Avis Technique 3.3/18-958_V1

Panneaux structuraux en bois contrecollé-croisé, utilisés en mur et plancher

Cross laminated timber panels

HEXAPLI

Titulaire : PIVETEAU BOIS
La Vallée – BP 7 – Sainte Florence
FR-85140 Essarts-en-Bocage
Tél. : +33 2 51 66 01 88
Fax : +33 2 51 66 09 28
www.piveteaubois.com

Groupe Spécialisé n° 3.3

Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure et Produits

Publié le 4 juillet 2018

Commission chargée de formuler des Avis Techniques et Documents Techniques d'Application

(Arrêté du 21 mars 2012)

Secrétariat de la commission des Avis Techniques
CSTB, 84 avenue Jean Jaurès, Champs sur Marne, FR-77447 Marne la Vallée Cedex 2
Tél. : 01 64 68 82 82 - Internet : www.ccfat.fr

Les Avis Techniques sont publiés par le Secrétariat des Avis Techniques, assuré par le CSTB. Les versions authentifiées sont disponibles gratuitement sur le site internet du CSTB (http://www.cstb.fr)
© CSTB 2018

Le Groupe Spécialisé n°3.3 « Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure » de la Commission Chargée de formuler des Avis Techniques, a examiné le 13 février 2018, le procédé de panneaux structuraux en bois contrecollé-croisé, utilisés en mur et plancher HEXAPLI, présenté par la société PIVETEAU BOIS. Il a formulé sur ce procédé l'Avis Technique ci-après. L'Avis a été formulé pour les utilisations en France Européenne.

1. Définition succincte

1.1 Description succincte

Les panneaux structuraux HEXAPLI sont des panneaux de grandes dimensions constitués de planches en bois massif de classe C24 et C18 séchées et calibrées. Les planches sont empilées en couches croisées à 90° et collées entre elles sur toute leur surface. Les panneaux structuraux HEXAPLI comportent de 3 à 9 plis et sont destinés à la réalisation de planchers, de murs porteurs à fonction de contreventement.

Les panneaux HEXAPLI sont constitués de planches non collées à chants.

Les panneaux HEXAPLI ont les dimensions suivantes :

- Longueur jusqu'à 16 m ;
- Largeur jusqu'à 3,5 m ;
- Épaisseur de 60 à 360 mm.

1.2 Identification

Après fabrication selon le protocole décrit au §3.3 du Dossier Technique établi par le Demandeur les panneaux sont identifiés de la façon suivante :

- Lieu de fabrication ;
- Caractéristiques du panneau (dimensions, volume et poids, type de panneau, nombre et épaisseur de plis, finition) ;
- Essences et résistance mécanique des lamelles ;
- Type de colle ;
- Référence de la commande (client, chantier, destination, numéro de commande, d'étiquette et de panneau).

2. AVIS

L'Avis porte uniquement sur le procédé tel qu'il est décrit dans le Dossier Technique joint, dans les conditions fixées aux Prescriptions Techniques (§2.3).

2.1 Domaine d'emploi accepté

Le domaine d'emploi accepté par le Groupe Spécialisé n°3.3, à savoir les utilisations dans les bâtiments industriels, bâtiments d'habitation de la 1ère à la 3ème famille, de bureaux ou Etablissements Recevant du Public, en réhabilitation ou en construction neuve, dans les conditions énoncées aux paragraphes ci-après.

Le domaine d'emploi est limité à la réalisation de bâtiments R+3 ou 4 niveaux de surélévation, sans pour autant dépasser 18 m.

Les limitations du domaine d'emploi résultent du respect de la règlementation en vigueur applicable aux bâtiments, notamment vis-à-vis du Règlement de Sécurité pour la Construction.

Les panneaux structuraux HEXAPLI sont destinés à la réalisation d'ouvrages de structure en classes de service 1 et 2 au sens de la norme NF EN 1995-1-1 et en classes d'emploi 1 et 2 au sens de la norme NF EN 335.

