèle sur ANSYS, cela peut être dû au fait que le logiciel prend en compte la rigidité du panneau aggloméré bois du plancher alors que les données fournies par le fabricant prennent en compte seulement la rigidité de la tôle nervurée. D'autre part, la sous-évaluation dans le modèle RDM peut être due au fait que ce modèle ne prend pas en compte des instabilités qui peuvent se créer.

Partie III

Dans cette partie, on proposera et évaluera les performances des planchers Cofradal et Supportsol. On commence par une étude approfondie concernant un des critères nécessaires pour la définition des planchers destinée à la construction des logements en surélévation, ce critère correspond à l'indice d'affaiblissement acoustique et plus précisément par rapport aux bruits roses qui se produisent à l'intérieur des logements. Cette propriété acoustique sera fournie principalement par le plafond, donc on proposera différents systèmes de plafond pour arriver à faire une classification donnant les performances acoustiques, l'épaisseur et le poids par rapport à chaque système.

Ensuite, on évaluera les systèmes des planchers choisis par rapport à sa résistance au feu. Cette évaluation se fera en considérant que les planchers non protégés et avec différents types de protection, en se basant sur les matériaux choisis dans l'étape précédente correspondant au choix des systèmes de plafond. Les planchers seront analysés pour une exposition à un feu ISO 834 pendant 60 minutes.

Finalement, on présentera une conclusion, montrant les différents systèmes de planchers analysés et ses avantages correspondants.

4. Validation de la modélisation des plafonds sur INSUL

Ci-dessous, on montre la comparaison entre les résultats obtenus avec le logiciel de calcul acoustique INSUL et les valeurs de référence trouvées dans la documentation pour chaque type de parois.

		Système de parois	Calcul logiciel INSUL	Données de référence
Indice d'affaiblissement acoustique	Parement simple	1	41	42
		2	39	41
		3	40	42
		4	42	43
	Parement double	1	50	50
		2	52	51

Tableau 35. Estimations du logiciel INSUL et données fournies par « Acoustical Expert – VK Group »

On a évalué deux grands systèmes d'isolation acoustiques des parois, un avec des parements simples et un autre avec des parements doubles. On observe que les résultats fournis par le logiciel de calcul acoustique INSUL estiment l'indice d'affaiblissement acoustique de manière assez fiable, on a des décalages en surestimation ou en sous-estimations de 1 dB par rapport aux données de référence.

Donc, dans la suite pour s'assurer d'estimer la valeur d'affaiblissement acoustique la plus juste possible, on peut systématiquement diminuer d'un décibel les valeurs fournies par le logiciel INSUL.

Le graphique ci-dessous nous permet de comparer les estimations du logiciel INSUL par rapport aux données de référence qui sont répertoriées dans les annexes avec le détail du calcul dans le logiciel.

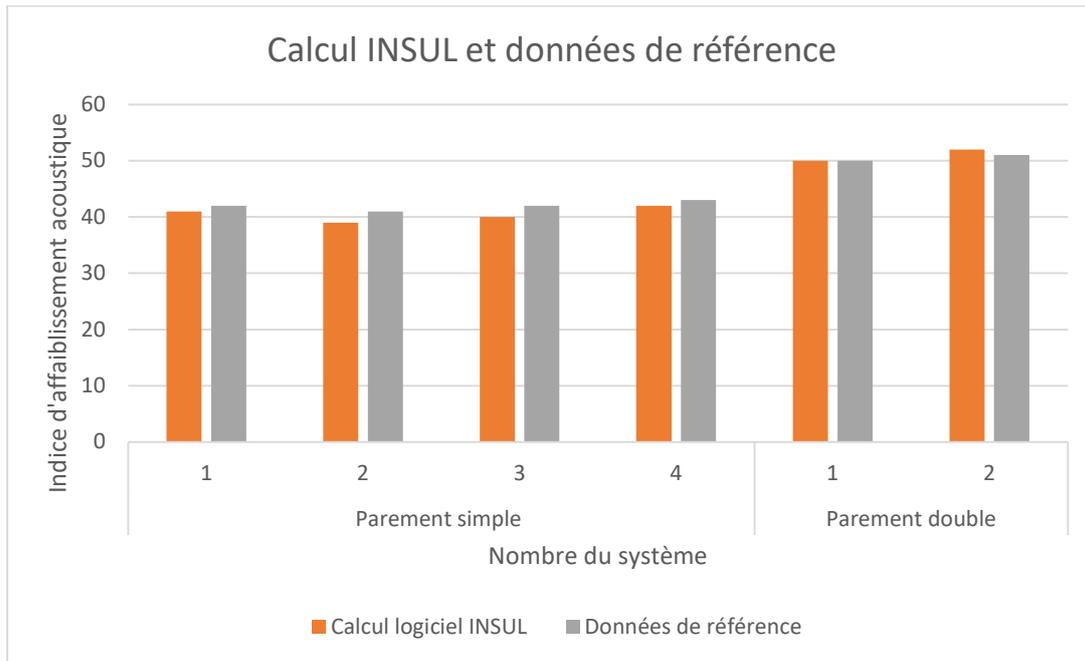


Figure 78. Comparaison des calculs sur le logiciel INSUL par rapport aux données de référence

5. Proposition et analyse des systèmes de plafond

Les plafonds ci-dessous ont été obtenus à partir de l'évaluation de ses performances en isolation acoustique évaluée avec le logiciel INSUL 9.0 et de ses performances en résistance au feu, égale au moins à EI60 vérifié dans un catalogue du fabricant des panneaux choisis sur le logiciel INSUL.

5.1. Plafond à une lame d'air

Ci-dessous, on montre un système à poutres en C et rail, c'est un extrait de l'étude sur le logiciel INSUL. Le détail de l'analyse de ce plafond se trouve dans les annexes et l'étude faite pour les autres systèmes de plafond c'est analogue à celui-ci.

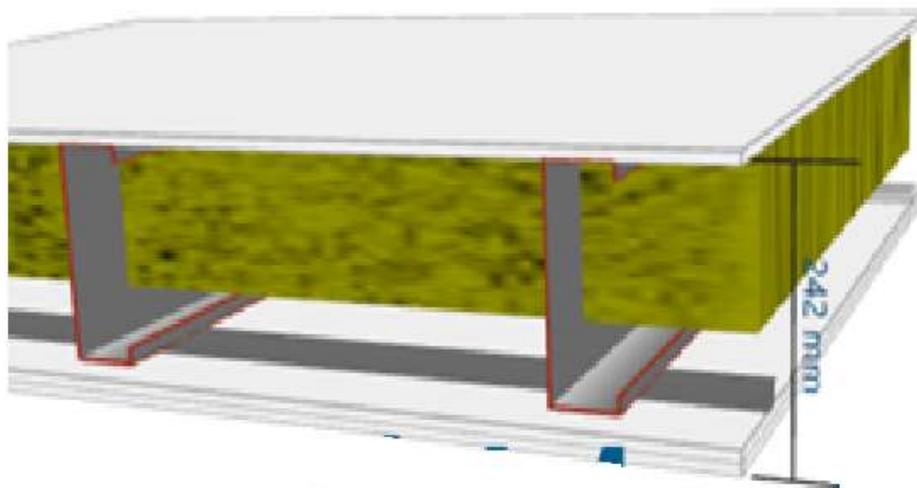


Figure 79. Exemple de plafond à poutres en C

Ci-dessous, on répertorie les six systèmes de plafond évalués avec ses respectifs indices d'affaiblissement acoustique.

Systèmes de plafond proposés					
Plafond suspendu		Plafond suspendu		Plafond à poutres en C	
Avec panneaux Fermacell	Avec panneau en plaque de plâtre	Avec système antivibrations type 1	Avec système antivibrations type 2	Avec panneaux Fermacell	Avec panneaux en plaque de plâtre
Indice d'affaiblissement acoustique					
Rw = 59 dB	Rw = 58 dB	Rw = 58 dB	Rw = 58 dB	Rw = 59 dB	Rw = 58 dB

Tableau 36. Systèmes de plafond proposés

Dans le tableau ci-dessous, on a répertorié trois systèmes de plafond, les plafonds suspendus standards, les plafonds suspendus avec système antivibrations et les plafonds incorporés dans un système à poutre en C. Pour tous ces systèmes, on a fait varier certains matériaux, notamment concernant les panneaux et le matériau isolant situé entre deux panneaux.

Du fait que ces systèmes de plafond seront utilisés avec des planchers secs dans la construction de logements d'habitation, on a cherché à obtenir un indice d'affaiblissement acoustique égal ou supérieur à 58 décibels. Donc tous les systèmes de plafond proposés sont assez performants du point de vue acoustique, mais du fait qu'ils sont réalisés avec de différents matériaux on évaluera aussi d'autres critères comme le poids et l'épaisseur de ces systèmes.

La valeur cible de 58 décibels correspond la valeur d'affaiblissement acoustique établit comme contrainte du projet dans le but de garantir un confort adéquat par rapport à la transmission des bruits entre deux pièces ou deux étages.

Ci-dessous les six plafonds proposés après l'analyse réalisée à l'aide du logiciel d'acoustique INSUL. On répertorie les différents plafonds avec les trois principaux critères qu'on a choisis pour les classer.

Solution		Critère		
		Affaiblissement acoustique R_w (dB)	Poids (kg/m ²)	Épaisseur (mm)
1. Plafond à suspente métallique – panneau Fermacell	Couche			
	1	Fermacell	30	11,5
	2	Fibreglass + suspente métallique		70
	3	Fermacell	37	34,5
Total			59	46,8
2. Plafond avec suspente métallique - panneau placoplâtre	Couche			
	1	Plaque de plâtre	27	9
	2	Cavity width + Fiberglass		150
	3	Plaque de plâtre	33	23,7
Total			58	33,9
3. Système de plancher à poutres en C + rail – panneau placoplâtre	Couche			
	1	Plaque de plâtre	27	9
	2	Cavity width + Fiberglass		212
	3	Plaque de plâtre	34	32,4
Total			58	43,2
4. Système de plancher à poutres en C + rail – panneaux Fermacell	Couche			
	1	Fermacell	30	11,5
	2	Cavity width + Fiberglass		212
	3	Fermacell	36	23
Total			59	36
5. Système de plafond à panneaux Fermacell et suspentes akustik + sylomer 1	Couche			
	1	Fermacell	30	11,5
	2	Cavity width + Fiberglass		110
	3	Fermacell	37	28,8
Total			58	41
6. Système de plafond à panneaux Fermacell et suspentes akustik + sylomer 3	Couche			
	1	Fermacell	30	11,5
	2	Cavity width + Fiberglass		110
	3	Fermacell	37	28,8
Total			58	41

Tableau 37. Caractérisation de différents systèmes de plafond

5.2. Plafond à double lame d'air

Le modèle ci-dessous réalisé dans le logiciel INSUL présente les composantes suivantes :

1x22 mm Panneau de particules orientées (OSB4) + Poutres métalliques en C + rail résilient (200 mm x 75 mm), première lame d'air de 212 mm dont 100 mm Laine de verre semi-rigide + 2x12,5 mm Fermacell ou Plaque de plâtre + Suspentes Akustik + Sylomer 3 (AMC) (-160 mm x 50 mm), deuxième lame d'air de 40 mm et 1x12,5 mm Panneau Fermacell ou Plaque de plâtre.

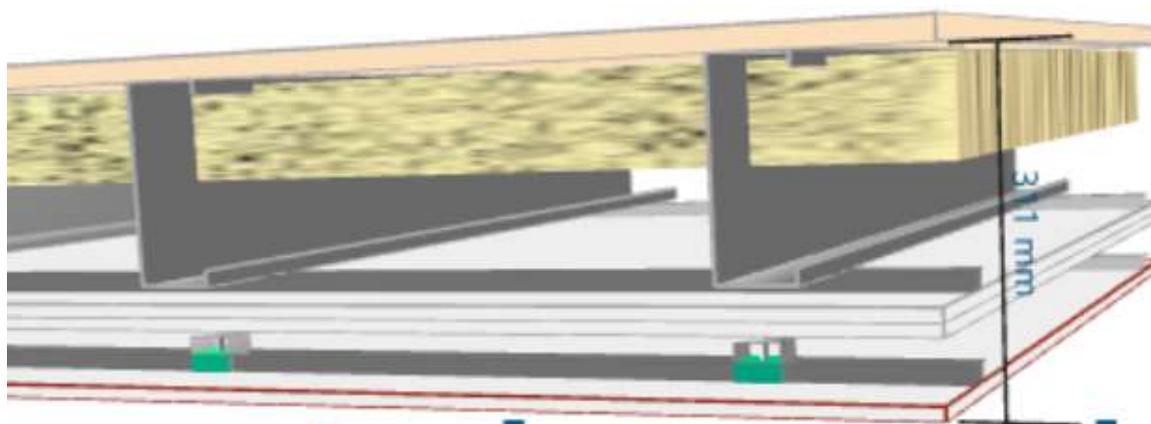


Figure 80. Exemple de plafond à poutres en C avec double lame d'air

Dans le tableau ci-dessous, on répertorie les deux systèmes de plafond à double lame d'air proposés. On les analyse par rapport aux mêmes critères que les systèmes de plafond précédents (à une seule lame d'air).

Solution		Critère			
		Affaiblissement acoustique R_w (C) (dB)	Poids (kg/m ²)	Épaisseur (mm)	
Système à poutres en C à double lame d'air	1	OSB	28	14,1	22
	2	Profilés en C et laine de verre			100
	3	Plaque de plâtre BA 13	33	18	2x12,5
	4	Suspentes Akustik + sylomer 3			40
	5	Plaque de plâtre BA 13	27	9	12,5
	Total			58 (-3)	44,8
	Couche				
	1	OSB	28	14,1	22

Système à poutres en C à double lame d'air.	2	Profilés en C et laine de verre			100
	3	Panneau Fermacell	37	28,8	2x12,5
	4	Suspentes Akustik + sylomer 3			40
	5	Panneau Fermacell	31	14,4	12,5
Total			61 (-3)	57,3	311

Tableau 38. Systèmes de plafond à double lame d'air

Il faut noter que la valeur réelle d'affaiblissement acoustique est définie quand on prend en compte le facteur d'adaptation C, donc $R_w + C$. Le calcul du facteur d'adaptation est détaillé dans les annexes.

6. Comparaison des systèmes de plafond

Dans le diagramme de barres ci-dessous on retrouve les six systèmes de plafond pour lesquels on a étudié ses performances en isolation acoustique avec le logiciel INSUL. Cette étude a été réalisée dans le but de garantir un indice d'affaiblissement acoustique adéquat pour des systèmes de plancher sec comme le Supportsol 170 par exemple. Concernant la résistance au feu REI 60, on considère qui est garanti grâce à de doubles panneaux en plaque de plâtre ou Fermacell qui sont situés en partie inférieure des systèmes de plafond. On compare les plafonds par rapport à ces capacités d'affaiblissement acoustiques brutes R_w .

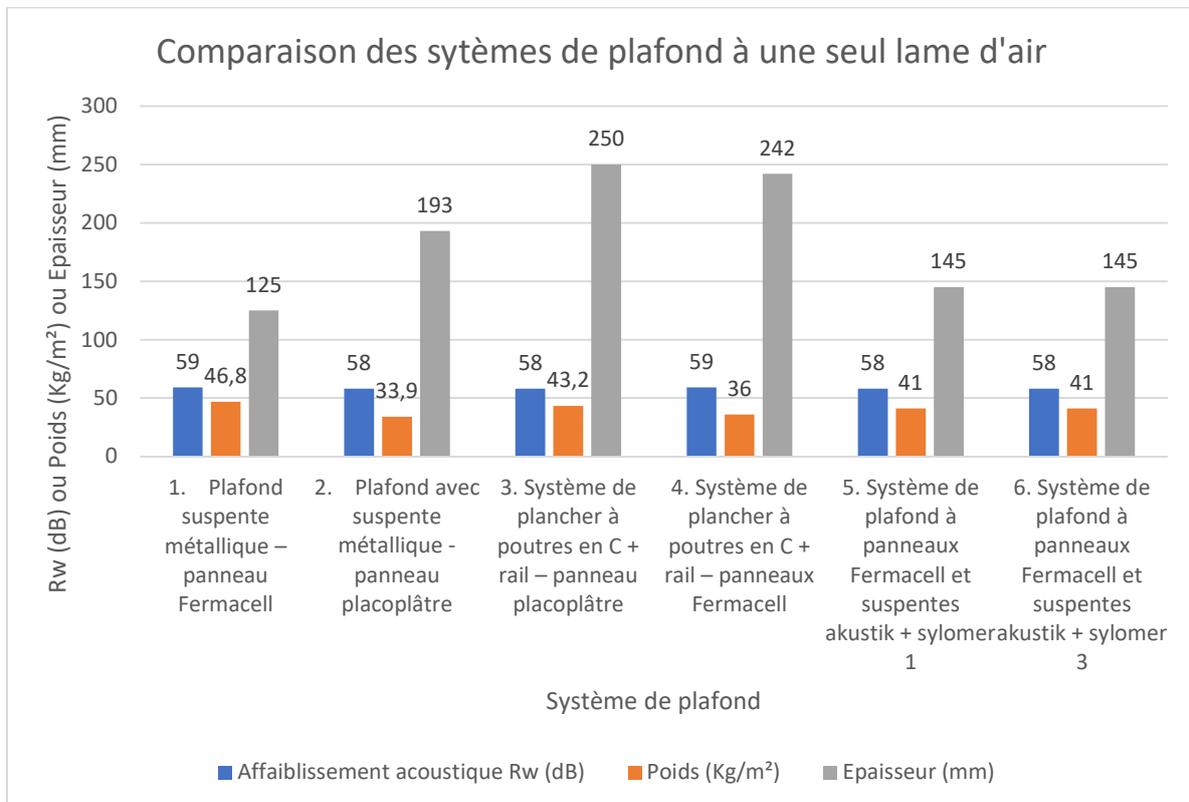


Figure 81. Comparaison des systèmes de plafond à une seule lame d'air

Dans le schéma ci-dessous on retrouve une comparaison sous les mêmes critères sous lesquels ont été comparés les six plafonds précédents, mais dans ce cas il s'agit des systèmes de plafond à double lame d'air, comme montré dans la figure 2. Dans le graphique, on considère les capacités d'affaiblissement acoustique brutes R_w des plafonds.

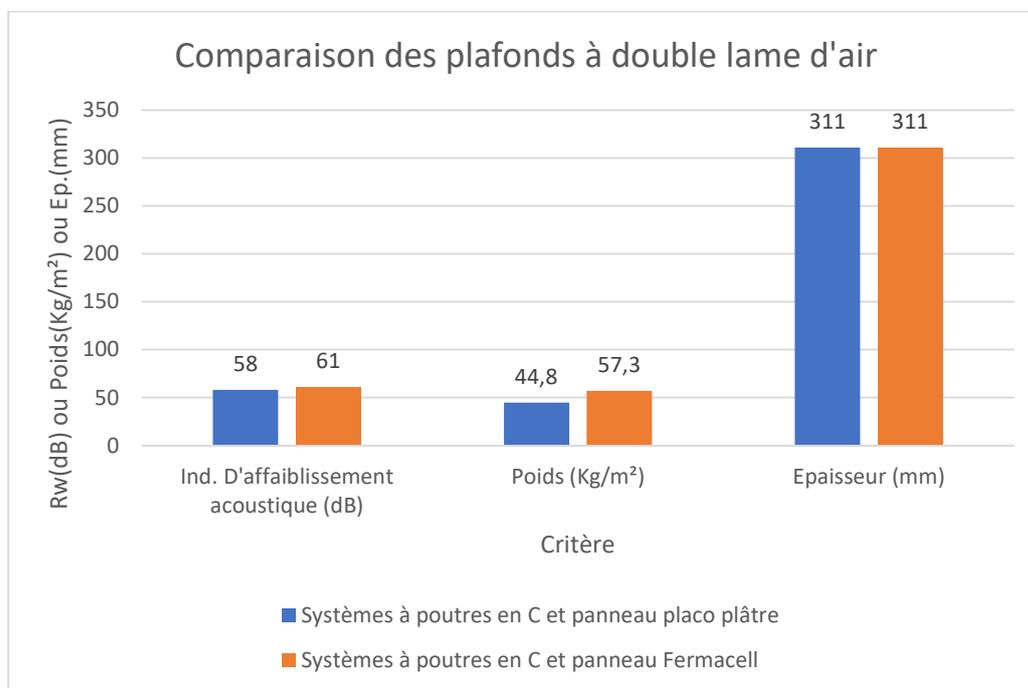


Figure 82. Comparaison des systèmes à double lame d'air

7. Conclusion

Pour les systèmes à une seule lame d'air, d'après l'analyse réalisée, on observe qu'en fonction des trois critères qu'on a évalué, le système de plafond qui présente le moindre poids, la moindre épaisseur et un affaiblissement acoustique égal ou meilleur aux autres c'est le premier système de plafond composé par des panneaux Fermacell à suspentes métalliques.