L'Avis est formulé pour les utilisations en France européenne, zones sismiques 1 à 4 au sens de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié.

Pour la réalisation des planchers, le procédé est limité à la reprise de charges à caractère statique ou quasi-statique pour des catégories d'usage A, B, C1, C2, C3, et D1 au sens de la norme NF EN1991-1-1.

L'Avis est formulé en excluant la reprise des cloisons maçonnées ou fragiles. Les revêtements fragiles doivent être mis en place en pose désolidarisée sur un procédé faisant l'objet d'un Avis Technique visant les supports bois.

Les utilisations sous charges pouvant entraîner des chocs ou des phénomènes de fatigue n'ont pas été étudiées dans le cadre du présent Avis.

Les ouvrages enterrés en panneaux HEXAPLI sont exclus du domaine d'emploi.

Les utilisations des panneaux HEXAPLI en support de couverture et support d'étanchéité ne sont pas visées dans le cadre du présent Avis.

Les entures de grandes dimensions n'ont pas été étudiées dans le cadre du présent Avis.

Les éléments de levage ne sont pas visés par cet Avis Technique.

La mise en œuvre d'un système d'isolant thermique extérieure par enduit sur isolant sur les panneaux HEXAPLI doit faire l'objet d'un Avis Technique visant les supports bois dans les limitations d'usage de celui-ci.

Le domaine d'emploi proposé est limité aux locaux à faible ou moyenne hygrométrie, à l'exclusion des locaux à forte et très forte hygrométrie, c'est à dire ceux pour lesquels $W/n > 5g/m^3$, avec :

- W = quantité de vapeur d'eau produite à l'intérieur du local par heure ;
- n = taux horaire de renouvellement d'air.

2.2 Appréciation sur le procédé

2.21 Satisfaction aux lois et règlements en vigueur et autres qualités d'aptitude à l'emploi

Stabilité

La résistance et la stabilité du procédé sont normalement assurées dans le domaine d'emploi accepté sous réserve des dispositions complémentaires données aux Prescriptions Techniques (§2.3 ci-après et Annexe 1).

Sécurité en cas d'incendie

Résistance au feu

Conformément aux conditions prévues par l'Arrêté du 14 mars 2011 modifiant l'arrêté du 22 mars 2004 modifié relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages, les panneaux HEXAPLI, qu'ils soient utilisés en tant que porteur vertical ou horizontal, sont à même de satisfaire des degrés de stabilité au feu dans les conditions précisées dans l'appréciation de laboratoire de résistance au feu AL 17-212.

Réaction au feu

Les panneaux HEXAPLI bruts bénéficient d'un classement conventionnel en réaction au feu D-s2, d0 selon la norme NF EN 13501-1. L'adéquation entre ce classement et les exigences réglementaires doit être examinée au cas par cas en fonction du type de bâtiment et de l'emplacement du panneau dans l'ouvrage.

Propagation du feu aux façades

Dans les bâtiments pour lesquels il existe une exigence C+D, le calfeutrement en nez de plancher et autour des baies doit être réalisé selon l'IT 249.

Pour participer au C+D les panneaux HEXAPLI doivent justifier :

- D'un degré pare-flamme 1/2h (EI30) de l'extérieur vers l'intérieur pour les éléments placés au-dessus du plancher ;
- D'un degré pare-flamme 1h (EI60) de l'intérieur vers l'extérieur pour les éléments placés au-dessous du plancher (l'exigence est ramenée au degré de résistance requis de la structure si cette dernière est inférieure à 1h).

L'appréciation de laboratoire AL 17-212 précise dans quelles conditions ces exigences peuvent être atteintes.

Pose en zones sismiques

Le procédé HEXAPLI peut satisfaire aux exigences de sécurité en cas de séisme sous réserve du respect des conditions précisées aux Prescriptions Techniques.

Prévention des accidents lors de la mise en œuvre

La sécurité du travail sur chantier peut être normalement assurée, en ce qui concerne le procédé proprement dit, moyennant les précautions habituelles à prendre pour la manutention d'éléments préfabriqués de grandes dimensions. Une attention particulière doit être portée à la manutention des panneaux HEXAPLI destinés à la réalisation de murs munis d'ouvertures et transportés tels quels. Dans le cas où la phase de manutention génère des efforts nettement supérieurs à ceux subis par le panneau mis en œuvre dans l'ouvrage, les points d'attaches conçus et prescrits par PIVETEAU BOIS ou par les bureaux d'études techniques référencés par le service d'assistance technique doivent être respectés sur chantier.

Lors des phases provisoires, et tant que l'ensemble des éléments nécessaires au contreventement définitif de l'ouvrage ne sont pas mis en œuvre, la stabilité des panneaux HEXAPLI, en position verticale ou horizontale, doit être assurée au moyen d'un étaiement garantissant la stabilité particulière de chaque élément et la stabilité générale du

bâtiment en cours de construction. D'une manière générale, et quelle que soit la fonction du panneau HEXAPLI dans l'ouvrage, la mise en œuvre des panneaux HEXAPLI impose les dispositions usuelles relatives à la sécurité des personnes contre les chutes de hauteur.

Isolation thermique

Le procédé HEXAPLI présente une isolation thermique « moyenne » évaluée par le coefficient U de transmission surfacique calculable conformément aux règles Th-U, en prenant pour conductivité thermique utile du bois λ = 0,13 W/m.K, pour capacité thermique massique Cp = 1600 J/kg.K, et pour facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ = 50 (sec) et μ = 20 (humide). Ces valeurs correspondent à un résineux léger de classe mécanique C24 selon la norme NF EN 338 et dont la masse volumique moyenne, c'est-à-dire avec une teneur en humidité de 15 % selon la terminologie de la norme NF B 51-002, est ≤ 500kg.m-3.

Les panneaux HEXAPLI, peuvent nécessiter, selon leur emplacement dans l'ouvrage, la mise en œuvre d'une isolation thermique complémentaire.

Les valeurs et dispositions décrites dans les figures du Dossier Technique établi par le demandeur sont données à titre indicatif et n'ont pas été examinées par le GSn°3.3, une étude devra être réalisée au cas par cas. Sur les figures sont indiqués les isolants qui sont prescrits dans le DTU 31.2-P1-2 (CGM).

Un pare-vapeur sera systématiquement mis en œuvre sur la face du HEXAPLI exposée au climat intérieur (entre le panneau HEXAPLI et l'ouvrage en plaque de plâtre). La valeur de Sd (épaisseur de lame d'air équivalente) du pare-vapeur sera au minimum de 18m lorsque le revêtement extérieur est ventilé et de 90m le cas contraire.

Isolation acoustique

Les panneaux HEXAPLI seuls, qu'ils soient utilisés en tant que murs ou planchers, ne permettent pas toujours de satisfaire les exigences en vigueur en matière d'isolation acoustique entre logements dans les bâtiments d'habitation. L'atteinte des critères d'isolation fixés par la réglementation nécessite parfois la mise en œuvre de matériaux d'isolation acoustique ou d'ouvrages complémentaires par exemple un plafond suspendu.

L'efficacité du complexe ainsi constitué vis-à-vis de l'isolation acoustique dépend de la conception particulière du plafond et de sa suspension. Cette efficacité peut être jugée soit à partir d'essais après s'être assuré que la fréquence de résonance de l'ensemble plancher et plafond suspendu rapporté est inférieure à 60 Hz.

Cette fréquence peut être calculée par la formule

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{K\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)}$$

avec :

- f0 = la fréquence de résonance en Hz ;
- ml = la masse, en kilogramme, d'un mètre carré de plancher brut ;
- m2 = la masse, en kilogramme, d'un mètre carré de plafond rapporté ;
- K = le coefficient de raideur dynamique du dispositif de suspension du plafond ; il s'exprime en N/m et il correspond au rapport de la force, en N, à appliquer, au déplacement qui en résulte pour le dispositif de suspension, déplacement exprimé en mètres (m).