Dans les systèmes à double lame d'air, on voit que pour des épaisseurs équivalentes à 311 millimètres, le système de plafond avec des panneaux en plaque de plâtre est 12,5 kg plus légers par rapport au plafond avec des panneaux Fermacell, mais de la même façon présente un indice d'affaiblissement acoustique moins bon de 3 dB par rapport au système avec des panneaux Fermacell. Donc dans ce cas on pourrait choisir entre les deux types en fonction des contraintes à privilégier, soit celles d'une isolation acoustique supérieure ou de la légèreté du plafond.

8. Étude de la résistance au feu des planchers

Ci-dessous, on présente l'analyse réalisée concernant le comportement des systèmes de planchers en situation d'incendie, exposés à un feu paramétrique ISO 834. L'analyse thermique dans la section des planchers a été réalisée avec le logiciel de modélisation par éléments finis Abaqus.

8.1. Validation de la modélisation sur Abaqus

Pour l'analyse de la résistance au feu des systèmes de planchers proposés y compris les plafonds, on a été amené à réaliser des modèles numériques de transfert de chaleur dans le but d'obtenir les températures à travers la section du plancher analysé. Ainsi on a réalisé des modèles par éléments finis sur le logiciel pour chaque type de plancher.

Tout d'abord, on a commencé en réalisant un modèle simple et dont les résultats sont connus pour pouvoir comparer avec les résultats obtenus dans le logiciel Abaqus. Donc on a modélisé une section de béton de 100x100 mm exposé à un feu paramétrique ISO 834 pendant 60 minutes. Ensuite, on a comparé l'évolution de la température à travers la section du béton par rapport aux données qu'on retrouve dans le tableau 3.3 de l'EN 1994-1-2.

8.2. Distribution de température dans une dalle béton

D'après le tableau 3.3 de l'EN 1994-1-2 on retrouve valeurs suivantes de température à travers la section d'une dalle en béton. On observe une distribution des températures pour différents temps d'exposition au feu. Dans notre cas, les contraintes du projet correspondent à une exposition au feu de 60 minutes, donc on centrera l'analyse dans cet instant de temps.

Haut. x mm	Température θ_c [°C] après une durée d'exp. au feu en min. de					
	30'	60'	90'	120'	180'	240'
5	535	705				
10	470	642	738			
15	415	581	681	754		
20	350	525	627	697		
25	300	469	571	642	738	
30	250	421	519	591	689	740
35	210	374	473	542	635	700
40	180	327	428	493	590	670
45	160	289	387	454	549	645
50	140	250	345	415	508	550
55	125	200	294	369	469	520
60	110	175	271	342	430	495
80	80	140	220	270	330	395
100	60	100	160	210	260	305

1 - Face inférieure de la dalle exposée au feu

Tableau 39. Distribution de la température dans une dalle pleine de 100 mm non protégés selon l'EN 1994-1-2

8.3. Modèle Abaqus d'une section en béton

Dans la figure ci-dessous on retrouve le modèle numérique de la section de béton dont les dimensions sont 100x100 millimètres. On peut observer la distribution de la température à travers cette section à l'instant de temps égal à 60 minutes.

Le modèle a été réalisé par des éléments quadrangulaires 2D de taille égale à 5 millimètres. Le modèle prend en compte les suivantes caractéristiques thermiques et physiques du béton : la capacité calorifique, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité. Toutes ces caractéristiques

varient en fonction de la température selon les équations concernant les propriétés thermiques des matériaux détaillés dans le 3.3 de l'EN 1994-1-2.

Finalement, d'autres facteurs thermiques utilisés dans le modèle sont la constante de Stefan-Boltzmann égale $5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ et le zéro absolu égal à -273 °C.

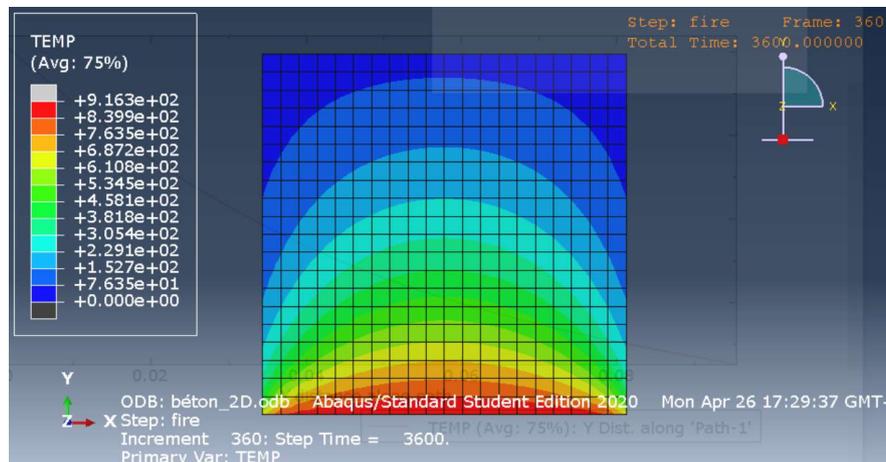


Figure 83. Modèle Abaqus d'une section en béton de 100x100 millimètres.

8.3.1. Résultats du modèle Abaqus à 60 minutes

Après avoir réalisé le modèle de transfert thermique, on retrouve la distribution de température à travers la section du béton analysée suivante. Ces valeurs de température correspondent à une exposition à un feu ISO 834 pendant 60 minutes. Dans l'ordonnée du graphique, on a les températures en degrés Celsius et dans les abscisses on a l'épaisseur en millimètres de la section du béton où la position égale à zéro représente la face de la section du béton directement exposée au feu.

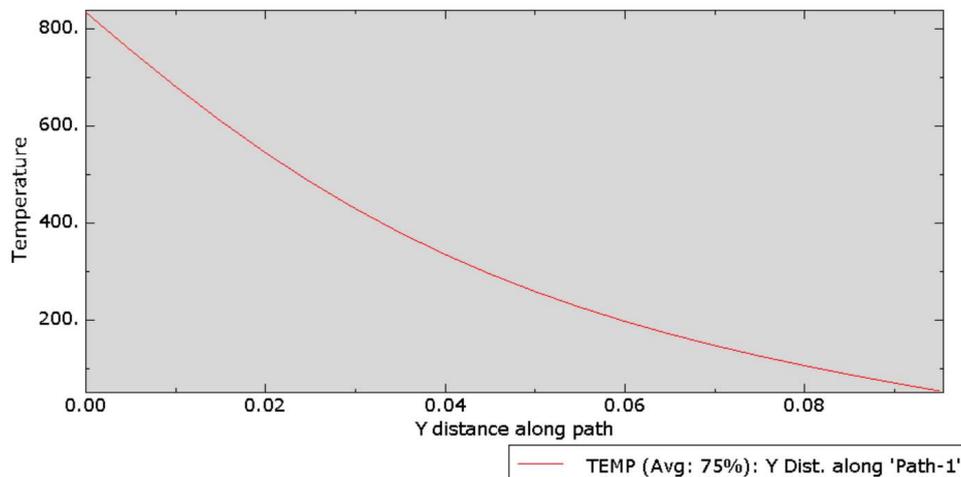


Figure 84. Évolution de la température dans la section du béton à 60 minutes

8.4. Comparaison du logiciel Abaqus avec l'EN 1994-1-2

Dans le graphique ci-dessous on retrouve la distribution des températures d'après les valeurs données par le tableau 3.3 de l'EN 1994-1-2 et d'après les résultats obtenus pour le modèle numérique réalisé sur le logiciel Abaqus. On observe des valeurs de température assez similaires dans les différentes positions de la section.

Pour évaluer la précision du modèle, on peut l'estimer par la formule suivante :

$$P = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n+1} (\bar{X} - X_i)^2} \quad (1)$$

\bar{X} : valeur moyenne des températures selon l'EN 1994-1-2

X_i : valeur de température dans la position i selon Abaqus (i varie de 5 à 100 millimètres)

n : nombres de positions i où la température est mesurée

D'après l'équation (1) on retrouve, entre le modèle Abaqus et le données de l'EN 1994-1-1, une différence moyenne des températures de 27 degrés Celsius.

Donc, dans la suite, pour la réalisation des modèles numériques de transfert thermique des systèmes de planchers Supportsol 170 et Cofradal 200 on utilisera le même paramétrage que celui utilisé pour la modélisation de la section en béton dans cette partie.

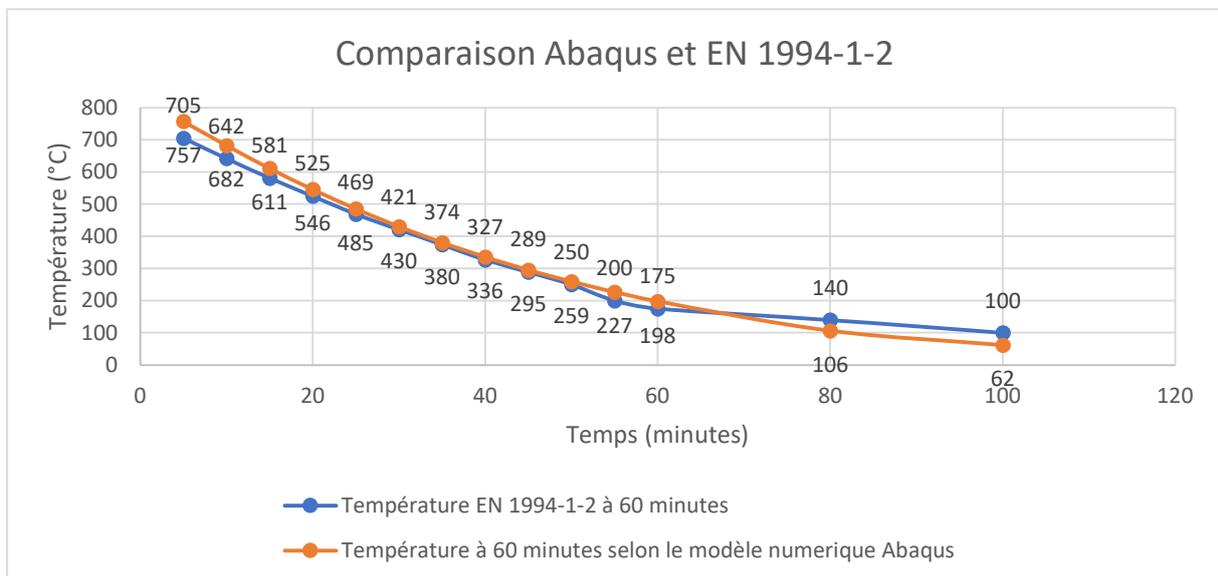


Figure 85. Comparaison entre les modèles Abaqus et EN 1994-1-2 à 60 minutes d'exposition au feu

Dans d'autres modélisations on avait des différences de température beaucoup plus grandes. On a réussi à diminuer l'écart entre les deux courbes montrés ci-dessus en faisant varier le paramètre de résistivité thermique de surface entre environnement et la surface du matériau.

9. Modèle numérique du plancher Cofradal

Dans cette partie, on analysera les modèles de transfert thermique des planchers Cofradal et Supportsol réalisés sur Abaqus. On déterminera les températures dans la tôle pour différentes situations d'exposition au feu. On évaluera une situation non protégée et d'autres situations avec différents matériaux pour les écrans protecteurs.

Le plancher a été modélisé sur Abaqus prenant en compte les différents matériaux qui lui composent. Ainsi on a la tôle située dans la partie inférieure de la section qui apporte la résistance en traction, ensuite on a une couche de laine de roche qui apporte l'isolation acoustique comme thermique et finalement dans la partie supérieure de la section on a une couche de 6 centimètres de béton garantissant la résistance en compression.

9.1. Modèle non protégé

Ci-dessous, on présente le modelé 2D réalisé sur Abaqus du plancher mixte Cofradal. On peut voir la distribution de température à travers la section pour une exposition à un feu ISO pendant 60 minutes. Dans ce cas, il n'y a pas d'écran protecteur, donc, la tôle est directement exposée au feu et au but d'une heure atteint une la température de 944 degrés Celsius. La documentation technique du plancher ne donne pas aucune information sur la résistance du plancher sans la mise en place des aciers de renfort ou d'un écran protecteur contre le feu, donc on peut supposer qu'à défaut d'acier de renfort ou d'un système de protection quelconque, le plancher ne tienne pas long temps au feu.

Pour ce plancher, on évaluera aussi la température dans le béton. Ensuite, on fera une analyse suivant des intervalles de temps de 10 minutes pour déterminer la diminution de la capacité portante du plancher jusqu'à la ruine.

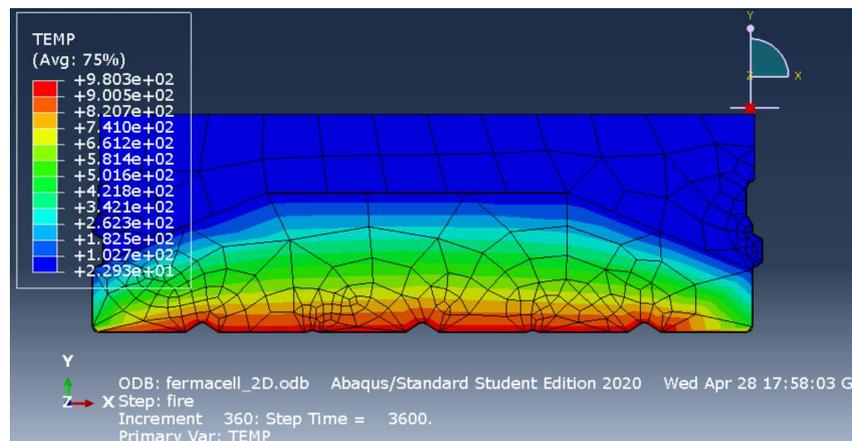


Figure 86. Modèle Abaqus du plancher Cofradal 200 non protégé.

Dans la figure ci-dessous on observe la distribution de température à travers la tôle exposée directement au feu pendant 60 minutes. La tôle atteint une température maximale de 944 degrés Celsius.

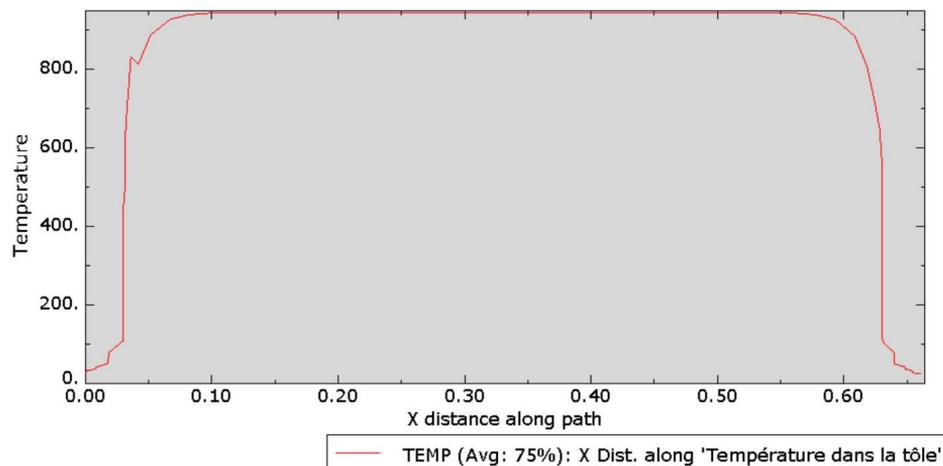


Figure 87. Température dans la tôle sans protection au feu.

9.2. Modèle protégé

Dans la figure ci-dessous, on retrouve le modèle Abaqus 2D du plancher Cofradal incluant deux panneaux Fermacel (2x12,5 millimètres) pour la protection au feu. On observe une diminution

importante de la température dans la section du plancher grâce à la mise en place de l'écran protecteur.

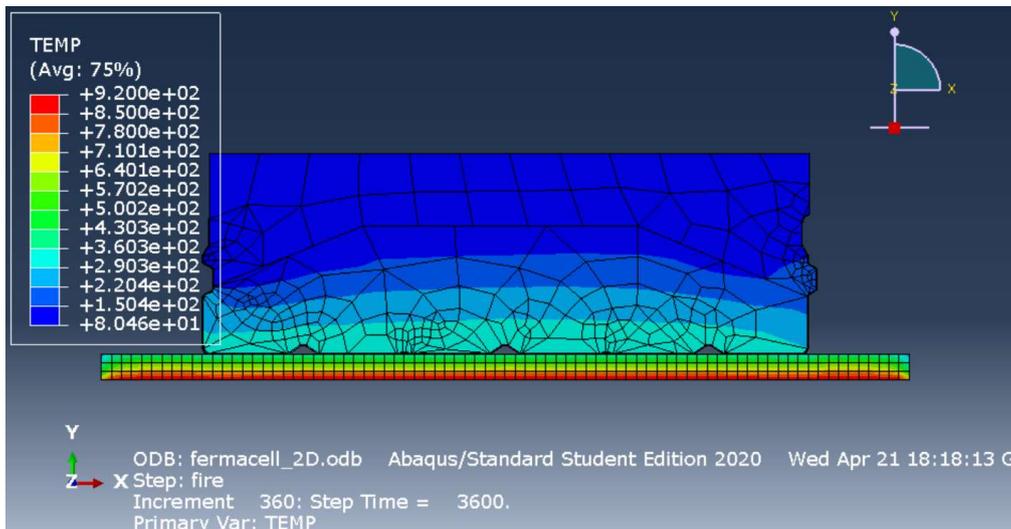


Figure 88. Modèle Abaqus du plancher Cofradal 200

9.2.1. Température dans la section du plancher

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve l'évolution de la température à travers les différents matériaux de la section du plancher. Les pentes les plus inclinées correspondent aux matériaux à faible conductivité thermique. Ainsi il est simple d'identifier les différents composants du plancher, on retrouve de gauche à droite : le panneau Fermacel avec une forte pente qui fait descendre la température de manière importante, ensuite on a une pente presque horizontale qui correspond à celle de la tôle qui a une conductivité thermique assez élevée, après on a la pente qui correspond à la laine de roche et finalement celle du béton.

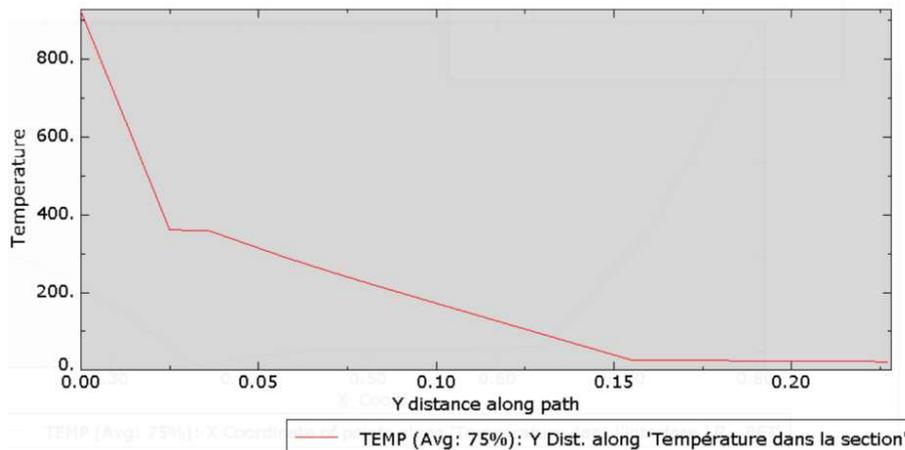


Figure 89. Température dans la section Cofradal à 60 minutes d'exposition au feu

9.2.2. Protection par deux panneaux Fermacel

Ci-dessous, on retrouve la distribution de températures à travers la section de la tôle du plancher Cofradal pour une exposition à un feu ISO pendant 60 minutes. La protection au feu est apportée par la présence des deux panneaux Fermacel de 12,5 millimètres d'épaisseur chacun. Grâce à cette protection, on atteint une température maximale dans la tôle égale à 363 degrés Celsius.

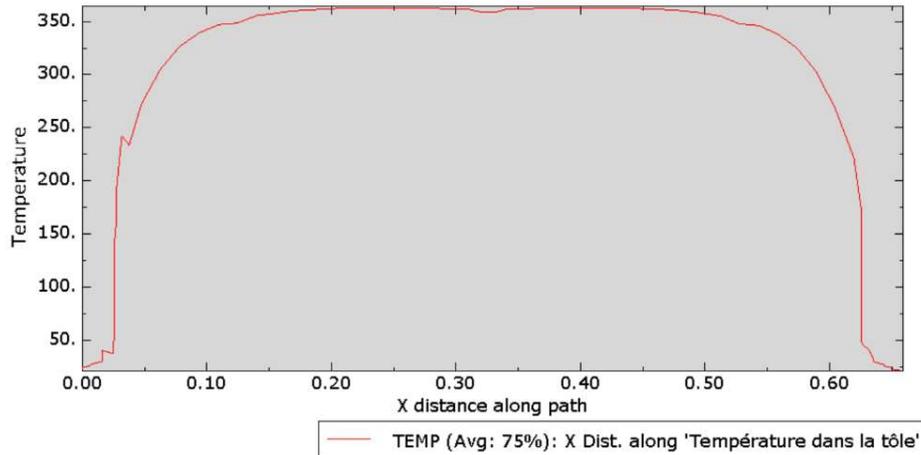


Figure 90. Température dans la tôle protégée par deux panneaux Fermacel à 60 minutes d'exposition

9.2.3. Protection par deux panneaux en plâtre

Dans la figure ci-dessous on observe la distribution de températures dans la section de la tôle du plancher Cofradal pour une exposition à un feu ISO pendant 60 minutes. On considère que la protection au feu apportée par deux panneaux en plaque de plâtre de 12,5 millimètres d'épaisseur chacun. Ces panneaux comportant des conductivités thermiques assez faibles agissent comme isolants, retardant de cette manière la propagation de la chaleur sur l'acier. On atteint une température maximale dans la tôle égale à 333 degrés Celsius.

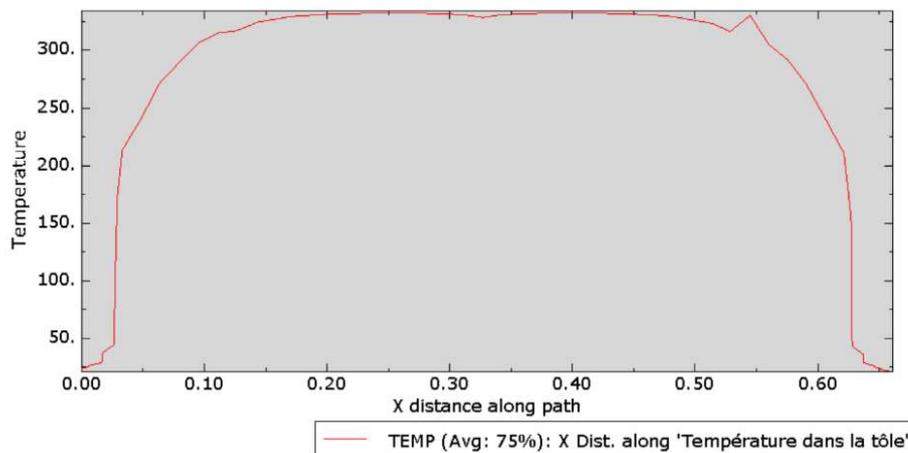


Figure 91. Température dans la tôle protégée par deux panneaux en plaque de plâtre à 60 minutes d'exposition

9.2.4. Protection par un panneau fermacel

Dans la figure ci-dessous on retrouve la distribution des températures dans la tôle du plancher Cofradal pour une exposition à un feu ISO pendant 60 minutes et en considérant l'acier protégé par un panneau de 12,5 millimètres d'épaisseur de type Fermacel. La température maximale atteinte dans la tôle est de 452 degrés Celsius.

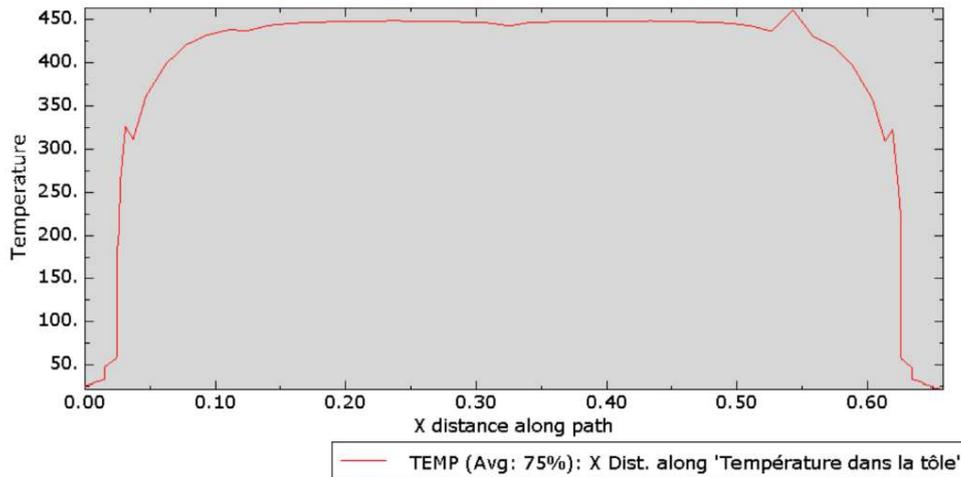


Figure 92. Température dans la tôle protégée par un panneau Fermacel à 60 minutes d'exposition

9.2.5. Protection par un panneau en plâtre

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve la distribution de la température dans la section du profilé mince Cofradal après une exposition au feu de 60 minutes et en prenant en compte la protection au feu fournie par un panneau en plaque de plâtre d'épaisseur 12,5 millimètres. On observe que la température varie légèrement dans la semelle inférieure du profilé mince et diminue considérablement aux extrémités. La température maximale atteinte dans la tôle est de 418 degrés Celsius.

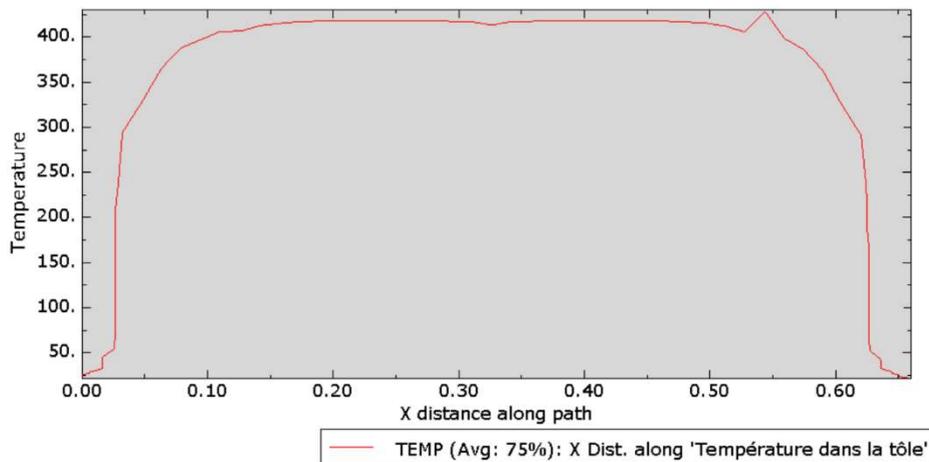


Figure 93. Température dans la tôle protégée par un panneau en plaque de plâtre à 60 minutes d'exposition

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve le bilan des températures dans la tôle du plancher Cofradal pour une exposition au feu de 60 minutes. On donne la température dans la tôle en fonction du type et du nombre de panneaux de protection utilisés. Ensuite, on retrouve les coefficients de réduction de la limite élastique de l'acier correspondant à chaque température d'après le tableau 3.1 de l'EN 1993-1-2.

On observe une meilleure performance thermique du panneau Fermacel. Cependant, pour le choix d'un système ou autre on pourrait prendre en compte aussi les prix et le poids, sachant que les

panneaux Fermacell sont plus chers et plus lourds par rapport à des panneaux classiques en plaque de plâtre.

Température dans la tôle			
Fermacell		Plaque de plâtre	
1 panneau	2 panneaux	1 panneau	2 panneaux
452	363 °C	418	333 °C
Coefficient $K_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$			
0.886	1	0.960	1

Tableau 40. Bilan des températures dans la tôle Cofradal selon le type de protection à 60 minutes d'exposition

9.2.6. Température à l'interface laine de roche et béton

Comme on a vu précédemment le plancher cofradal 200 est composé par plusieurs matériaux, ces matériaux sont distribués sur couches, ainsi dans la partie inférieure du plancher on retrouve la tôle, en dessus de la tôle on retrouve de la laine de roche et finalement dans la partie supérieure on retrouve une couche de 6 centimètres de béton.

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve la température dans l'interface entre la laine de roche et le béton. On observe une température un peu plus élevée sur un des côtés, cela peut être dû à la géométrie de la section du plancher analysé qui n'est pas la même de deux côtés. À l'interface, on retrouve une température de 41 °C. Cette température reste en dessous de 200 °C, donc, d'après le tableau 3.3 de l'EN 1993-1-2 concernant les valeurs des paramètres des contraintes-déformations on n'a pas à appliquer aucun coefficient de réduction de sur la capacité résistante du béton.

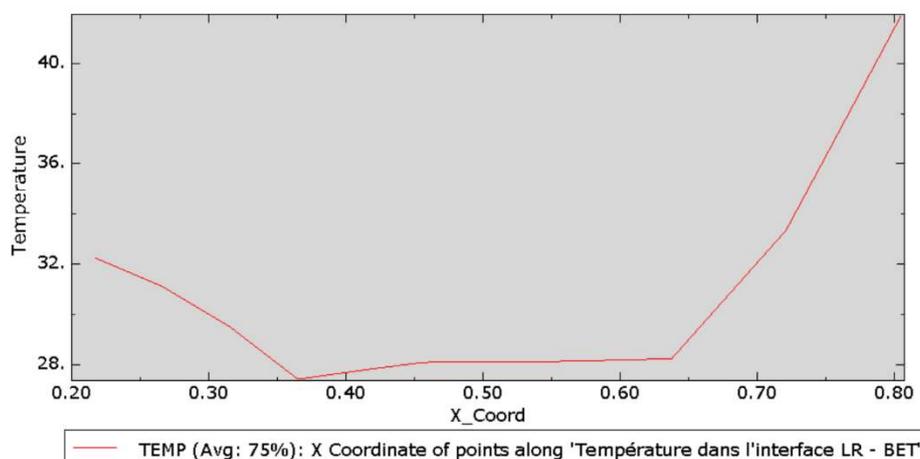


Figure 94. Température dans l'interface entre la laine de roche et le béton à 60 minutes

10. Modèle numérique du plancher Supportsol

Dans cette partie, on analysera différentes configurations du plancher Supportsol en situation d'incendie. On évaluera la résistance du plancher sans protection au feu et avec la mise en place d'écrans protecteurs de type Fermacel ou en plaque de plâtre.

10.1. Modèle non protégé

À 60 minutes d'exposition au feu la tôle atteint une température maximale de 945 °C dans la semelle inférieure. Cependant à ce même instant la température dans la semelle supérieure est de 700 °C.

Pour les calculs, on considérera que la température présente dans la semelle inférieure de la tôle, car c'est cette partie qui travaille en traction.

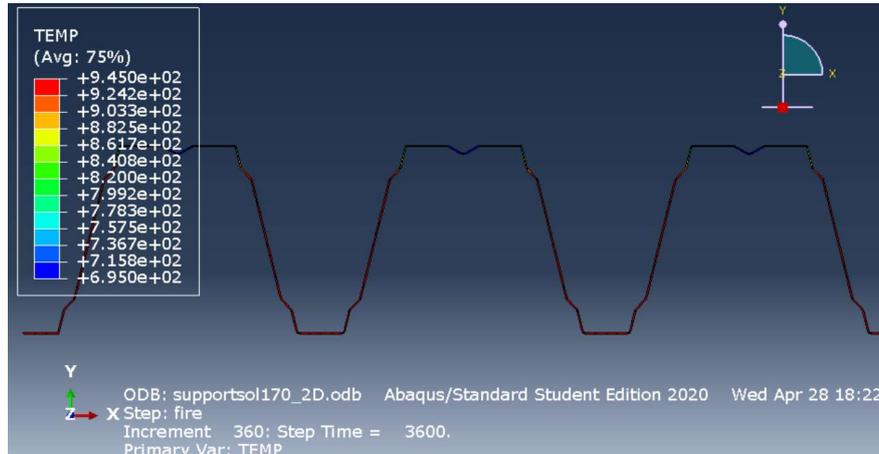


Figure 95. Modèle de transfert thermique du plancher Supportsol.

Dans la figure ci-dessous on observe la distribution de la température selon la position dans la tôle Supportsol. Comme attendu, les températures les plus élevées se retrouvent dans les semelles inférieures et après diminuent dans les âmes jusqu'aux semelles supérieures. On observe une différence de température de 945 degrés Celsius entre les semelles supérieures et inférieures.

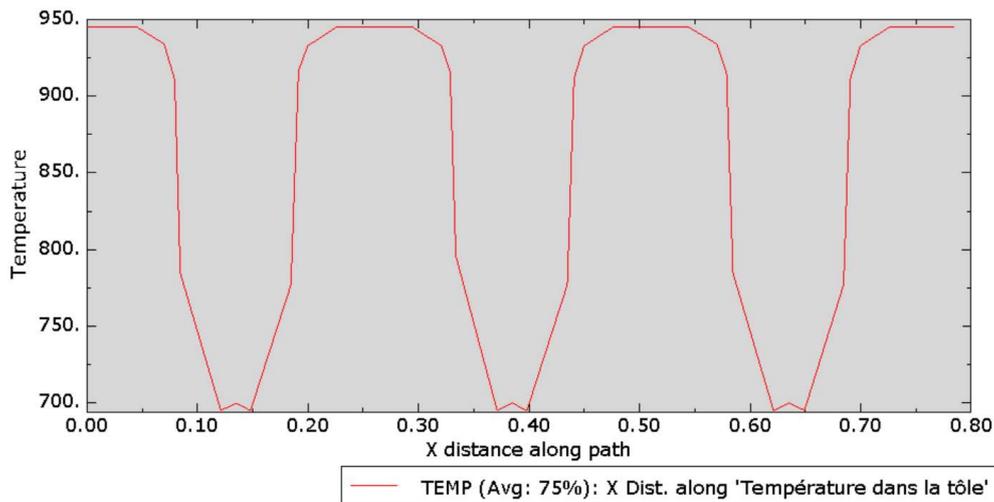


Figure 96. Distribution de température dans le plancher Supportsol non protégé en situation d'incendie.

10.2. Modèle protégé

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve le modelé réalisé sur le logiciel Abaqus concernant le plancher supportsol 170. On observe la distribution de la température à travers la section du double panneau isolant Fermacel d'épaisseur 12,5 mm. La tôle présente une température assez homogène sur toute sa section. Cette cartographie de distribution de température à travers la section analysée correspond à une exposition au feu de 60 minutes à un feu ISO 834.

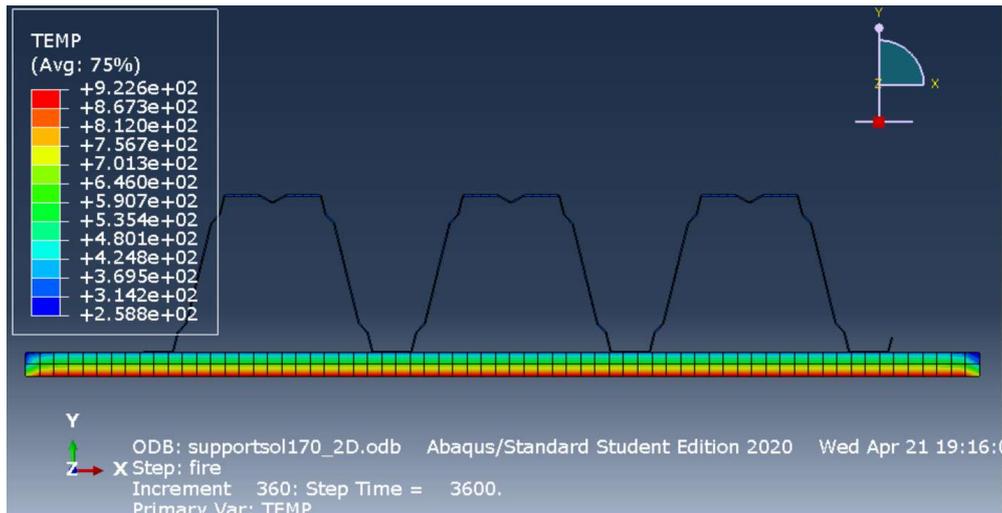


Figure 97. Modèle Abaqus du plancher Supportsol 170

10.2.1. Température dans la section du plancher

Dans le graphique ci-dessous donné à titre d'exemple on retrouve la température développée à travers la section du plancher supportsol 170 en prenant en compte deux panneaux Fermacel d'épaisseur 12,5 mm. On observe une variation linéaire de la température dans le panneau Fermacel et ensuite une distribution de température homogène dans la tôle du plancher.

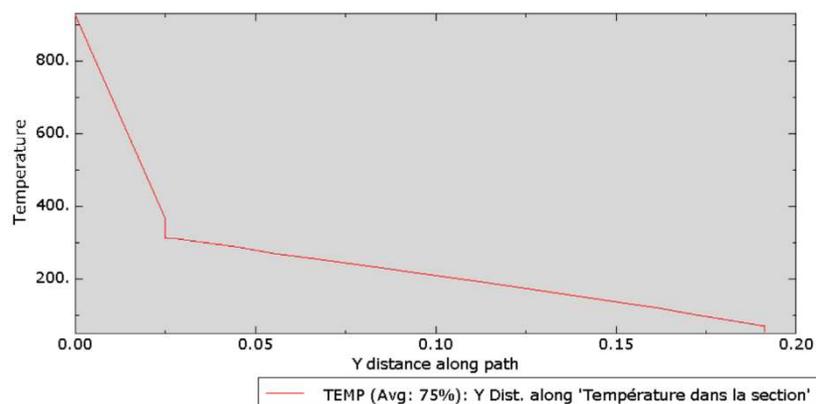


Figure 98. Température dans l'épaisseur de la section Supportsol 170 à 60 minutes d'exposition

10.2.2. Protection par deux panneaux Fermacel

Dans le graphique ci-dessous on retrouve la température atteinte dans la tôle du plancher supportsol 170 après une exposition au feu de 60 minutes et en considérant une protection au feu géré par deux panneaux Fermacel d'épaisseur 12,5 mm. On observe qu'au bout d'une heure la tôle atteint une température de 352 °C. Cette température reste en dessous de 400 °C, donc, d'après le tableau 3.1 de l'EN 1993-1-2 on n'a pas à appliquer aucun coefficient réducteur pour la limite élastique de l'acier. Dans ce cas, on pourra conserver les performances mécaniques et la capacité portante du plancher calculé à froid.