Ce coefficient K doit être rapporté à 1 m² de plancher. Dans le cas particulier d'utilisation de suspentes très courtes et rigides, réalisées en fers plats fixés sur les faces latérales des poutres en bois (voir DTU 25.41 « Ouvrages en plaques de parement en plâtre »), on ne peut pas connaître avec précision le coefficient de raideur dynamique K, ni de ce fait, la fréquence de résonance f0. Dans ce cas, seul un essai permet de déterminer l'indice d'affaiblissement acoustique de l'ensemble plancher et plafond suspendu rapporté.

Etanchéité à l'eau et à l'air

Les panneaux HEXAPLI eux-mêmes ne sont pas destinés à jouer un rôle vis-à-vis de l'étanchéité à l'eau ni de l'étanchéité à l'air.

Données environnementales

Le procédé HEXAPLI ne dispose d'aucune Déclaration Environnementale (DE) et ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière. Il est rappelé que les DE n'entrent pas dans le champ d'examen d'aptitude à l'emploi du procédé.

Aspects sanitaires

Le présent avis est formulé au regard de l'engagement écrit du titulaire de respecter la réglementation, et notamment l'ensemble des obligations réglementaires relatives aux produits pouvant contenir des substances dangereuses, pour leur fabrication, leur intégration dans les ouvrages du domaine d'emploi accepté et l'exploitation de ceux-ci. Le contrôle des informations et déclarations délivrées en application des réglementations en vigueur n'entre pas dans le champ du présent avis. Le titulaire du présent avis conserve l'entière responsabilité de ces informations et déclarations.

2.22 Durabilité - Entretien

Compte tenu de la limitation à des usages exposant les panneaux HEXAPLI aux classes d'emploi 1 et 2, leur durabilité face aux éléments fongiques peut être normalement assurée soit du fait de la durabilité naturelle de l'essence utilisée, soit par l'application d'un traitement de préservation dans les conditions fixées au § 2.317 des prescriptions techniques.

Le deuxième décret n° 2006-591 d'application de la loi n° 99-471 du 8 juin 1999 tendant à protéger les acquéreurs et propriétaires d'immeubles contre les termites et autres insectes xylophages » - dite loi termites, suivi par l'arrêté du 16 février 2010 modifiant l'arrêté du 27 juin 2006 relatif à l'application des articles R.112-2 et R. 112-4 du code de la construction et de l'habitation, vise la protection des bois et des matériaux à base de bois participant à la solidité des ouvrages et mis en œuvre lors de la construction de bâtiments neufs ou de travaux d'aménagement. Les panneaux HEXAPLI répondent à la réglementation en vigueur sous réserve des dispositions complémentaires données aux Prescriptions Techniques (§ 2.318 ci-après).

2.23 Fabrication et contrôle

La fabrication des panneaux HEXAPLI est assurée exclusivement par la société PIVETEAU BOIS sur le site de Sainte Florence. Le suivi de la production est effectué dans le cadre des procédures internes d'autocontrôle et fait l'objet d'un contrôle externe au moins deux fois par an par le FCBA.

2.3 Prescriptions techniques

2.31 Conditions de conception et de calcul

Lorsque des panneaux HEXAPLI sont utilisés pour assurer le contreventement, il est possible :

- Soit de les considérer comme une succession de panneaux isolés les uns des autres. Il est alors nécessaire de justifier leur tenue et celle de leurs ancrages en les considérant comme libres en tête et encastrés en pied. Ceci n'est applicable que si les panneaux sont fixés mécaniquement en pied et d'une largeur supérieure à 0,60 m. Il est également nécessaire de s'assurer de la présence d'une lisse haute transmettant l'effort horizontal et de justifier la transmission de l'effort aux panneaux par cette lisse ;
- Soit de considérer les liaisons entre panneaux. Il est alors nécessaire de justifier la tenue des panneaux et celles de leurs ancrages d'une part, de justifier la transmission des efforts de glissement entre panneaux d'autre part. Les dispositifs de liaisons entre panneaux sont ceux indiqués au Dossier Technique établi par le Demandeur.