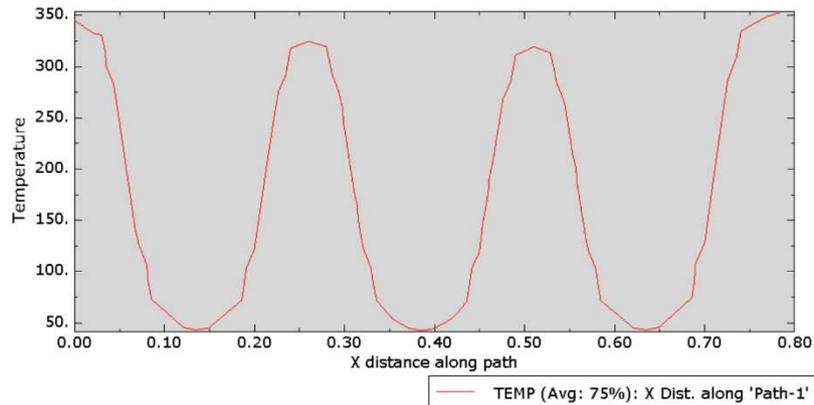


Figure 99. Température dans la tôle protégée par deux panneaux Fermacel à 60 minutes d'exposition

10.2.3. Protection par deux panneaux en plâtre

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve la température atteinte dans la tôle du plancher supportsol 170 après une exposition au feu de 60 minutes et en prenant compte une protection au feu fournie par deux panneaux en plaque de plâtre d'épaisseur 12,5 mm. La température atteinte dans la tôle est égale à 322 °C, ce qui reste inférieur à 400 °C. D'après le tableau 3.1 de l'EN 1993-1-2 concernant les coefficients de réduction pour les contraintes-déformations dans l'acier on ne réduit pas la limite élastique de l'acier pour des températures inférieures à 400 °C, donc dans ce cas on peut être sûr que le plancher conservera ses performances mécaniques et sa capacité portante calculée à froid.

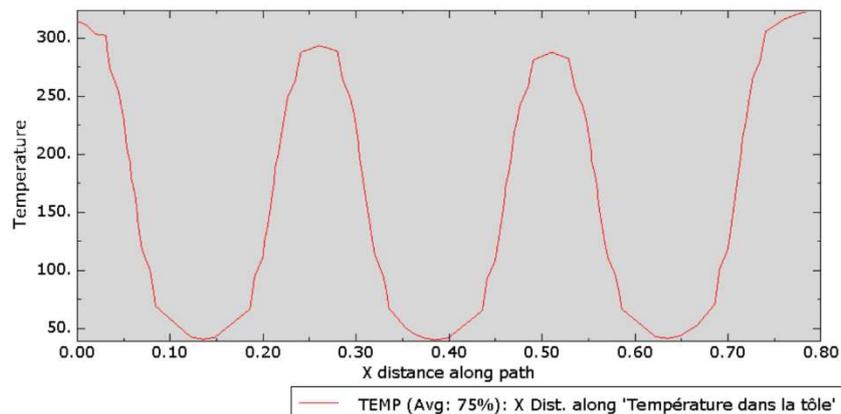


Figure 100. Température dans la tôle protégée par deux panneaux en plaque de plâtre à 60 minutes d'exposition

10.2.4. Protection par un panneau Fermacel

Dans le graphique ci-dessous on retrouve la température développée par la tôle du plancher supportsol 170 après une exposition au feu de 60 minutes et en considérant une protection au feu gérée par un panneau Fermacel d'épaisseur 12,5 mm. La température atteinte au bout d'une heure est égale à 438 °C. La température est homogènement distribuée dans la section du profilé mince.

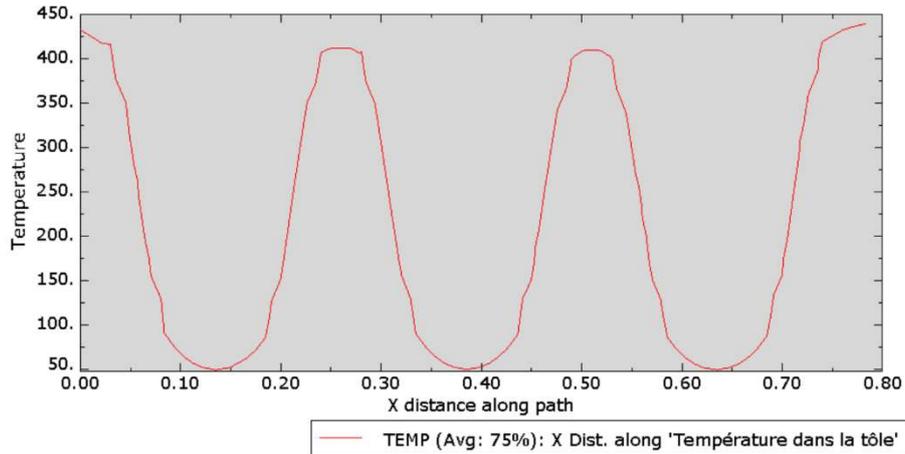


Figure 101. Température dans la tôle protégée par un panneau Fermacel à 60 minutes d'exposition

10.2.5. Protection par un panneau en plâtre

Dans le graphique ci-dessus, on retrouve la température qui est atteinte dans la tôle nervurée du plancher supportsol 170 après une exposition au feu de 60 minutes et en considérant un panneau de protection au feu en plaque de plâtre d'épaisseur 12,5 mm. La température atteinte est égale à 408 °C et est homogènement répartie sur la section du profilé mince d'acier.

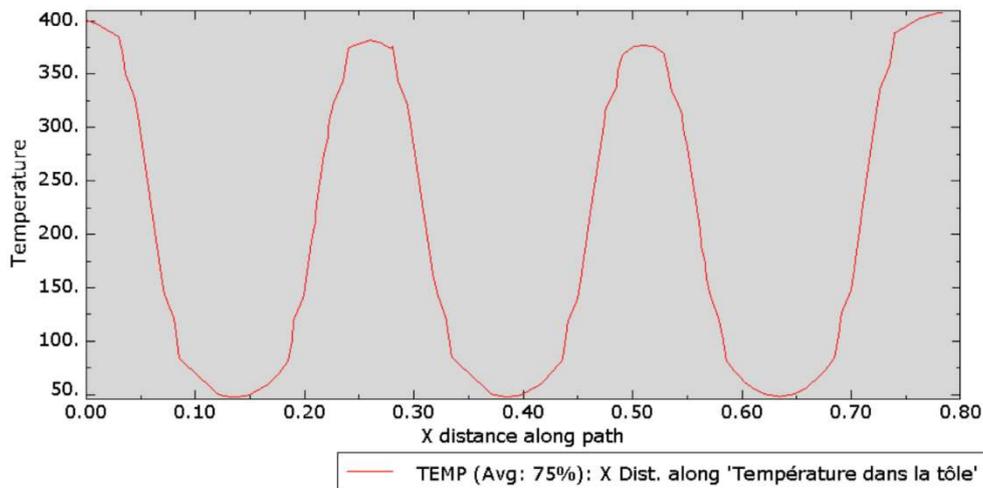


Figure 102. Température dans la tôle protégée par un panneau en plaque de plâtre à 60 minutes d'exposition

Dans le tableau ci-dessous on résume les différentes valeurs de température obtenue dans la tôle du plancher Supportsol en fonction du type de protection utilisé pour ensuite déterminer les coefficients de réduction de la limite élastique de l'acier selon les valeurs données du tableau 3.1 de l'EN 1993-1-2. Si les valeurs de température ne correspondent pas aux données de la norme, les coefficients de réduction sont déterminés par interpolation linéaire.

Température dans la tôle			
Fermacell		Plaque de plâtre	
1 panneau	2 panneaux	1 panneau	2 panneaux
438	352 °C	408	322 °C
Coefficient $K_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$			
0.897	1	0.963	1

Tableau 41. Bilan des températures dans la tôle Supportsol selon le type de protection à 60 minutes d'exposition

11. Capacité portante des planchers exposés au feu

Dans cette partie, on analyse mécaniquement la capacité résistante des planchers en situation d'incendie. On évalue les cas qui prennent en compte une protection au feu et les cas en situation non protégée.

11.1. Cofradall avec un panneau Fermacel

Ci-dessous, on retrouve la capacité portante selon la portée des planchers cofradal 200 après application du coefficient réducteur de la limite élastique. Le coefficient réducteur est égal à 0,886 et correspond à une exposition au feu pendant 60 minutes et avec une protection fournie par un panneau Fermacel d'épaisseur 12,5 mm.

Ce panneau a une conductivité thermique de 0,32 W/mK et donne une protection au feu un peu moins bonne qu'un panneau en plaque de plâtre. Après une heure d'exposition au feu on obtient une température dans la tôle du plancher égale à 458 °C.

On observe une réduction de la capacité portante du plancher, mais on reste en dessous de la charge sollicitant du projet. On a une marge de 1,50 KN ce qui peut être utile dans le cas où il faudrait incorporer des charges plus importantes concernant le carrelage ou le système de plafond.

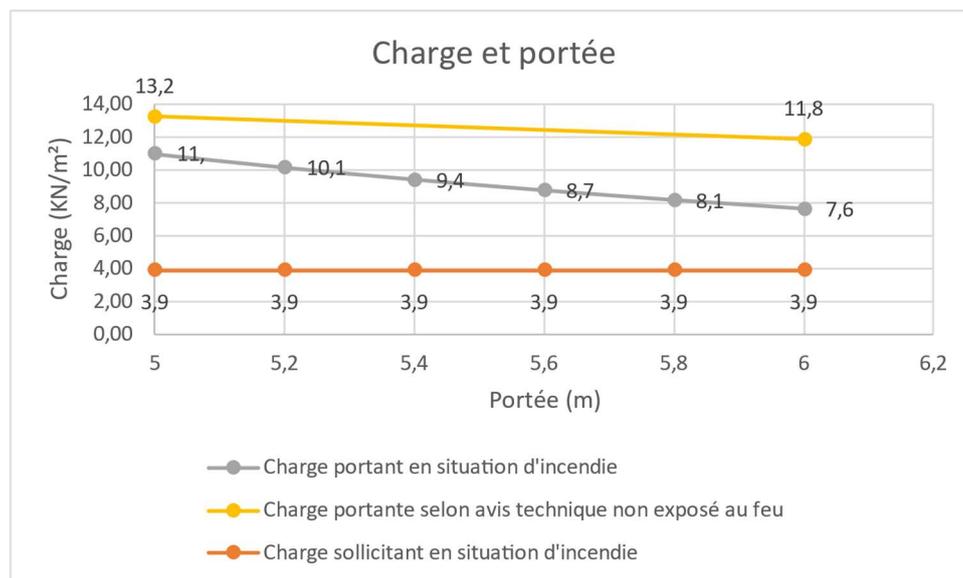


Figure 103. Capacité portante du Cofradal entre 5 et 6 mètres en situation d'incendie

11.2. Cofradal avec un panneau en plâtre

Ci-dessous, on retrouve les résultats obtenus concernant la capacité portante du plancher cofradal 200 après application des coefficients de réduction de la limite élastique concernant la tôle. On observe une légère diminution de la capacité portante, mais on reste en dessous de la charge de sollicitation.

Le coefficient de réduction de la limite élastique est égal à 0,960 pour une exposition au feu de 60 minutes et prenant en compte la protection au feu fournis par un panneau en plaque de plâtre de 12,5 mm d'épaisseur. La température qui atteint l'acier d'après la modélisation du transfert thermique réalisé sur le logiciel Abaqus précédemment est égale à 418 °C.

Dans ce cas avec une protection en plaque de plâtre on observe qu'on retrouve une température dans la tôle d'acier inférieure à la température atteint avec une protection en panneau Fermacel. Cela est dû aux caractéristiques de chaque matériau, en effet les panneaux en plaque de plâtre présentent une conductivité thermique égale à 0,25 W/mK ce qui est meilleur par rapport au 0,32 W/mK des panneaux Fermacell.

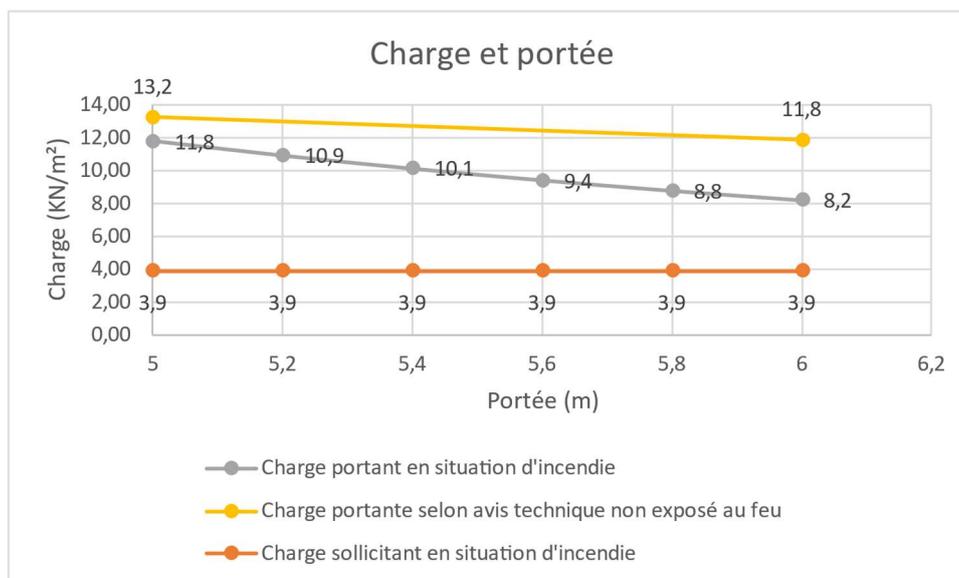


Figure 104. Capacité portante du Cofradal entre 5 et 6 mètres en situation d'incendie.

11.3. Cofradal sans protection au feu

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve la capacité portante maximale du plancher Cofradal en situation d'incendie pour les portées de 4, 5 et 6 mètres. On observe une diminution de la limite élastique de l'acier au fur et à mesure que le temps avance et donc une diminution conséquente de la capacité portante du plancher.

Les combinaisons de charges pour évaluer la résistance des planchers sont celles d'une situation accidentelle d'incendie (charge permanente + 0,6*charge d'exploitation). On observe le temps de tenue au feu différente en fonction de la portée, ainsi pour 4, 5 et 6 m de portée, les temps de ruine du plancher sont égaux à 10, 8.33 et 5 minutes respectivement. Etant donné que la documentation technique du plancher ne donne pas d'information par rapport à la résistance au feu dans un cas non protégé, les informations présentées ci-dessous sont données à titre informatifs.

Temp s (min)	Température dans la tôle (°C)	Température dans le béton	Réduction de la limite élastique	Réduction de la résistance du béton	Capacité portante			Charge de sollicitation (KN/m²)
					Portée de 4 m	Portée de 5 m	Portée de 6 m	
0	20	20	1	1	19,11	12,23	8,49	3,89
1,67	416	21	0,96	1	18,42	11,79	8,19	3,89

3,33	516	26	0,73	1	14,34	9,18	6,37	3,89
5	575	29	0,54	1	10,81	6,92	4,80	3,89
6,67	617	33	0,43	1	8,70	5,57	3,87	3,89
8,33	649	35	0,35	1	7,14	4,57	3,17	3,89
10	677	37	0,29	1	5,95	3,81	2,64	3,89
20	780	44	0,13	1	2,71	1,73	1,20	3,89
30	841	50	0,089	1	1,86	1,19	0,83	3,89
40	883	55	0,068	1	1,42	0,91	0,63	3,89
50	917	59	0,057	1	1,20	0,77	0,53	3,89
60	944	63	0,051	1	1,07	0,68	0,48	3,89

Tableau 42. Réduction de la capacité résistante en fonction du temps d'exposition au feu

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve l'évolution de la capacité portante du plancher en fonction du temps d'exposition au feu. On observe une diminution de plus de 50 pour cent de la résistance de la structure dans les 10 premières minutes. Cela est dû au fait que la tôle du plancher qui reprend les efforts de traction est directement exposée au feu.

Les courbes bleue, orange, grise et jaune représentent la capacité portante à 4, 5, 6 m et la charge de sollicitation en situation d'incendie respectivement.

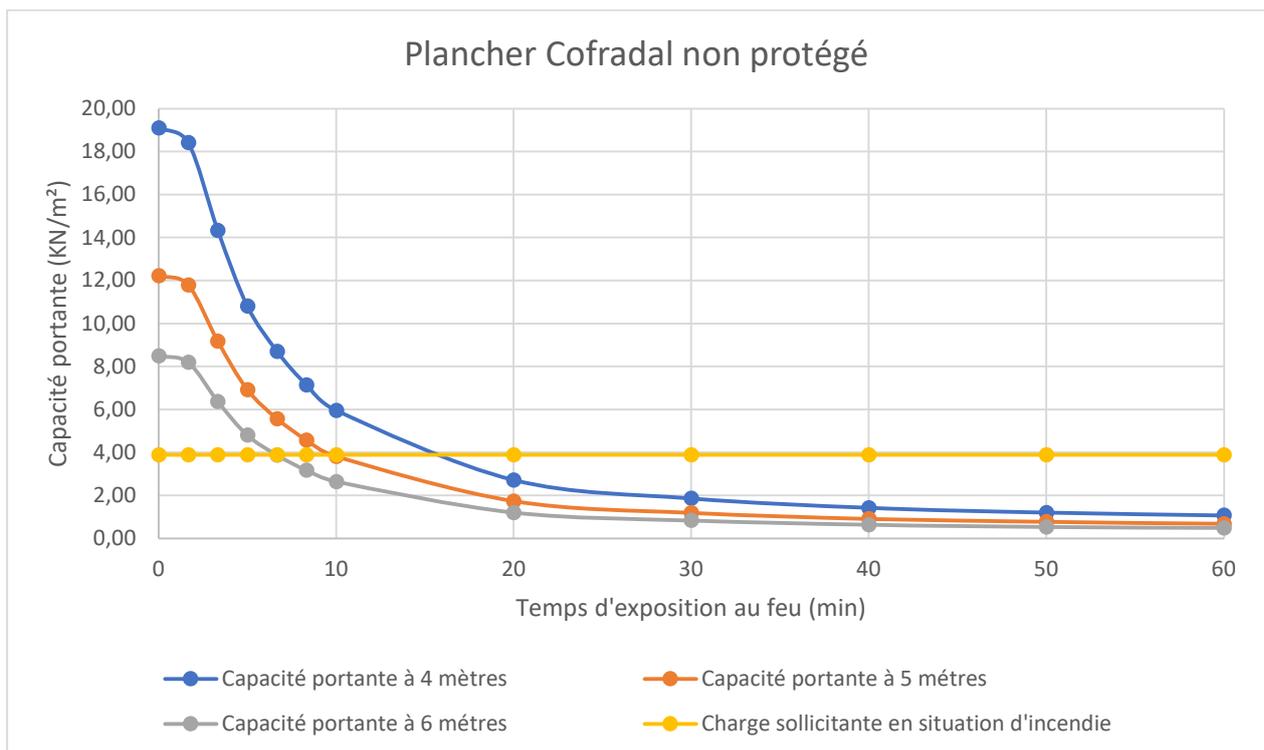


Figure 105. Évolution de la capacité portante en fonction du temps d'exposition au feu

11.4. Supportsol avec panneau Fermacel ou en plâtre

Dans le graphique ci-dessous, on retrouve une comparaison entre les flèches développées pour les charges du projet et les flèches développées pour les chargements maximaux qui est capable de supporter le plancher supportsol 170 d'après sa fiche produit.

Les résultats présentés ci-dessous prennent en compte la réduction de la limite élastique de l'acier. Les profils supportsol ont été affectés par les coefficients de réduction déterminés précédemment en

fonction de la température qui atteint la tôle après exposition au feu pendant 60 minutes. Ainsi, on affecte la limite élastique par les coefficients 0,916 et 0,982 selon le type de protection au feu utilisé, soit des panneaux Fermacel ou des panneaux en plaque de plâtre respectivement.