La conception et le calcul des panneaux HEXAPLI sont à la charge du bureau d'études techniques référencé par le service d'assistance technique HEXAPLI qui doit également fournir un plan de pose complet.

PIVETEAU BOIS prête l'assistance technique nécessaire dans ce cadre en mettant notamment à disposition des acteurs de la construction une liste de bureau d'études techniques disposant de l'expertise requise pour le dimensionnement des panneaux HEXAPLI en respect des prescriptions techniques particulières du présent Avis et des normes en vigueur.

Un logiciel de prédimensionnement est tenu à disposition des bureaux d'étude par le titulaire afin de vérifier en phase définitive les éléments porteurs verticaux et horizontaux.

Les charges d'exploitation à prendre en considération dans les calculs sont celles précisées par la norme NF EN 1991 moyennant les limitations décrites §2.1.

2.311 Vérifications en phase définitive des éléments porteurs horizontaux

Les vérifications de la résistance sous l'effet du moment fléchissant et de l'effort tranchant peuvent être menées comme dit au §7.1 du Dossier Technique établi par le Demandeur, en considérant les combinaisons d'action des Eurocodes et en appliquant les coefficients k_{mod} fonction de la classe de service et de la durée d'application des charges. Les flèches sont alors calculées comme dit au §6.43 du Dossier Technique établi par le Demandeur. Il est tenu compte du fluage par le coefficient k_{def} pris selon l'Annexe 1 de la partie Avis.

La flèche finale ne pourra excéder L/250 où L est la portée du panneau entre appuis. La flèche est calculée en considérant les caractéristiques mécaniques finales des panneaux HEXAPLI.

La flèche instantanée due aux actions variables ne pourra excéder L/300 où L est la portée du panneau entre appuis. La flèche est calculée en considérant les caractéristiques mécaniques instantanées des panneaux HEXAPLI.

- En l'absence de précision fournie par la norme NF EN 1995-1-1 ou son Annexe Nationale, il convient de prendre pour les déplacements des éléments HEXAPLI les valeurs suivantes :

Pour les planchers, la flèche active, pouvant nuire aux revêtements de sols rigides, ne doit pas dépasser :

- soit la valeur fixée par les DTU correspondants, si disponible ;
- soit L/500 de la portée si celle-ci est ≤ à 7,0m ; 0,7 cm + L/1 000 de la portée si celle-ci est supérieure à 7,0 m.

Pour les planchers n'ayant pas à supporter des revêtements de sols rigides, la flèche active est limitée, par la norme, ou en l'absence d'autres précisions, aux valeurs suivantes :

- soit L/350 de la portée si celle-ci est ≤ 7,00 m ;
- soit 1 cm + L/700 de la portée si celle-ci est supérieure à 7,00 m.

On appelle flèche active la part des déformations du plancher risquant de provoquer des désordres dans un ouvrage considéré généralement supporté (par exemple : cloison, carrelage, etc…). C'est donc l'accroissement de la flèche, ou fléchissement, pris par le plancher à partir de l'achèvement de l'ouvrage concerné.

Une attention particulière doit être portée à la conception des planchers et notamment à l'emplacement respectif des joints entre panneaux et des charges ponctuelles.

2.312 Transmission des charges des éléments porteurs horizontaux à leurs appuis

La compression transversale et le cisaillement sur appui doivent faire l'objet d'une vérification selon les §7.12 et §7.13 du Dossier Technique Etabli par le Demandeur.

2.313 Vérification en phase définitive des éléments porteurs verticaux soumis à des charges verticales

La résistance des éléments porteurs verticaux soumis à des charges verticales dans leur plan doit être justifiée vis-à-vis du risque de flambement hors plan. Le calcul est donné dans §6.21 du Dossier Technique établi par le Demandeur. Le calcul de la contrainte majorée de compression est effectué suivant la norme NF EN 1995-1-1.

Les murs étant chargés de façon dissymétrique, la charge verticale est considérée comme excentrée. Cet excentrement sera pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes : 1/6 de l'épaisseur du panneau ou l'excentricité réelle.

Lorsque les panneaux HEXAPLI utilisés comme murs porteurs sont pourvus d'ouvertures, les éléments formant poteaux entre ouvertures doivent faire l'objet d'une vérification spécifique en tenant compte, si besoin, du risque de flambement dans les deux directions (cf. §8.52 du dossier technique établi par le Demandeur).

De la même façon, les éléments formant linteaux au-dessus des ouvertures doivent faire l'objet d'une vérification spécifique. Il convient de se reporter au §8.5 du Dossier Technique établi par le Demandeur pour la conception des porteurs verticaux avec linteaux et ouvertures.

Pour les éléments porteurs verticaux, la longueur des porte-à-faux sera limitée à 20% de la longueur de la travée adjacente d'équilibre. La flèche admissible est de L/500, L étant la longueur du porte-à-faux.

2.314 Vérification en phase définitive des éléments porteurs verticaux soumis à des charges horizontales

Les vérifications de la résistance sous l'effet des contraintes cisaillement peuvent être menées comme dit au §7.13 du Dossier Technique, établi par le Demandeur en considérant les combinaisons d'action des Eurocodes et en appliquant les coefficients k_{mod} fonction de la classe de service et de la durée d'application des charges. Les flèches sont alors calculées comme dit au §6.43 du Dossier Technique établi par le Demandeur.

Les ancrages, reprenant les efforts de soulèvement générés par les charges horizontales, sont dimensionnés pour ne reprendre que ces efforts. L'effort tranchant à la base des éléments porteurs verticaux est alors équilibré par des connecteurs dédiés à cet usage et n'intervenant pas dans l'équilibrage des efforts de soulèvement.

Lorsque des panneaux HEXAPLI munis d'ouvertures sont utilisés pour assurer le contreventement, il est possible :

- Soit de les considérer comme une succession de panneaux isolés les uns des autres. Il est alors nécessaire de justifier leur tenue et celle de leurs ancrages en les considérant comme libres en tête et encastrés en pied. Ceci n'est applicable que si les panneaux sont fixés mécaniquement en pied et d'une largeur supérieure à 0,60 m. Il est également nécessaire de s'assurer de la présence d'une lisse haute transmettant l'effort horizontal et de justifier la transmission de l'effort aux panneaux par cette lisse ;
- Soit de considérer les liaisons entre panneaux. Il est alors nécessaire de justifier la tenue des panneaux et celles de leurs ancrages d'une part, de justifier la transmission des efforts de glissement entre panneaux d'autre part. Les dispositifs de liaisons entre panneaux sont ceux indiqués au Dossier Technique établi par le Demandeur.

2.315 Conception des assemblages et des liaisons

Les organes de fixation utilisés pour l'assemblage des panneaux HEXAPLI entre eux ou des panneaux HEXAPLI à d'autres éléments de structure en matériaux bois doivent être choisis selon les prescriptions de la norme NF EN 14592 ou faire l'objet d'une Evaluation Technique Européenne. Les liaisons entre panneaux doivent être réalisées avec des éléments permettant la reprise des efforts de traction transversale (LVL, contreplaqué, panneau 3 plis), à l'exclusion du bois massif.

Les connecteurs mécaniques tridimensionnels doivent faire l'objet d'une Evaluation Technique Européenne.

Les organes de fixation ou d'assemblages doivent être justifiés au regard des prescriptions des sections 7.1 et 8 de la norme NF EN 1995-1-1 et du paragraphe 6.1 du Dossier Technique établi par le Demandeur.

Les organes de fixation métalliques de type tige utilisés pour l'assemblage de panneaux structuraux massifs bois entre eux ou avec d'autres éléments de l'ouvrage font l'objet :

- d'un marquage CE selon la NF EN 14592, lorsque l'organe ne traverse pas plus de deux plans de cisaillement ;
- d'un ATE ou d'une ETE visant la fixation dans un panneau structural massif bois lorsque l'organe traverse plus de deux plans de cisaillement.