D'après les calculs réalisés sur le logiciel SCIA ENGINEERING, on ne retrouve pas une augmentation significative dans les flèches développées par le plancher supportsol 170 après réduction de sa limite élastique.

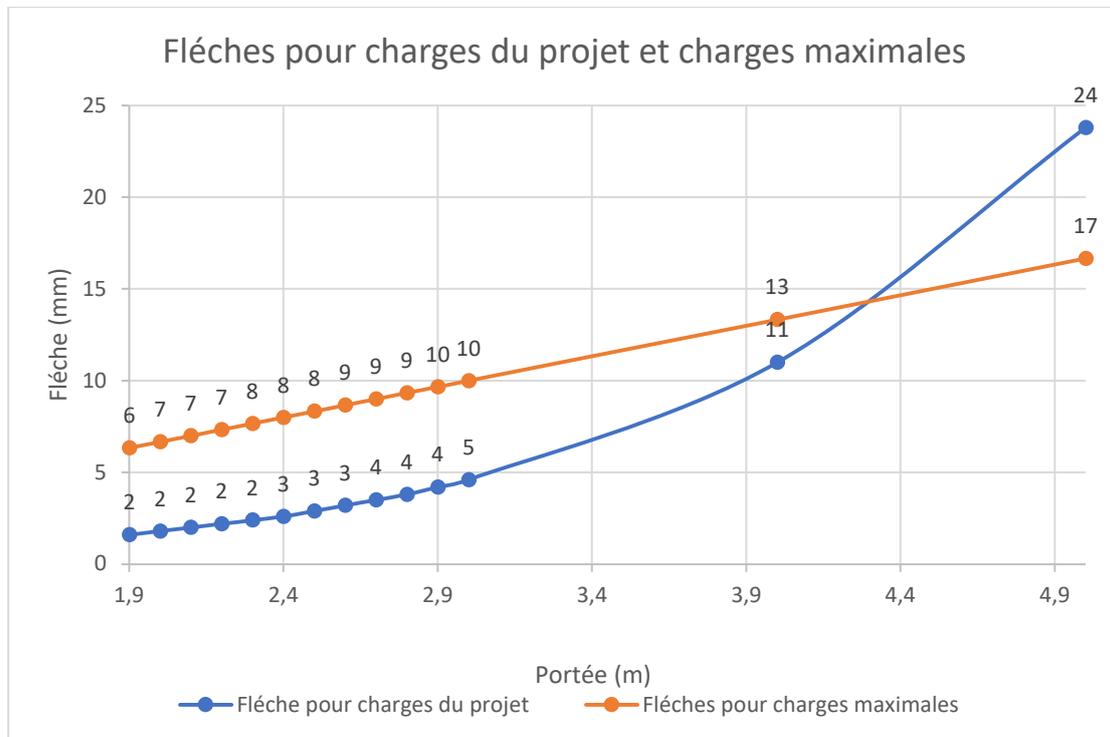


Figure 106. Flèches développées par le plancher supportsol après une heure d'exposition au feu

12. Bilan des systèmes de plancher

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve les six systèmes de plancher qu'on a analysé dans ce travail. Les planchers listés dans le tableau ci-dessous des matériaux et des systèmes techniques variés. On retrouve un plancher mixte, un plancher sec, un plancher en poutres en C et des planchers en bois. Concernant les planchers en bois, on retrouve des planchers en lamellé collé, des planchers en contre collés et des caissons en bois composé par des plaques en contre collées et des nervures en lamellé collé.

Dans le tableau ci-dessous, on inclut des planchers réalisés en lamellé collé (BLC), en contre collé (CLT) et de caissons en bois (CLT Box). Les calculs correspondant à ces planchers proposés ont été réalisés avec le logiciel fourni par le fabricant : best wood STATICS. Pour chacun de ces planchers en bois, on a sélectionné la meilleure alternative en fonction des critères de portée, de poids, d'épaisseur, d'affaiblissement acoustique et de résistance au feu. Pour réaliser cette sélection, on a appliqué la méthode de classement Electre I. La composition détaillée par rapport aux planchers en bois choisis se retrouve dans les annexes.

Dans le tableau ci-dessous, le bilan de tous les planchers proposés analysés par rapport aux critères suivants : la portée, le poids, l'épaisseur, l'indice d'affaiblissement acoustique et la résistance au feu REI 60.

Par rapport aux systèmes de plafond utilisés pour chaque plancher, ils sont définis comme suit : le plafond à deux lames d'air présenté dans la partie 5.2 est utilisé pour le plancher à poutres en C, le plancher à une lame d'air présenté dans la partie 5.1 est utilisé pour le plancher Cofradal et Supportsol. Les planchers en bois n'ont pas besoin de plafond, car leur résistance au feu et leur affaiblissement acoustique sont adéquats. Une proposition pour le revêtement est donné dans la partie 3 des annexes.

Bilan des systèmes constructifs					
Plancher	Portée max (m)	Poids (KN/m ²)	Épaisseur (mm)	Affaiblissement acoustique (Rw+C)	EI 60
Cofradal	6	2,78	365	60	Oui
Supportsol	3,3	0,96	385	55	Oui
Poutres en C	3,7	1,1	331	58	Oui
BLC	3,8	2,12	280,2	60	Oui
CLT	3,7	1,94	255	59	Oui
CLT Box	5,8	1,91	365	61,6	Oui

Tableau 43. Systèmes de plancher proposés et critères d'analyse

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve les différents critères d'évaluation pour les systèmes de plancher. On a choisi de minimiser ou maximiser les critères en fonction de l'optimisation dans la conception du plancher. Ainsi on veut obtenir un plancher le moins épais possible, la moins lourde possible, et en même temps avec la plus grande portée possible et l'indice d'affaiblissement acoustique le plus performant. Donc pour classer les différentes solutions des planchers proposés on utilisera la méthode de surclassement multicritère Electre I.

Table de critères normalisés				
	Minimiser	Minimiser	Maximiser	Maximiser
Choix Critère	Épaisseur (mm)	Poids (KN/m ²)	Portée max (m)	Affaiblissement acoustique Rw + C (dB)
Cofradal	0,15	0,00	1,00	0,76
Supportsol	0,00	1,00	0,00	0,00
Poutres en C	0,42	0,92	0,15	0,45
BLC	0,81	0,36	0,19	0,76
CLT	1,00	0,46	0,15	0,61
CLT Box	0,15	0,48	0,93	1,00
Poids	1	1	1	1

Tableau 44. Tableau normalisé des solutions et des critères

Le tableau ci-dessous quantifie les concordances entre les planchers proposés quand on les compare ses performances entre eux. Ce tableau nous servira dans la suite pour déterminer s'il y a concordance entre deux solutions en fonction d'un seuil de préférence ou de concordance définie et qu'on établit dans notre cas égal à 0,4.

Table des concordances						
Concordance	Cofradal	Supportsol	Poutres en C	BLC	CLT	CLT Box

Cofradal	0	0,75	0,5	0,25	0,5	0,25
Supportsol	0,25	0	0,25	0,25	0,25	0,25
Poutres en C	0,5	0,75	0	0,25	0,25	0,5
BLC	0,5	0,75	0,75	0	0,5	0,25
CLT	0,5	0,75	0,5	0,5	0	0,25
CLT Box	0,5	0,75	0,5	0,75	0,75	0

Tableau 45. Valeur des concordances entre les différents planchers

Dans le tableau ci-dessous, on quantifie les discordances entre les différentes solutions analysées. Dans la suite, ce tableau nous servira pour définir s'il y a discordance entre deux systèmes de plancher comparés par rapport à un seuil de discordance, dans notre cas égal à 0,6.

Table des discordances						
Concordance	Cofradal	Supportsol	Poutres en C	BLC	CLT	CLT Box
Cofradal	0,00	1,00	0,92	0,36	0,46	0,48
Supportsol	1,00	0,00	0,45	0,76	0,61	1,00
Poutres en C	0,85	0,08	0,00	0,56	0,46	0,78
BLC	0,81	0,64	0,56	0,00	0,10	0,74
CLT	0,85	0,54	0,46	0,15	0,00	0,78
CLT Box	0,07	0,52	0,45	0,12	0,02	0,00

Tableau 46. Valeur des discordances entre les différents planchers

Dans le tableau ci-dessous, on peut observer les relations de concordance entre les différentes solutions des planchers proposées. Ces relations sont établies en fonction du seuil de concordance égal à 0,4 et en suivant la méthode Electre I.

Concordance	Cofradal	Supportsol	Poutres en C	BLC	CLT	CLT Box
Cofradal	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
Supportsol	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Poutres en C	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui
BLC	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non
CLT	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non
CLT Box	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non

Tableau 47. Récapitulatif des relations de concordance par rapport au seuil établi

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve les relations de discordance entre les différents systèmes de plancher. Pour déterminer ces relations, on prend en compte le seuil de discordance établi à 0,6 et on suit la méthode de classement Electre I.

Discordance	Cofradal.	Supportsol	Poutres en C	BLC	CLT	CLT Box
Cofradal	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Supportsol	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
Poutres en C	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
BLC	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non

CLT	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
CLT Box	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

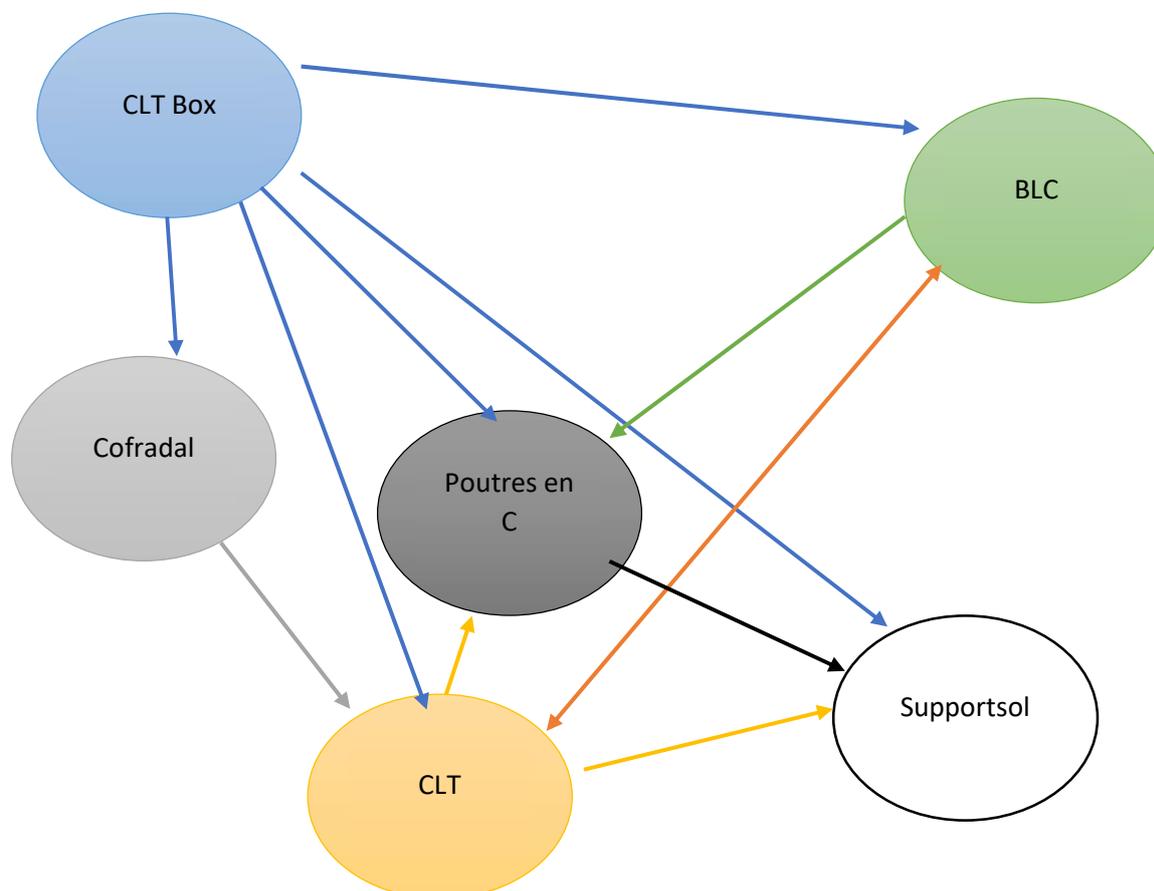
Tableau 48. Récapitulatif des relations de discordances par rapport au seuil établi

Dans le tableau ci-dessous on retrouve les relations de surclassement entre les différents systèmes de planchers analysés. Ce classement prend en compte les critères utilisés pour évaluer les planchers tout en minimisant ou en maximisant chaque critère en fonction du cas.

Concordance/discordance	Cofradal	Supportsol	Poutres en C	BLC	CLT	CLT Box
Cofradal					Cofradal Surclassé CLT	
Supportsol						
Poutres en C		Poutres en C Surclassé Supportsol				
BLC			BLC Surclassé Poutres en C		BLC Surclassé CLT	
CLT		CLT Surclassé Supportsol	CLT Surclassé Poutres en C	CLT Surclassé BLC		
CLT Box	CLT Box Surclassé Cofradal	CLT Box Surclassé Supportsol	CLT Box Surclassé Poutres en C	CLT Box Surclassé BLC	CLT Box Surclassé CLT	

Tableau 49. Relations de surclassement entre les différentes solutions

Dans le schéma ci-dessous on peut voir plus clairement les relations de surclassement entre les différentes solutions de planchers. On observe que le plancher CLT Box représente la meilleure solution par rapport aux critères d'évaluation qu'on a considérés. Ensuite, la solution la plus adaptée est le plancher Cofradal. Après on retrouve les planchers BLC et CTL comme les mieux placés, pour finaliser avec le plancher à poutres en C et en dernier le plancher Supportsol.



Conclusion générale

Ce travail a représenté un défi par rapport à l'étendue du projet demandant une solution globale et multidisciplinaire, regroupant des contraintes et exigeantes techniques très variées, notamment pour les analyses mécaniques, acoustiques et thermiques qui exigeaient le projet.

Le travail dans ce sujet m'a permis d'acquérir de nouvelles compétences et d'aborder des sujets techniques très variés. Ce travail servira à l'entreprise à avoir une vision sur différents systèmes de planchers qui existent dans le marché et qui sont adaptés pour leur projets, ils pourront repérer les avantages et les inconvénients ou limitations des différentes solutions proposés dans ce travail.

Finalement, la conclusion générale de ce travail est présentée en trois parties faisant le bilan des résultats obtenus dans l'analyse réalisée dans les parties II et III du rapport.

Choix du revêtement

Définition du type de revêtement des planchers choisi en fonction des contraintes liées à la flèche maximale, en limitant celle-ci soit à $1/300^{\text{ème}}$ ou à $1/500^{\text{ème}}$ de la portée. On pourra faire des revêtements souples ou solides selon le cas. Dans ce rapport toutes les propositions prennent en compte une flèche à $1/500^{\text{ème}}$.

Pour les planchers en bois, les revêtements sont déjà définis et sont détaillés dans les annexes, là, on peut retrouver les vues des coupes montrant les composants des systèmes en bois choisis.

Choix du plafond

Le choix du plafond a été réalisé en prenant compte principalement de l'affaiblissement acoustique visé ($R_w + C = 58$ dB). Les systèmes sélectionnés pour les plafonds à une seule lame d'air et à deux lames d'air sont respectivement : le système de plafond à panneaux Fermacell et suspentes akustik + sylomer 1 pour les planchers Cofradal et Supportsol et le système à double lame d'air avec de panneau Fermacell ou en plaque de plâtre pour les planchers à poutres en C. Ces plafonds sont répertoriés dans la partie consacrée à l'analyse des systèmes de plafonds traités dans le debut de la partie III de ce rapport.

Choix du plancher

Finalement, on est arrivé à obtenir 6 possibles configurations de planchers qui répondent aux contraintes du projet. Même si tous ces planchers répondent aux exigences fixées au début pour la définition d'un plancher composite adapté à la construction en surélévation, ils sont assez divers, dans leurs matériaux de composition comme dans ces performances. Donc dans le but de faciliter la prise de décision en fonction de la solution la plus adaptée aux besoins d'un projet concret, on a créé un programme sur VBA avec la méthode de classement Electre I pour identifier la meilleure option selon des conditions d'entrée définies par le projet. Ainsi d'après une première analyse faite sans prendre en compte la variable du prix on arrive à la conclusion que le plancher le mieux adapté correspond au plancher CLT Box et suivi par le plancher Cofradal.

Travail complémentaire et approfondissement du sujet

L'analyse et la sélection des différentes solutions de planchers proposés dans ce rapport seront complétées par une consultation des entreprises pour intégrer le prix dans la prise de décision finale. Il faudra obtenir un devis complet par mètre carré de plancher de manière qu'on puisse comparer les coûts et identifier ce qui est proposé par les entreprises sur le marché, et jusqu'où ils sont capables d'intervenir dans le projet par rapport à ces compétences. De cette façon, on pourra se rendre compte de la faisabilité technique comme économique des solutions envisagées.

Il faudra approfondir dans les détails concernant la préfabrication de chaque système de plancher et son installation sur chantier.

Bibliographie

Ouvrages - Articles

- [BAE, 2004] J. Michel BAES, Max Bourcart, Christian Lagoutte, Essai de traction, 2004, 11 pages.
- [CLA, 1998] Pierre-Claude, Adam Neville, Paul Acker, Les différents types de retrait du béton, 1998, 11 pages.
- [GRA, 2014] Jean-Louis Granju, Béton Armé – Théorie et applications selon l’Eurocode 2, 2014, 493 pages.
- [GUO, 2013] Guoqiang Li, Peijun Wang, Advanced Analysis and Design for Fire Safety of Steel Structures, 2013, 363 pages.
- [MAQ, 2011] René Maquoi, Rik Debruyckere, Jean François Demonceau, Lincy Pyl. Construction mixte acier-béton dans les bâtiments : conception et dimensionnement à température ordinaire et en situation d’incendie selon l’Eurocode 4, 2011, 139 pages
- [OUY, 1983] Ouyang Cheng-sheng, A plastic analysis of RC ring slabs under membrane action [J]. China Civil Engineering Journal, 1983, 59–70.
- [PAR, 1980] Park R, Gamble W. L., Reinforced concrete slabs [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980: 562–581.
- [RAN, 1997] Rankin G I B, Long A E., Arching action strength enhancement in laterally-restrained slab strips [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 1997, 122(4): 461–467.
- [SZI, 1974] Szilard R., Theory and analysis of plates-classical and numerical methods [M]. Prentice-Hall, 1974, 552–594.
- [WAN, 2011] Wang Gang, Wang Qing-Xiang, LI Zhong-Jun, Membrane action in lateral restraint reinforced concrete slabs, 2011, 8 pages.

Normes

- [EC2.1.1, 1992] Calcul des structures en béton - Règles générales et règles pour les bâtiments, 1992.
- [NF EN 206-1, 2014] Béton — Spécification, performance, production et conformité — Complément national à la norme NF EN 206, 2014.
- [NF EN 12 390, 2019] Essais pour béton durci - Partie 4 : résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai, 2019.
- [NF EN 1990, 2003] Eurocodes structureaux – Bases de calcul des structures, 2003.
- [NF EN 1991-1-2, 2003] Eurocode 1 : actions sur les structures – Partie 1-2 : actions générales – actions sur les structures exposées au feu, 2003.

[NF EN 1994-1-2, 2006] Eurocode 4 - calcul des structures mixtes acier-béton – Partie 1-2 - règles générales – calcul du comportement au feu, 2006.

[NF EN 1994-1-1, 2005] Eurocode 4 : calcul des structures mixtes acier-béton – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments, 2005.

[STS 22-3, 2020] Maçonnerie pour construction basse - Thermique, acoustique, feu et étanchéité à l'air, 2020.