Pour les organes de fixation dans les supports béton, la liaison du cône béton avec la structure doit être assurée avec un ferraillage suivant le schéma bielle-tirant conformément à la norme NF EN 1992-1-1.

2.316 Utilisation en zone sismique

La justification en zone sismique des structures assemblées par panneaux HEXAPLI doit être menée en suivant le principe de comportement de structure soit dissipatif (Classe de ductilité M) soit faiblement dissipatif (Classe de ductilité L) conformément à la norme NF EN 1998-1-1 (cf. §8.1.3 et §8.6 (2)P). Les effets des actions sont calculés sur la base de la méthode des forces latérales équivalentes du §4.3.3.2 ou de la réponse modale du §4.3.3.3 de la norme NF EN 1998-1-1. Le spectre de calcul est déterminé à partir du spectre en appliquant un coefficient de comportement q=2,0 pour la classe DCM et q=1,5 pour la classe DCL.

Les critères de régularité en plan et en élévation de la norme NF EN 1998-1-1 (cf. §4.2.3) doivent être strictement respectés et faire l'objet d'une vérification. Toutefois, les bâtiments non-réguliers en élévation sont admis, en menant les justifications avec un coefficient de comportement abaissé de 20%.

Les coefficients de conversion correspondant à une classe de durée de chargement instantanée sont appliqués.

La conception de l'ouvrage suivant le principe de comportement de structure dissipatif (DCM) impose de porter la plus grande attention à la conception des assemblages entre panneaux (vis de liaison, équerres, etc.) au regard des efforts de cisaillement engendrés par l'action sismique. A ce titre, il convient :

- de hiérarchiser les zones de rupture dans les organes d'assemblage des panneaux en vérifiant la résistance suffisante des panneaux dont la rupture en cisaillement est considérée fragile ;
- d'exploiter la source de ductilité des organes d'assemblage des ancrages et équerres, la justification de la capacité résistante étant menée suivant les principes la norme NF EN 1995-1-1 au §8.2 en s'assurant que le mode de rupture obtenu est celui de la plastification de l'organe d'assemblage ; les organes de fixation de type broches, boulons et pointes lisses n'est pas admise ;
- de s'assurer que les connecteurs tridimensionnels mises en œuvre bénéficient d'un Agrément Technique Européen et fassent l'objet d'un rapport d'essai de laboratoire (accrédité ISO 17025) réalisé selon la norme NF EN 12512 et démontrant d'un comportement cyclique qui satisfasse les critères fixées de la classe de ductilité M au §8.3(3)P de la norme NF EN 1998-1-1 ;
- de s'assurer que le dimensionnement des ancrages de panneaux sera réalisé en appliquant les principes du dimensionnement en capacité de la norme NF EN 1998-1 en considérant un coefficient de sur-résistance pour l'ancrage tel que défini au §4.4.2.6 de cette norme ;
- de s'assurer que le dimensionnement des ancrages de panneaux est réalisé en appliquant les principes du dimensionnement en capacité de la norme NF EN 1998-1 en considérant un coefficient de sur-résistance pour l'ancrage γ_{rd} = 1,3 pour les murs formés d'un seul panneau continu et γ_{rd} = 1,6 pour les murs formés de plusieurs panneaux assemblés par des vis.

Les connecteurs mécano-soudés peuvent être mis en œuvre seulement si la justification en zone sismique des structures assemblées par panneaux HEXAPLI est menée en suivant le principe de comportement de structure faiblement dissipatif (DCL). En classe DCM, les connecteurs mécano-soudés peuvent être utilisés uniquement pour l'assemblage des panneaux ne participant pas à la transmission des efforts sismiques.