Annexes
1. Détail de calcul : plancher simplement appuyé
❖ Critère d'isolation thermique

$$h_1 = 95 \text{ mm} \quad h_2 = 55 \text{ mm}$$

$$l_1 = 188 \text{ mm} \quad l_2 = 136 \text{ mm} \quad l_3 = 112 \text{ mm}$$

Facteur de point de vue

$$\Phi = \frac{\left(\left(55^2 + \left(112 + \left(\frac{188 - 136}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^2 - \left(55^2 + \left(\left(\frac{188 - 136}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^2 \right)}{112} = 0,78$$

$$A = \frac{55 * (136 + 188)}{2} = 8910 \text{ mm}^2$$

$$L_r = 136 + 2 * \left(55^2 + \left(\left(\frac{188 - 136}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) = 258 \text{ mm}$$

$$\frac{A}{L_r} = 34,6 \text{ mm}$$

Résistance au feu relatif à l'étanchéité (béton normal)

$$t = 28,8 + 1,55 * 95 - 12,6 * 0,78 + 0,33 * 34,6 - \frac{735}{112} + 48 * \frac{34,6}{112} = 128 \text{ min}$$

❖ Critère de résistance mécanique

Charge par unité de longueur en cas d'incendie.

$$q_{fi,d} = g_k + \psi_0 q_k = 3,5 + 0,5 * 4 = 5,5 \text{ KN/m}^2$$

Moment sollicitant en travée

$$M_{fi,Ed} = \frac{5,5 * 3^2}{8} = 6,2 \text{ KNm}$$

La température dans la tôle est calculée en considérant un angle α d'inclinaison de l'âme de $64,7^\circ$. Ensuite à l'aide du tableau qui répertorie le facteur de réduction $K_{y,\theta}$ on peut déterminer la limite élastique à des températures élevées comme suit :

Semelle inférieure

$$\theta_a = 951 - \frac{1197}{112} - (2,32 * 34,6) + (86,4 * 0,78) - (150,7 * 0,78^2) = 835 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow K_{y,\theta} = 0,099$$

Ame

$$\theta_a = 661 - \frac{833}{112} - (2,96 * 34,6) + (537,7 * 0,78) - (351,9 * 0,78^2) = 756 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow K_{y,\theta} = 0,167$$

Semelle supérieure

$$\theta_a = 340 - \frac{3269}{112} - (2,62 * 34,6) + (1148,4 * 0,78) - (679,8 * 0,78^2) = 703 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow K_{y,\theta} = 0,238$$

Avec

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{55^{1/2}} + \frac{1}{85^{1/2}} + \frac{1}{85^{1/2}} = 0,35 \rightarrow z = 2,84$$

Barres d'armatures

$$\theta_s = 1191 - \frac{250 * 55}{55} - (240 * 2,84) - (5,01 * 34,6) + (1,04 * 64,7) - 925/112 = 145 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow K_{y,\theta} = 1$$

Effort de traction dans les barres d'armature et dans la tôle d'acier

$$F_i = (136 * 1 * 0,099 * 235) + \left(2 * (55^2 + (188 - 136)/2)^2 \right)^{1/2} * 1 * 0,167 * 235$$

$$+ (112 * 1 * 0,238 * 235) + (\pi * 4^2 * 1 * 500)$$

$$= 3164 + 4775 + 6264 + 25133 = 39336 \text{ N} \rightarrow 131,4 \text{ KN/m}$$

Distance jusqu'à la face inférieure de l'aile sur laquelle l'effort s'applique :

$$e_i = \frac{(3164 * 0,5 + 4775 * \frac{55}{2} + 6264 * 55 + 25133 * 55)}{39336} = 47,2 \text{ mm}$$

L'effort de compression dans la zone supérieure du plancher c'est égal à cet effort de traction

Hauteur de la zone comprimée du béton :

$$x = \frac{F_i}{b * 0,85 * f_{ck}} = \frac{131100}{1000 * 0,85 * 25} = 6,2 \text{ mm}$$

Bras de levier entre l'effort de traction et le centre de la zone comprimée :

$$z = 150 - 47,2 - \frac{6,2}{2} = 99,7 \text{ mm}$$

$$\rightarrow M_{fi,Rd} = 131,1 * \frac{99,7}{1000} = 13,1 \frac{KNm}{m} > 6,2 \frac{KNm}{m}$$

Donc la dalle mixte envisagée permet de garantir les conditions d'isolation, vue précédemment, et de résistance, calculées ci-dessus.

2. Détail de calcul : plancher continu

Le moment résistant dans l'appui intermédiaire est calculé d'abord en calculant la température limite $\theta_{lim.}$. Ensuite, on aura besoin de calculer l'effort de traction dans les armatures supérieures aussi.

Effort de traction par nervure dans les barres d'armatures supérieures :

$$N_s = \frac{300}{150} * \pi * 3^2 * 500 = 28274 \text{ N}$$

$$\theta_{lim.} = 867 - (1,9 * 10^{-4} * 28274) - (8,75 * 34,6) - (123 * 0,78) - \left(\frac{1378}{112}\right) = 451 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Avec

$$\frac{u_3}{h_2} = 0,75$$

Cela donne :

$$z = \frac{451 - \left(1191 - 250 * 0,75 - 5,01 * 34,6 + 1,04 * 64,7 - \frac{925}{112}\right)}{-240} = 1,83$$

$$Y_I = Y_{II} = \frac{1}{\left(\frac{1}{1,83} - \frac{4}{\sqrt{188 + 112}}\right)^2} = 10 \text{ mm}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2h_2}{l_1 - l_2}\right) = \arctan\left(\frac{2 * 55}{188 - 136}\right) = 64,7 \text{ mm}$$

$$X_{II} = 0,5 * 136 + 10 * (\cos(64,7^\circ) - 1) / \sin(64,7^\circ) = 61,7 \text{ mm}$$

$$a = 28,8$$

$$c = -51,7$$

$$b = 9$$

$$Y_{III} = 55$$

$$X_{III} = \frac{1}{2} * 188 - \frac{9}{\sin(64,7^\circ)} = 84 \text{ mm}$$

$$Y_{IV} = 55 + 9 = 64 \text{ mm}$$

$$X_{IV} = (0,5 * 188) + (0,5 * 112) = 150 \text{ mm}$$

La hauteur de la zone comprimée peut alors être déterminée en résolvant une équation de second ordre.

$$F_i = \left(2X_{II} + \frac{X_{III} - X_{II}}{Y_{III} - Y_{II}} * x \right) * x * 0,85f_{cd}$$

En résolvant cette équation, on obtient $x = 10,3$ mm. La zone comprimée se situe donc en totalité dans la nervure.

Ensuite, en vue de faciliter les calculs, on va calculer le bras de levier en partant du centre de la zone où s'applique l'effort de compression. Donc le bras de levier est :

$$z = 150 - 18 - 10 - \frac{10,3}{2} = 116,9 \text{ mm}$$

Le moment résistant après 60 min d'exposition au feu est donc :

$$M_{f_i,Rd}^- = 116,9 * 28274 * \frac{10^{-3}}{(188 + 112)} = 11 \text{ KN} \cdot \frac{m}{m}$$

La somme de moments sollicitant équivaut à la même valeur que celle de l'exemple précédent :

$$M_{f_i,Ed} = 6,2 \text{ KN} \cdot m$$

En travée intermédiaire, la résistance est satisfaite, car le moment résistant sur appui est supérieur à la différence entre le moment résistant sur appui et le moment sollicitant sur travée intermédiaire, ce qui se résume dans le fait que le moment négatif sollicitant en travée intermédiaire est inférieur que celui sur appui.

Comme sur travée intermédiaire il n'y a pas d'armatures inférieures, alors on a seulement la participation de la tôle métallique. Donc le moment en travée sans armature donne :

$$F_i = 3164 + 4775 + 6264 = 14203 \text{ N} \quad \rightarrow \quad \frac{14203}{300} = 47,3 \frac{\text{KN}}{m}$$

La distance du point d'application de l'effort jusqu'à la face inférieure est :

$$e_i = \frac{(3164 * \frac{1}{2} * 1) + (4775 * \frac{1}{2} * 55) + (6244 * 55)}{14203} = 33,6 \text{ mm}$$

L'effort de compression dans la zone supérieure est égal à cette force de traction. Maintenant, on détermine la hauteur de la zone comprimée selon :

$$x = \frac{F_i}{b * 0,85f_{cd}} = \frac{47300}{1000 * 0,85 * 25} = 2,2 \text{ mm}$$

Bras de levier entre le point central de la zone comprimée et le point central de la zone tendue :

$$z = 150 - 33,6 - \frac{2,2}{2} = 115,3 \text{ mm}$$

$$\rightarrow M_{f_i,Rd}^+ = 47,3 * \frac{115,3}{1000} = 5,5 \text{ KN} \cdot \frac{m}{m}$$

3. Première estimation des charges aux appuis

Ci-dessous, on fait un comparatif par rapport aux charges ramenées aux appuis par mètres linéaires pour les deux systèmes de plancher proposés : Plancher mixte Cofradal 200 et plancher sec Supportsol 74.

3.1. Hypothèses

- On considère une charge d'exploitation de 150 kg/m² concernant les logements d'habitation.
- On considère un entraxe entre appuis pour les deux systèmes de planchers égal à 3,7 mètres.
- Utilisation d'un plafond suspendu Placostil F 530.

3.2. Charge permanente

Tout d'abord, on calcule la charge correspondante au plafond suspendu qui pourrait être mis en place. Ci-dessous, on détaille ce calcul.

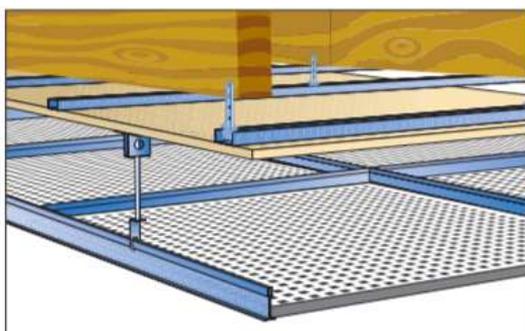


Figure 107. Vue schématique du plafond Placostil

PRODUIT	UNITÉ	SIMPLE PAREMENT	DOUBLE PAREMENT
Plaque Placoplatre [®] BA 13, 15, 18	m ²	1,05	2,10
Profilé Stil [®] F 530	m	2,00	2,00
Suspente	unité	1,80	1,80
Eclisse	unité	(1)	(1)
Suspente	unité	1,40	1,40
Eclisse	unité	(1)	(1)
Vis TTPC ⁽²⁾	1 ^{er} parement	unité	10
	2 ^e parement	unité	-
Bande PP grand rouleau	m	1,40	1,40
Enduit poudre : Placojoint [®] PR, Placojoint [®] SN, Placojoint [®] GDx	kg	0,33	0,33
ou Enduit pâte prêt à l'emploi : Placomix [®] , Placomix [®] Lite	kg	0,47	0,47

Tableau 50. Éléments composant un mètre carré de plafond Placostil

Faux plafond			
Composant e	Unité	Valeur	Lien internet
Placoplatre BA 18	kg/m ²	14	https://www.placo.fr/placolog/Produit/PR00021429/Placoplatre-R-BA-18
Profilé Still F 530	kg/m ²	1,35	https://www.pointp.fr/p/platre-isolation-ite/fourniture-placostil-f-530-l-5-3-m-section-45x18-mm-A6414687
Isolant minéral (10cm)	kg/m ²	2,3	https://p-cdn.rockwool.com/siteassets/rw-f/telechargements/fiches-produits/rockwool_fp_roulrock_alu_201902.pdf?f=20210117182627
Total	kg/m ²		17,65

Tableau 51. Poids propre du plafond Placostil

Dans le tableau ci-dessous, on retrouve la charge permanente présente dans le projet. Cette charge prend en compte la charge du plafond et celle du carrelage. Cette charge permanente est la même pour les deux systèmes de plancher (Cofradal et Supportsol).

Charge permanente		
Composante	Unité	Valeur
Plafond	kg/m ²	17,65
Carrelage	kg/m ²	20
Total	kg/m ²	37,65

Tableau 52. Charge permanente sur le plancher

3.3. Poids propre

Dans le tableau ci-dessous, on a le détail du calcul du poids propre concernant le système de plancher mixte Cofradal 200

Poids propre plancher mixte Cofradal 200							
Tôle nervurée		Laine de roche		Béton		Poids total kg/m	Poids total kg/m ²
Section (cm ²)	Poids kg/m	Poids kg/m	Section cm ²	Poids kg/m	Section cm ²		
9,68	7,6	3,23	646	136,90	547,6	147,73	246,22

Tableau 53. Poids propre du plancher Cofradal 200.

Dans le tableau ci-dessous, on a le détail du calcul du poids propre concernant le système de plancher Supportsol 74.

Poids propre plancher sec supportsol 74		
Composante	Unité	Valeur
Tôle nervurée	kg/m ²	11,19
Panneau aggloméré bois	kg/m ²	12
Profilées en C	kg/m ²	30
Total	kg/m ²	53,19

Tableau 54. Poids propre du plancher Supportsol 74

3.4. Charge aux appuis

Dans le tableau ci-dessous, on compare la charge totale résultante des deux systèmes de plancher évalués. Ainsi on voit que le plancher mixte Cofradal a le double de charge par mètre linéaire aux appuis par rapport au système de plancher sec Supportsol 74.

	Plancher Cofradal 200 + IPE 140	Plancher sec + section en C
Poids propre (KN/m²)	2,46	0,5319
Charge permanente (KN/m²)	0,38	0,38
Charge d'exploitation (KN/m²)	1,50	1,5
Charge aux appuis (KN/ml)	8,03	4,21

Tableau 55. Charge linéique ramenée aux appuis pour une portée de 3,7 mètres

3.5. Conclusion

D'après les analyses précédentes, on a vu que les planchers Cofradal 200 ou 180 tout seuls peuvent nous permettre d'atteindre des portées jusqu'à 6 mètres, mais ce système dans ce projet est surdimensionné pour des portées inférieures à 6 mètres. Ensuite si l'on fait porter les planchers Cofradal par des IPE 140 ou 160 on peut atteindre des portées jusqu'à 4 mètres, dans ce cas la portée est limitée par la flèche des profilés IPE car les planchers Cofradal peuvent atteindre des portées supérieures.

Le plancher sec Supportsol nous permettrait d'atteindre des portées jusqu'à 3 mètres, mais avec une charge aux appuis égale à la moitié de la charge générée dans le système Cofradall.

Système	Portée (m)	Charge aux appuis (KN/ml)
Cofradall + IPE 160	Jusqu'à 4	8,03
Supportsol+ profilé en C	Jusqu'à 3	4,21

Tableau 56. Charge aux appuis et portées des deux systèmes comparés

4. Proposition et calcul acoustique des plafonds

Ci-dessous, on montre comme exemple le calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique de deux systèmes parmi ceux proposés dans ce travail. On détaille le calcul acoustique d'un des plafonds à une lame d'aire et autre à deux lames d'aire.

4.1. Plafond à suspenste métallique avec des panneaux Fermacell

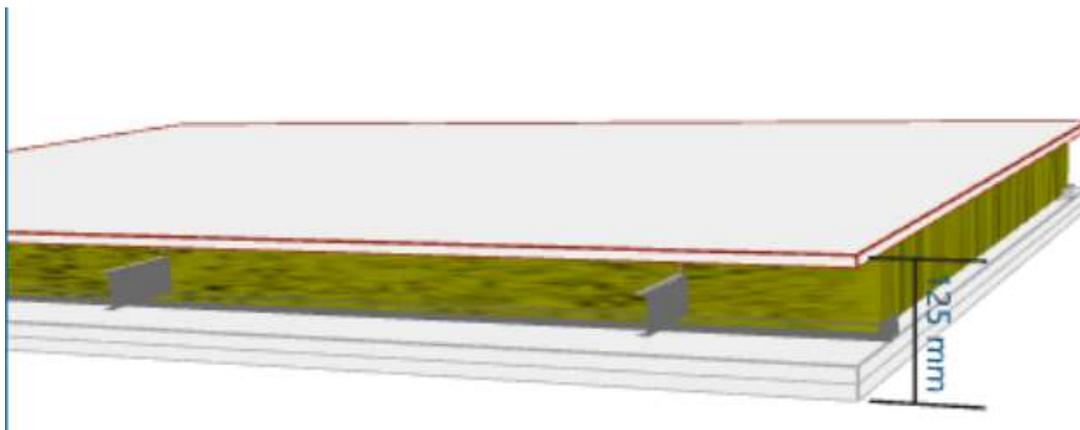
Description de la composition d'un des systèmes de plafond à une lame d'air traitées dans ce travail

Description

Ceiling: + 1 x 10 mm Fermacell 10 + Suspentes métalliques (85 mm x 45 mm),
Cavity Width 85 mm + 70 mm Fibreglass (22kg/m3) + 2 x 15 mm Fermacell 15

Schéma représentatif

Vue schématique du système de plafond analysé.



Panel 1: f_c : 3568Hz Surface Mass 11,5 kg/m²

f_0 : 60Hz

Total Mass: 46,8 kg/m² Version 9.0.23

Panel 2: f_c : 2379Hz Surface Mass 34,5 kg/m²

Version 9.0.23

Panneau supérieur

Single		Double			Triple	
Panel 1		Frame 1	Panel 2	Leak		
Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6	

Search Thickness (mm) Number of 1 Panel 1→2 1→3

Products

- Plaque de plâtre BA18
- Plaque de plâtre BA18 Haute Dureté
- Plaque de plâtre BA25
- Placo® Phonique BA13
- Placo® Duo'Tech® 16
- Placo® Duo'Tech® 19
- Placo® Duo'Tech® 25
- Fermacell 10
- Fermacell 12.5
- Fermacell 15
- Fermacell 18
- Carreaux de plâtre 70

Category	Manufacturer
All Categories	All Manufacturers
Fibre Cement	Fermacell
Glazing	Generic
Gypsum	Générique
Insulated Panel	Placo Saint Gobain
Masonry	
Other	
Profiled Metal	
Wood	

Panel 1: Layer 1

Fermacell 10

Property	Unit	Value
Thickness	10	(mm)
Density	1150	(kg/m ³)
Youngs Modulus	3,8	(GPa)
Damping	0,007	
fc	3568	Hz
Surface Mass	11,5	kg/m ²
Material Type	Isotropic	
Category	Gypsum	
Colour	15658734	
Single Panel Rating: Rw	30	dB
Manufacturer	Fermacell	
Regions	China,France,Germa...	

Isolant intermédiaire

Single	Double	Triple
Panel 1	Frame 1	Panel 2 Leak

<p>Frame Material</p> <ul style="list-style-type: none"> All Masonry <li style="background-color: #e1eef6;">Metal Timber 	<p>Frame Type</p> <ul style="list-style-type: none"> <li style="background-color: #e1eef6;">Suspentes métalliques Suspentes Akustik+Sylomer® 1 (AMC) Suspentes Akustik+Sylomer® 3 (AMC) Profilés en Z (Z Girt (UK) Poutres métalliques en C (1.0-1.6mm) Poutres métalliques en C + rail résilient 	<p>Frame Parameters</p> <p>Cavity Width <input style="width: 50px;" type="text" value="85.00"/> (mm)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Keep cavity width constant</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Absorption

Search Absorber Thickness (mm) Number of < 1 >

<p>Product</p> <ul style="list-style-type: none"> <li style="background-color: #e1eef6;">Fibreglass (22kg/m3) Fibreglass (22kg/m3) Laine de verre rouleau Laine de verre semi-rigide Laine de verre rigide 	<p>Category</p> <ul style="list-style-type: none"> All Eco Material <li style="background-color: #e1eef6;">Fibreglass Mineral Wool 	<p>Manufacturer</p> <ul style="list-style-type: none"> All Manufacturers Generic Générique
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Cavity 4

Fibreglass (22kg/m3)

Property	Unit	Value
Thickness	70	(mm)
Flow Resistivity	10000	Rayl/m
Density	10	(kg/m3)
Category	FibreGlass	
Colour	37265	
Manufacturer	Generic	
Regions	Australia,France,New...	

Panneau inférieur

Single		Double		Triple	
Panel 1	Frame 1	Panel 2	Leak		
Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6

Search Thickness (mm) Number of 2 Panel 2→3

Products

- Plaque de plâtre BA18
- Plaque de plâtre BA18 Haute Dureté
- Plaque de plâtre BA25
- Placo® Phonique BA13
- Placo® Duo'Tech® 16
- Placo® Duo'Tech® 19
- Placo® Duo'Tech® 25
- Fermacell 10
- Fermacell 12.5
- Fermacell 15**
- Fermacell 18
- Carreaux de plâtre 70

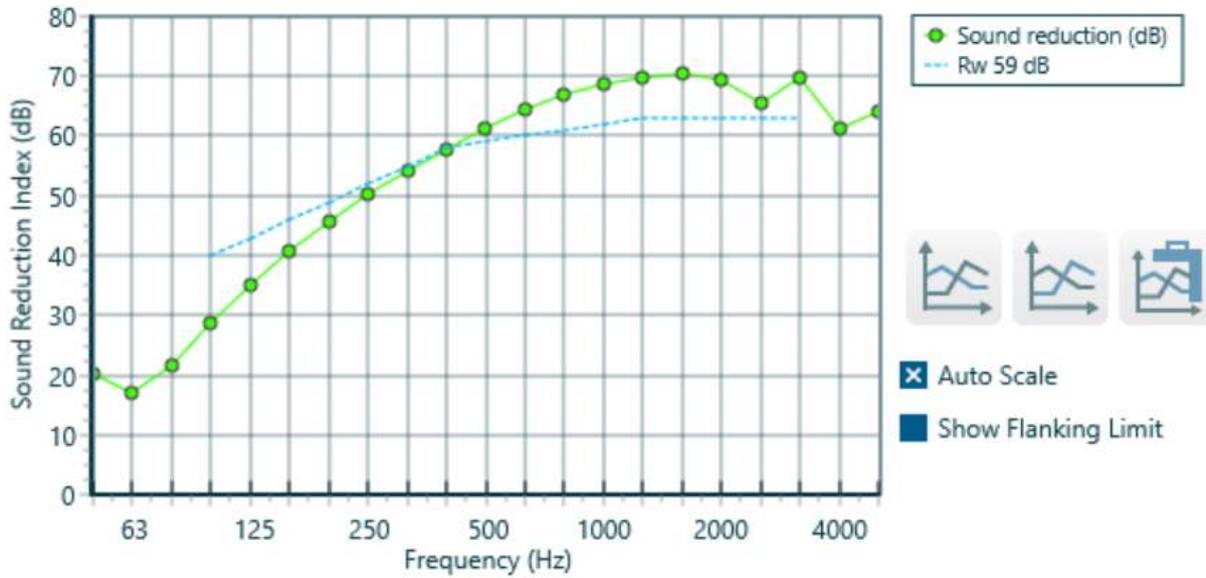
Category	Manufacturer
All Categories	All Manufacturers
Fibre Cement	Fermacell
Glazing	Generic
Gypsum	Générique
Insulated Panel	Placo Saint Gobain
Masonry	
Other	
Profiled Metal	
Wood	

Panel 2: Layer 1

Fermacell 15

Property	Unit	Value
Thickness	15	(mm)
Density	1150	(kg/m ³)
Youngs Modulus	3,8	(GPa)
Damping	0,007	
fc	2379	Hz
Surface Mass	34,5	kg/m ²
Material Type	Isotropic	
Category	Gypsum	
Colour	15658734	
Single Panel Rating: Rw	37	dB
Manufacturer	Fermacell	
Regions	China,France,Germa...	

Indice d'affaiblissement acoustique



4.2. Système à poutres en C avec panneaux en plaque de plâtre et suspentes antivibratoire

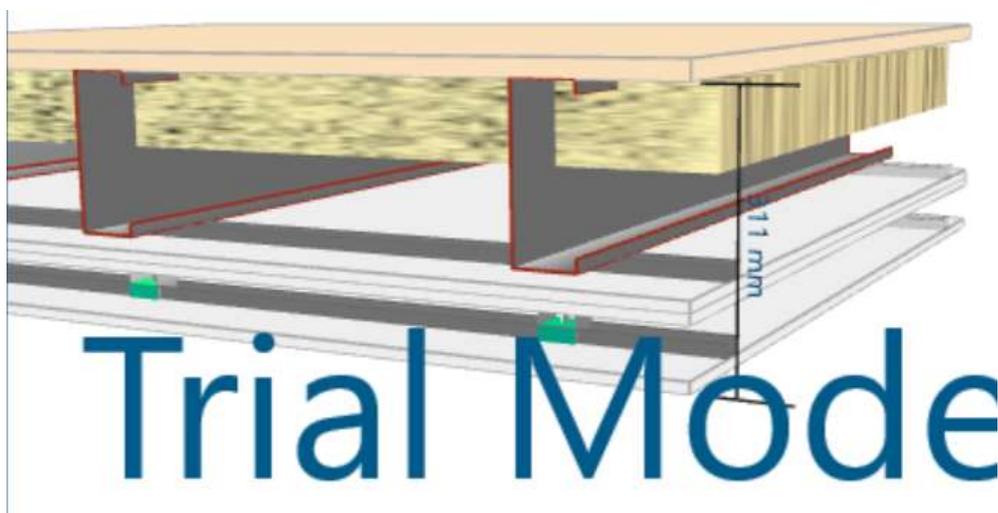
Description et calcul acoustique du système à deux lames d'air proposé.

Description

Ceiling: + 1 x 22 mm Panneau de particules orientées (OSB4) + Poutres métalliques en C + rail résilient (200 mm x 75 mm), Cavity Width 212 mm + 100 mm Laine de verre semi-rigide + 2 x 12,5 mm Plaque de plâtre BA13 + Suspentes Akustik + Sylomer®3 (AMC) (-160 mm x 50 mm), Cavity Width 40 mm (Empty cavity) 1 x 12,5 mm Plaque de plâtre BA13

Schéma représentatif

Vu schématique du plafond à deux lames d'air analysé.



Panel 1: fc: 1077Hz Surface Mass 14,1 kg/m² Version 9.0.23

Panel 2: fc: 2842Hz Surface Mass 18,0 kg/m² Version 9.0.23

Panel 3: fc: 2842Hz Surface Mass 9,0 kg/m² Version 9.0.23

fo: 42, 146Hz Total Mass: 44,8 kg/m² Version 9.0.23

Panneau supérieur

Single	Double		Triple		
Panel 1	Frame 1	Panel 2	Frame 2	Panel 3	Leak
Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6

Search Thickness (mm) Number of 1 Panel 1→2 1→3

Products

- Panneau de particules (CTBH)
- Panneau medium (MDF)
- Panneau de particules orientées (OSB3)
- Panneau de particules orientées (OSB4)
- Bois lamellé croisé 3 plis (CLT)
- Bois lamellé croisé 5 plis KLH (CLT)
- Pin
- Chêne
- Mélèze
- Sapin / Épicéa
- Châtaigner
- Douglas

Category

- All Categories
- Fibre Cement
- Glazing
- Gypsum
- Insulated Panel
- Masonry
- Other
- Profiled Metal
- Wood

Manufacturer

- All Manufacturers
- Empty
- Générique
- Stora Enso

Panel 1: Layer 1

Panneau de particules orientées (OSB4)

Property	Unit	Value
Thickness	22	(mm)
Density	640	(kg/m ³)
Youngs Modulus	4,8	(GPa)
Damping	0,020	
fc	1077	Hz
Surface Mass	14,1	kg/m ²
Material Type	Isotropic	
Category	Wood	
Colour	12378106	
Single Panel Rating: Rw	28	dB
Manufacturer	Empty	
Regions	France,	

Isolant intermédiaire

Single		Double		Triple											
Panel 1	Frame 1	Panel 2	Frame 2	Panel 3	Leak										
Frame Material All Masonry Metal Timber Frame 1→2		Frame Type Suspentes métalliques Suspentes Akustik+Sylomer®1 (AMC) Suspentes Akustik+Sylomer®3 (AMC) Profilés en Z (Z Girt (UK) Poutres métalliques en C (1.0-1.6mm) Poutres métalliques en C + rail resilient		Frame Parameters Cavity Width: 212,00 (mm) Stud Width: 75,00 (mm) Stud Depth: 200,00 (mm) Stud Spacing: 600,0 (mm) <input checked="" type="checkbox"/> Keep cavity width constant											
Absorption Search <input type="text"/> <input type="button" value="↻"/> Absorber Thickness: 100,0 (mm) Number of: < 1 >															
Product Fibreglass (22kg/m3) Fibreglass (22kg/m3) Laine de verre rouleau Laine de verre semi-rigide Laine de verre rigide		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Manufacturer</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>All</td> <td>All Manufacturers</td> </tr> <tr> <td>Eco Material</td> <td>Generic</td> </tr> <tr> <td>Fibreglass</td> <td>Générique</td> </tr> <tr> <td>Mineral Wool</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Category	Manufacturer	All	All Manufacturers	Eco Material	Generic	Fibreglass	Générique	Mineral Wool	
Category	Manufacturer														
All	All Manufacturers														
Eco Material	Generic														
Fibreglass	Générique														
Mineral Wool															

Frame 4

Poutres métalliques en C + rail resilient

Property	Unit	Value
Stud Spacing	600	(mm)
Stud Depth	200	(mm)
Stud Width	75	(mm)
Cavity Width	212	(mm)
Mass-air-mass resonance fo	428&0	Hz
Colour	13421772	
Regions	Australia,Belgium,Br...	

Cavity 4

Laine de verre semi-rigide

Property	Unit	Value
Thickness	100	(mm)
Flow Resistivity	15000	Rayl/m
Density	30	(kg/m3)
Category	FibreGlass	
Colour	11200507	
Manufacturer	Générique	
Regions	Belgium,France,	

Panneau intermédiaire

Single
Double
Triple

Panel 1	Frame 1	Panel 2	Frame 2	Panel 3	Leak
Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6

↻
Thickness (mm)
Number of < 2 >
Panel 2→3 2→

<p>Products</p> <ul style="list-style-type: none"> Plaque de plâtre BA13 Plaque de plâtre BA13 Haute Dureté Plaque de plâtre BA13 Très Haute Dureté Plaque de plâtre BA15 Plaque de plâtre BA15 Très Haute Dureté Plaque de plâtre BA18 Plaque de plâtre BA18 Haute Dureté Plaque de plâtre BA25 Placo® Phonique BA13 Placo® Duo'Tech® 16 Placo® Duo'Tech® 19 Placo® Duo'Tech® 25 	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="background-color: #0056b3; color: white;">Category</th> <th style="background-color: #0056b3; color: white;">Manufacturer</th> </tr> <tr> <td>All Categories</td> <td style="background-color: #0056b3; color: white;">All Manufacturers</td> </tr> <tr> <td>Fibre Cement</td> <td>Empty</td> </tr> <tr> <td>Glazing</td> <td>Générique</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #0056b3; color: white;">Gypsum</td> <td>Stora Enso</td> </tr> <tr> <td>Insulated Panel</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Masonry</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Profiled Metal</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wood</td> <td></td> </tr> </table>	Category	Manufacturer	All Categories	All Manufacturers	Fibre Cement	Empty	Glazing	Générique	Gypsum	Stora Enso	Insulated Panel		Masonry		Other		Profiled Metal		Wood	
Category	Manufacturer																				
All Categories	All Manufacturers																				
Fibre Cement	Empty																				
Glazing	Générique																				
Gypsum	Stora Enso																				
Insulated Panel																					
Masonry																					
Other																					
Profiled Metal																					
Wood																					

Panel 2: Layer 1

Plaque de plâtre BA13

Property	Unit	Value
Thickness	12,5	(mm)
Density	720	(kg/m ³)
Youngs Modulus	2,4	(GPa)
Damping	0,008	
fc	2842	Hz
Surface Mass	18,0	kg/m ²
Material Type	Isotropic	
Category	Gypsum	
Colour	15658734	
Single Panel Rating: Rw	33	dB
Manufacturer	Placo Saint Gobain	
Regions	France,	

Lame d'air

Single		Double		Triple	
Panel 1	Frame 1	Panel 2	Frame 2	Panel 3	Leak

Frame Material

- All
- Masonry
- Metal**
- Timber

Frame 2→1

Frame Type

- Suspentes métalliques
- Suspentes Akustik+Sylomer®1 (AMC)
- Suspentes Akustik+Sylomer®3 (AMC)**
- Profilés en Z (Z Girt (UK)
- Poutres métalliques en C (1.0-1.6mm)
- Poutres métalliques en C + rail résilient

Frame Parameters

Cavity Width (mm)

Stud Width (mm)

Stud Depth (mm)

Stud Spacing (mm)

Keep cavity width constant

Absorption

Search

Absorber Thickness (mm) Number of

Product	Category	Manufacturer
Fibreglass (22kg/m ³)	All	All Manufacturers
Fibreglass (22kg/m ³)	Eco Material	Generic
Laine de verre rouleau	Fibreglass	Générique
Laine de verre semi-rigide	Mineral Wool	
Laine de verre rigide		

Panneau inférieur

Single		Double		Triple	
Panel 1	Frame 1	Panel 2	Frame 2	Panel 3	Leak
Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6

Search Thickness (mm) Number of 1 Panel 3→1 3→2

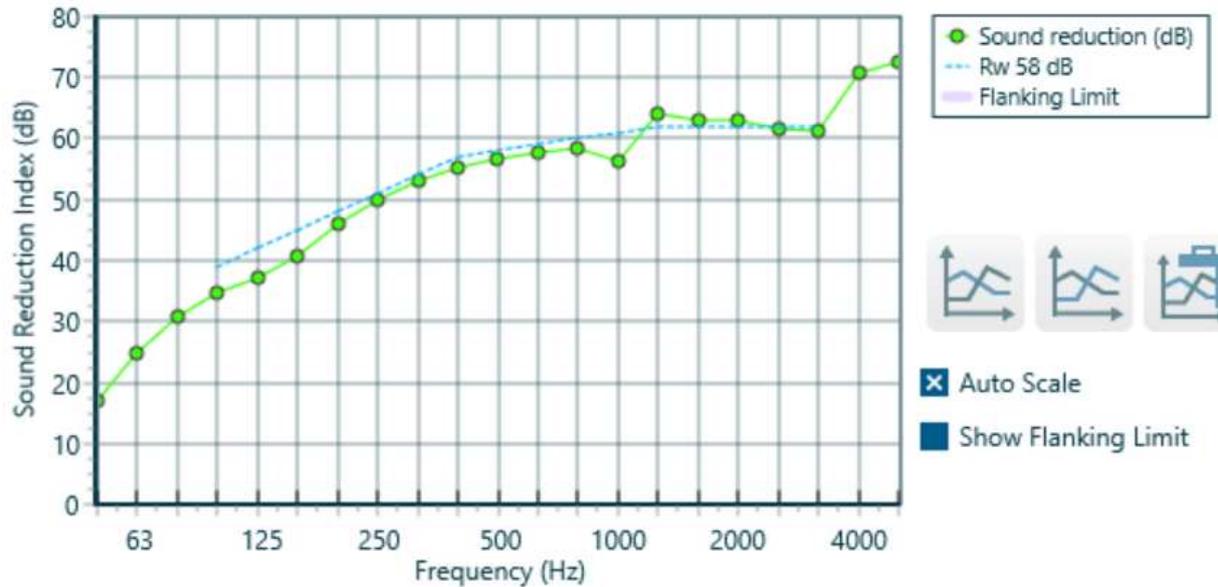
Products	Category	Manufacturer
Plaque de plâtre BA13	All Categories	All Manufacturers
Plaque de plâtre BA13 Haute Dureté	Fibre Cement	Empty
Plaque de plâtre BA13 Très Haute Dureté	Glazing	Générique
Plaque de plâtre BA15	Gypsum	Stora Enso
Plaque de plâtre BA15 Très Haute Dureté	Insulated Panel	
Plaque de plâtre BA18	Masonry	
Plaque de plâtre BA18 Haute Dureté	Other	
Plaque de plâtre BA25	Profiled Metal	
Placo® Phonique BA13	Wood	
Placo® Duo'Tech® 16		
Placo® Duo'Tech® 19		
Placo® Duo'Tech® 25		

Panel 3: Layer 1

Plaque de plâtre BA13

Property	Unit	Value
Thickness	12,5	(mm)
Density	720	(kg/m ³)
Youngs Modulus	2,4	(GPa)
Damping	0,008	
fc	2842	Hz
Surface Mass	9,0	kg/m ²
Material Type	Isotropic	
Category	Gypsum	
Colour	15658734	
Single Panel Rating: Rw	27	dB
Manufacturer	Placo Saint Gobain	
Regions	France,	

Indice d'affaiblissement acoustique



4.3. Calcul du coefficient d'adaptation C

Ci-dessous, dans le tableau on détaille à titre d'exemple le calcul du coefficient d'adaptation C d'un des plusieurs systèmes de plafond proposé dans ce travail. Ce calcul correspond au plafond à deux lames d'air traité dans la partie 3.2. des annexes. Ce coefficient est important dans le but de calculer l'affaiblissement effectif du plafond déterminé par : $R_w + C$

Fréquence (Hz)	Ri (dB)	spectre n°1	Li1 - Ri	$10^{(Li1 - Ri)/10}$
100	35	-29	-64	3,98107E-07
125	37,9	-26	-63,9	4,0738E-07
160	40,5	-23	-63,5	4,46684E-07
200	47,1	-21	-68,1	1,54882E-07
250	50	-19	-69	1,25893E-07
315	53,7	-17	-70,7	8,51138E-08
400	55,7	-15	-70,7	8,51138E-08
500	56,1	-13	-69,1	1,23027E-07
630	58	-12	-70	0,0000001
800	59	-11	-70	0,0000001
1000	56,5	-10	-66,5	2,23872E-07
1250	63	-9	-72	6,30957E-08
1600	62	-9	-71	7,94328E-08
2000	62	-9	-71	7,94328E-08
2500	60,7	-9	-69,7	1,07152E-07
3150	60,2	-9	-69,2	1,20226E-07
Rw (dB) =	58	Somme		2,69941E-06
		$-10 * \text{LOG}(\text{somme})$		55,68730891
C =		-2		

5. Systèmes de plancher bois

Dans cette partie, on détaille la composition des systèmes en lamellé collé (BLC), en cotre collé (CLT) et des caissons (CLT Box) proposés. Les valeurs des affaiblissements acoustiques de ces planchers ont été déterminés par d'essais de laboratoire.

CLT BOX 5

Le système CLT Box 5 Surclasse les autres solutions pour une portée minimale de 5,7 mètres, un affaiblissement acoustique minimale de 61 dB et un poids maximal de 2,2 KN/m²

Les caissons CLT-Box sont disponibles en bois européen ou en bois du nord, livrables en qualité visible ou industrielle. Ils sont composés d'un panneau CLT inférieur, de 3 membrures en bois d'ossature refendu et d'un panneau supérieur en CLT.

Épaisseurs 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480 mm

Longueurs de 2,30 à 16,00 m

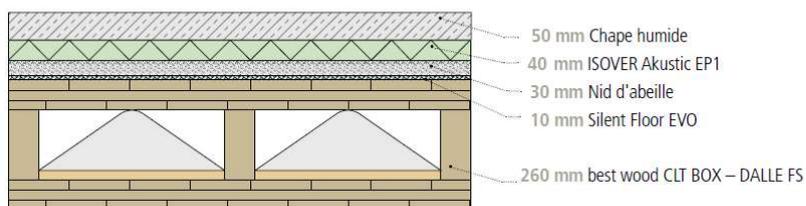
Largeurs de 900 à 1200 mm

CLT inférieur [mm] 60 et 90 mm en cas d'exigences de protection au feu élevées

CLT supérieur 60 mm



■ CLT BOX Construction de plancher 5



R_w (C; C ₂)	$L_{T,w}$ (C, C ₁₀₀₋₂₀₀₀)	AB
70,4 dB (-1; -5)	42,1 dB (0; +2)	1

CLT 2

Le système CLT 2 surclasse les autres solutions

Les dalles CLT sont disponibles en bois européen ou en bois du nord, livrables en qualité visible ou industrielle.

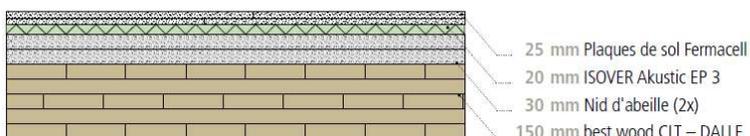
Épaisseurs 60, 80, 90, 100, 120, 140, 160 180, 200, 220, 240, 260, 280 mm

Longueur 2,30 à 16,00 m

Largeurs de 900 à 1200 mm



■ CLT Construction de plancher 2



R_w (C; C ₂)	$L_{T,w}$ (C, C ₁₀₀₋₂₀₀₀)	AB
64,0 dB (-5; -12)	51,7 dB (0; +5)	1+2

BLC 11

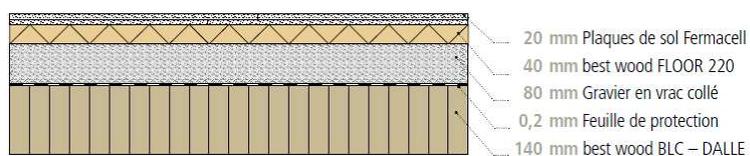
Le système BLC 11 surclasse les autres solutions

Les dalles massives BLC sont disponibles en bois européen, bois du nord ou en mélèze, livrables en qualité visible ou industrielle.

Épaisseurs	100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280 mm
Longueurs de	2,30 à 8,00 m
Largeurs de	500 à 1000 mm



■ BLC Construction de plancher 11



R_w (C; C ₂)	$L_{n,w}$ (C; C ₂ ; 200)	AB
61,0 dB (-1; -5)	51,0 dB (-1; +2)	1+2

6. Exemple de vérification de résistance et de flèche pour le CLT 2

Ci-dessous, on montre la note de calcul réalisé avec le logiciel best wood statics fournis par l'entreprise Schneider. Les mêmes calculs ont été réalisés pour les autres systèmes pour vérifier la résistance et la flèche.



Projekt:
Position:
Datum: 04.05.2021
best wood STATICS 3.1 (20210115)

Seite: 1 von 4

Deckenelement, Position:

Eingabedaten

Querschnittstyp: BSH – DECKE
Schnitt (Ansicht):



Elementhöhe $h = 140$ mm
Elementbreite $b = 1200$ mm
Festigkeitsklasse GL 24h nach DIN EN 14080:2013-09

Hinweise:

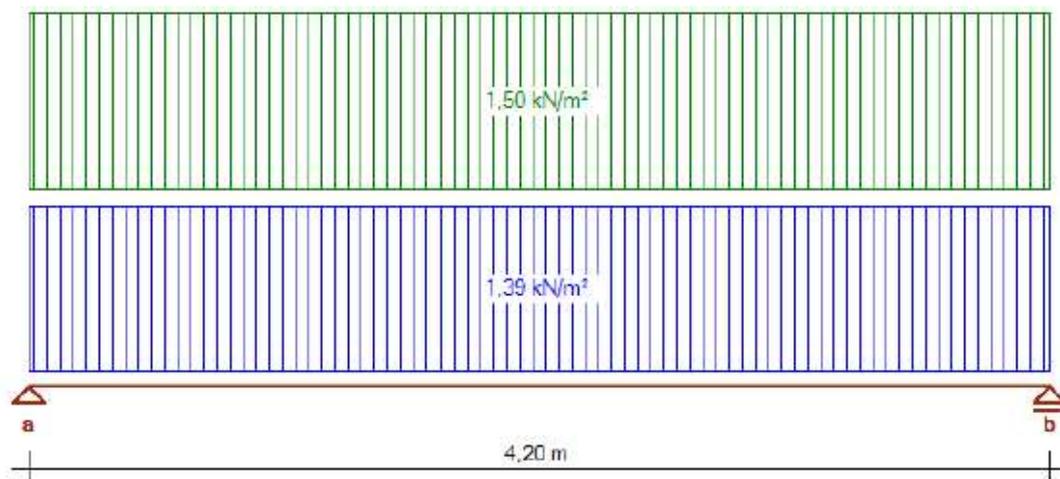
Die Produktionsabmessungen sind nicht eingehalten:
BSH: $0,5 \text{ m} \leq B \leq 1,0 \text{ m}$ und $L \leq 18,0 \text{ m}$

Verlegevariante



Ausbildung der Elementstöße über Verlegevariante "Variante 4".
Die Ausfräsungen für Einlegebretter oder Stufenfalze werden im Nachweis der Tragfähigkeit mitberücksichtigt.

Statisches System und Belastung





Projekt:
 Position:
 Datum: 04.05.2021
 best wood STATICS 3.1 (20210115)

Seite: 2 von 4

Felder:

	Feldlänge l [m]	effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} [Nmm ²]
Feld 1	4,20	3,16E+12

Charakteristische Lasten

	EWK	Last [kN/m ²]	Streckenlast [kN/m]	Abstand [m]
Feld 1	g	1,39	-	-
	A	1,50	-	-

Der Fußbodenaufbau ist in obenstehender Grafik und Tabelle mit 0,39 kN/m² berücksichtigt und aufgeführt.

Das Eigengewicht des Elements ist programmintern mit 0,70 kN/m² berücksichtigt.

Einwirkungskategorien

Nach DIN EN 1990:2010-12 + NA:2010-12 und DIN EN 1991-1-1:2010-12 + NA:2010-12.

EWK	Bezeichnung	ψ_0	ψ_1	ψ_2	γ	feldweise	KLED
g	Ständige Lasten	1,00	1,00	1,00	1,35	nein	ständig
A	Wohn- und Aufenthaltsräume	0,70	0,50	0,30	1,50	ja	mittel

Vertikale charakteristische Auflagerkräfte

Auflager	min/max g_k [kN/m]	min/max $q_{k,EWK=A}$ [kN/m]
a	- / 4,39	0,00 / 3,15
b	- / 4,39	0,00 / 3,15

Bemessungsschnittgrößen

Grenzzustand der Tragfähigkeit (Kaltbemessung), maßg. KLED = ständig

	min/max M_d [kNm]	min/max V_d [kN]	min/max N_d [kN]
Feld 1	0,00 / 7,46	-7,10 / 7,10	0,00 / 0,00

Grenzzustand der Tragfähigkeit (Kaltbemessung), maßg. KLED = mittel

	min/max M_d [kNm]	min/max V_d [kN]	min/max N_d [kN]
Feld 1	0,00 / 13,41	-12,77 / 12,77	0,00 / 0,00



Projekt:
 Position:
 Datum: 04.05.2021
 best wood STATICS 3.1 (20210115)

Seite: 3 von 4

Brandfall

	min/max M_d [kNm]	min/max V_d [kN]	min/max N_d [kN]
Feld 1	0,00 / 7,51	-7,15 / 7,15	0,00 / 0,00

Bemessung BSH – DECKE

Nach DIN EN 1995-1-1:2010-12 + NA:2013-08 und DIN EN 1995-1-2:2010-12 + NA:2010-12.

Allgemein

Nutzungsklasse 1
 Elementhöhe $h = 140$ mm
 Elementbreite $b = 1200$ mm
 Festigkeitsklasse GL 24h nach DIN EN 14080:2013-09

Char. Biegefestigkeit $f_{m,k} = 24,0$ N/mm² (zzgl. 20% Erhöhung infolge Hochkantbiegebeanspruchung gemäß DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, NCI Zu 3.3, (NA.6))
 Char. Schubfestigkeit $f_{v,k} = 3,50$ N/mm²
 Rissfaktor $k_{cr} = 0,71$

Grenzzustand der Tragfähigkeit (Kaltbemessung)

$k_{mod,ständig} = 0,60$
 $k_{mod,mittel} = 0,80$
 $\gamma_M = 1,30$

Normal- und Biegespannungsnachweise:

	$\sigma_{m,d}$ [N/mm ²]	$\sigma_{t/c,d}$ [N/mm ²]	η [-]	maßg. KLED
Feld 1	3,42	0,00	0,19 ✓	mittel

Schubspannungsnachweise:

	$\tau_{v,d}$ [N/mm ²]	η [-]	maßg. KLED
Feld 1	0,16	0,07 ✓	mittel

Die Schubnachweise werden mit min/max V_d geführt.

Brandbemessung

Der Abbrand erfolgt 1-seitig von unten.

$k_{fl} = 1,25$
 $k_{mod,fl} = 1,00$
 $\gamma_{M,fl} = 1,00$
 $k_0 = 1,00$
 $d_0 = 7,00$ mm
 $\beta_n = 0,80$ mm/min
 $t = 60$ min
 $d_{eff} = 49,00$ mm

Normal- und Biegespannungsnachweise:

	$\sigma_{m,d}$ [N/mm ²]	$\sigma_{t/c,d}$ [N/mm ²]	η [-]
Feld 1	4,53	0,00	0,16 ✓



Projekt:
Position:
Datum: 04.05.2021
best wood STATICS 3.1 (20210115)

Seite: 4 von 4

Schubspannungsnachweise:

	$\tau_{v,d}$ [N/mm ²]	η [-]
Feld 1	0,10	0,03 ✓

Die Schubnachweise werden mit min/max V_d geführt.

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Deformationsbeiwert $k_{def} = 0,60$

$u_{inst} < t / 500$

$u_{fin} < t / 500$

$u_{net,fin} < t / 500$

	u_{inst} [mm]	u_{fin} [mm]	$u_{net,fin}$ [mm]	max η [-]
Feld 1	5,53	7,87	6,26	0,94 ✓

7. Système de plancher à poutres en C

Dans cette partie on présente l'analyse réalisé pour les systèmes de plancher en C analyses. Tous ces systèmes présentent la même capacité portante, ce qui change d'un système à autre c'est la taille de la section utilisé et entraxe entre deux poutres.

Hypothèse de charge

G1 - Poids Propre	Var.	daN/m
G2 - Charge permanente	100	daN/m ²
Q1 - Charges d'exploitation	150	daN/m ²

Longueur des solives

$L = 3,7$ m

Ci-dessous, dans le tableau on répertorie les caractéristiques géométriques et de chargement des différents systèmes de plancher en C.

Section en C								
Système de plancher	Hauteur	Largeur	Epaisseur	Rayon	Matériau	G1	G1'	Entraxe
	h (mm)	b (mm)	t (mm)	r (mm)	S---	daN/m	daN/m ²	m
Système 1	350	100	3	5	235	12,57	5,03	2,5
Système 2	350	100	2	5	235	8,44	7,03	1,2
Système 3	300	100	3	5	235	11,68	5,84	2
Système 4	300	100	2	5	235	7,66	7,66	1

Système 5	300	50	3	5	235	9,04	5,32	1,7
Système 6	300	50	2	5	235	6,09	6,09	1
Système 7	250	100	3	5	235	10,22	6,81	1,5
Système 8	250	100	2	5	235	6,87	8,59	0,8
Système 9	250	50	3	5	235	7,86	6,05	1,3
Système 10	250	50	2	5	235	5,3	6,63	0,8
Système 11	200	50	3	5	235	6,68	7,42	0,9
Système 12	200	50	2	5	235	4,52	7,53	0,6
Système 13	150	50	3	5	235	5,51	9,18	0,6
Système 14	150	50	2	5	235	3,73	9,33	0,4

Tableau 57. Caractéristiques géométriques et de charge des plancher en C

Ci-dessous, dans le tableau on répertorie les résultats de différentes systèmes de plancher en C.

Système de plancher	Ratio	Ratio	Ratio	Ratio
	$M_y, E_d / M_y, c, R_d$	$V E_d / V_b, R_d$	$V E_d / R_w, r_d$	U_z / f_{limite}
Système 1	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00
Système 2	0,61	0,19	1,77	0,37
Système 3	0,61	0,30	2,34	0,26
Système 4	0,59	0,16	1,34	0,40
Système 5	0,61	0,22	1,75	0,32
Système 6	0,59	0,13	1,14	0,56
Système 6	0,64	0,21	1,74	0,48
Système 7	0,61	0,12	0,95	0,50
Système 8	0,60	0,14	1,27	0,39
Système 9	0,60	0,10	0,82	0,68
Système 10	0,63	0,14	1,27	0,61
Système 11	0,59	0,08	0,54	0,84
Système 12	0,66	0,11	0,87	0,80
Système 13	0,61	0,07	0,35	1,14
Système 14	0,70	0,07	0,54	1,09

Tableau 58. Résultats de résistance des plancher en C

8. Méthode Electre I

Dans cette partie, on décrit la méthode de surclassement utilisé pour classer les différents systèmes de planchers par rapport à plusieurs critères.

Indice de concordance $c(a, b) : \forall a, b \in A$

$$c(a, b) = \frac{1}{\sum_{j=1}^p p_j} \sum_{j/g_{j(a)} \geq g_{j(b)}} p_j$$

- Varie de 0 à 1 (normalisation des poids)
- Mesure les arguments en faveur de « a surclasse b »
- Corresponds à une procédure où chaque groupe de votants (mesuré par son importance) exprime sa préférence d'a sur b.
- Ne nécessite pas la comparabilité entre les critères (Comparaison critère par critère)

Construction de la relation de surclassement.

Indice de discordance $d(a, b)$ (critères quantitatifs et comparables) :

$$d(a, b) = \begin{pmatrix} 0 \text{ si } \forall j, g_{j(a)} \geq g_{j(b)} \\ \frac{1}{\delta} \max_j (g_{j(b)} - g_{j(a)}) \text{ sinon} \\ \text{où } \delta = \max_{c,d,j} (g_{j(c)} - g_{j(d)}) \end{pmatrix}$$

- Mesure la force d'un argument (maximal) en faveur de « a est au moins aussi bon que b »
- Exprime le fait que le décideur ne peut pas accepter la préférence de a sur b si b est largement meilleur que a dans un critère (quel que soit le nombre de critères en faveur de a sur b)
- L'indice $d(a, b)$ est d'autant plus grand que la préférence de a sur b est faible sur un critère.

9. Programme pour le surclassement des planchers

Ci-dessous, on montre comme exemple un des programmes réalisés sur VBA concernant la méthode de surclassement Electre I. Ce programme permet de surclasser les différents systèmes de planchers proposés dans ce travail. Certaines parties du programme ont été complétées directement par des formules sur la feuille Excel.

'Méthode Electre I pour le surclassement des planchers étudiés

'Normalisation du tableau des critères

Sub table_normalisé()

'Déclaration des variables

Dim Mx(3) As Single

Dim Mn(3) As Single

Dim d(3) As Single

Dim myrange(3) As Range

Dim i As Integer

Dim j As Integer

i = 0

j = 0

'on crée une boucle pour déterminer les valeurs maximum et minimum de chaque critère d'évaluation

```
For i = 0 To 3
```

```
For j = 0 To 5
```

'On sélectionne les rangs dans lesquels se retrouvent les valeurs des critères

```
Set myrange(i) = ActiveSheet.Range(Cells(6, 4 + i), Cells(13, 4 + i))
```

'On sélectionne les valeurs maximales, minimaux et l'amplitude des différents critères

```
Mx(i) = Application.WorksheetFunction.Max(myrange(i))
```

```
Mn(i) = Application.WorksheetFunction.Min(myrange(i))
```

```
d(i) = Abs(Mx(i) - Mn(i))
```

'On crée un tableau des critères normalisé tout en maximisant ou en minimisant les critères

```
If Cells(23, i + 4) = "Maximiser" Then
```

```
Cells(j + 25, i + 4).Value = Abs(Cells(j + 6, i + 4) - Mn(i)) / d(i)
```

```
Else
```

```
Cells(j + 25, i + 4).Value = Abs(Cells(j + 6, i + 4) - Mx(i)) / d(i)
```

```
End If
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
Range(Cells(94, 10), Cells(105, 21)) = ""
```

```
End Sub
```

```
Sub concordance ()
```

'Les valeurs de concordance ont été obtenues directement par l'application des formules sur Excel et dans cette partie ont établi s'il y a concordance ou non par comparaison des valeurs.

'En prenant en compte le seuil de concordance, on détermine s'il y a concordance d'après les valeurs obtenues dans le tableau de concordance en suivant la méthode Electre I

```
For m = 0 To 5
```

```
For n = 0 To 5
```

'Condition de concordance.

```
If Cells(25 + m, 10 + n).Value >= Cells(55, "I").Value Then
```

```
Cells(63 + m, 10 + n) = "Oui"
```

```
Cells(63 + m, 10 + n).Interior.Color = vbGreen
```

```
Else
```

'condition de non-concordance

```
Cells(63 + m, 10 + n) = "Non"
```

```
Cells(63 + m, 10 + n).Interior.Color = vbRed
```

```
End If
```

```
Next n
```

```
Next m
```

'En prenant en compte le seuil de discordance, on détermine s'il y a discordance d'après les valeurs obtenues dans le tableau de discordances en suivant la méthode Electre I

'Les valeurs de discordance ont été obtenues directement par l'application des formules sur Excel et dans cette partie ont établi s'il y a discordance ou non par comparaison des valeurs.

```
For p = 0 To 5
```

```
For q = 0 To 5
```

'Condition de discordance

```
If Cells(42 + p, 10 + q).Value <= Cells(56, "I").Value Then
```

```
Cells(78 + p, 10 + q) = "Oui"
```

```
Cells(78 + p, 10 + q).Interior.Color = vbGreen
```

```
Else
```

'Condition de non-discordance

```
Cells(78 + p, 10 + q) = "Non"
```

```
Cells(78 + p, 10 + q).Interior.Color = vbRed
```

```
End If
```

```
Next q
```

```
Next p
```

'On détermine les relations de surclassement entre les différentes options choisies

```
For t = 0 To 5
```

```
For v = 0 To 5
```

'Condition de surclassement

```
If Cells(63 + t, 10 + v) = "Oui" And Cells(78 + t, 10 + v) = "Oui" Then
```

```
Cells(94 + t, 10 + v).Interior.Color = vbGreen
```

```
Cells(94 + t, 10 + v) = Cells(94 + t, 9) & " Surclasse " & Cells(93, 10 + v)
```

```
Else
```

```
'S'il n'y a pas surclassement
```

```
Cells(94 + t, 10 + v).Interior.Color = vbRed
```

```
End If
```

```
Next v
```

```
Next t
```

```
End Sub
```

'Dans cette partie, on rajoute des filtres complémentaires à choisir par l'utilisateur en fonctions des besoins

```
Sub contraintes ()
```

```
Range (Cells(112, "j"), Cells(123, "U")) = ""
```

```
Dim solutions (64) As String
```

```
Range (Cells(112, "J"), Cells(123, "U")).Interior.Color = vbWhite
```

```
'Boucle pour la vérification des filtres (valeurs des critères)
```

```
For i = 0 To 5
```

```
For j = 0 To 5
```

```
If Cells (6 + i, 7).Value >= Cells(112, 6).Value And Cells(6 + i, 6).Value >= Cells(112, 7).Value And  
Cells(6 + i, 5).Value <= Cells(112, 8).Value Then
```

```
'Si les filtres sont vérifiés par les données
```

```
Cells (112 + i, 10 + j) = Cells(94 + i, 10 + j)
```

```
Cells (112 + i, 10 + j).Interior.Color = Cells(94 + i, 10 + j).Interior.Color
```

```
'Si les filtres ne sont pas vérifiés
```

```
Else
```

```
Cells (112 + i, 10 + j) = ""
```

```
Cells (112 + i, 10 + j).Interior.Color = vbRed
```

```
End If
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
For i = 0 To 5
```

```
For j = 0 To 5
  If Cells (112 + j, 10 + i) <> "" Then
    solutions(i) = Cells (112 + j, 9)

    Cells(124, 11) = "Les meilleures solutions sont " & solutions(0) & " , " & solutions(1) & " , " &
solutions(2) & " , " & solutions(3) & " , " & solutions(4) ' & " , " & solutions(5) & " , " & solutions(6) &
" , " & solutions(7)

    End If
  Next j
Next i

End Sub
```