Lorsqu'ils sont prévus en zone sismique, les panneaux HEXAPLI utilisés en plancher doivent être organisés afin d'observer les points suivants :

- l'intégrité de la structure lors d'un séisme ;
- la fonction tirant-buton horizontal, assurée uniquement par les plis orientés dans le sens de l'effort à reprendre. La valeur de l'effort tirant-buton doit être déterminée par une étude sismique spécifique. Cet effort sera pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes : 15 kN/ml ou l'effort de tirant-buton déterminée ;

- par calcul la fonction diaphragme horizontal avec justification des jonctions entre panneaux adjacents pour les efforts de cisaillement induits ;
- assurer la continuité du chainage dans la direction transversale aux panneaux par rajout d'un élément reliant les panneaux.

La justification des panneaux utilisés en murs de contreventement en zone sismique doit être effectuée en :

- menant les vérifications précisées au §2 de l'Annexe 1 ;
- réalisant la fixation au support béton des panneaux au soubassement béton par des chevilles bénéficiant d'une Evaluation Technique Européenne pour une utilisation en béton fissuré ;
- limiter la capacité résistante en cisaillement de ces chevilles à la moitié de celles indiquée dans l'ETE sous sollicitation statique ;
- considérer un diagramme d'interaction linéaire pour justifier les chevilles sous charges combinées de traction et de cisaillement.

2.317 Traitement de préservation

En fonction de la classe d'emploi liée à la position du panneau HEXAPLI dans l'ouvrage d'une part, et à l'essence utilisée d'autre part, un traitement de préservation du bois peut être nécessaire. Il convient de respecter à cet égard les prescriptions des normes NF EN 335 et NF EN 350.

Conformément à la réglementation en vigueur, les panneaux HEXAPLI qui participent à la solidité des bâtiments devront être protégés par une durabilité conférée ou naturelle contre les insectes à larves xylophages sur l'ensemble du territoire et en complément, contre les termites dans les départements dans lesquels a été publié un arrêté préfectoral pris par l'application de l'article L. 133-5.

2.318 Dispositions constructives générales

Lorsque les panneaux HEXAPLI sont utilisés pour la réalisation de bâtiments entrant dans le domaine d'application du DTU 31.2, c'est à dire d'une manière générale pour les bâtiments dont la structure principale porteuse est en bois, les dispositions non spécifiquement visées dans le cadre de cet Avis Technique doivent être conformes aux prescriptions du DTU 31.2 pour la conception, aux prescriptions des Eurocodes pour le calcul.

Un pare-vapeur sera systématiquement mis en œuvre sur la face du panneau HEXAPLI exposée au climat intérieur (entre le panneau HEXAPLI et l'ouvrage en plaque de plâtre). La valeur de Sd (épaisseur de lame d'air équivalente) du pare-vapeur sera au minimum de 18m lorsque le revêtement extérieur est ventilé et de 90m dans le cas contraire.

2.32 Conditions de fabrication

La fabrication des panneaux HEXAPLI faisant appel au collage à usage structural, elle nécessite un contrôle permanent des différents paramètres conditionnant la réalisation d'un collage fiable (température, humidité, temps de pressage, pression de collage, etc.).

Le suivi de la production est effectué :

Dans le cadre d'une procédure interne d'autocontrôle dont les étapes sont indiquées dans le §3.21 du Dossier Technique établi par le Demandeur. Les résultats sont consignés dans des fiches spécifiques pour les planches d'une part et panneaux HEXAPLI finis d'autre part indiquant notamment :

- La procédure de réception et le stockage des matières premières ;
- La conformité du bois au classement mécanique annoncé selon la norme NF EN 338. Une procédure écrite doit définir les moyens mis en œuvre pour assurer la conformité de la qualité des bois au cahier des charges définis dans le Dossier Technique établi par le Demandeur. Les bois utilisés doivent bénéficier d'un certificat visant à justifier de leur conformité aux normes en vigueur et en particulier concernant la classe de résistance annoncée ; l'essence des bois utilisée sera consignée au cahier des charges ;
- Les tolérances géométriques minimum à respecter pour les planches de bois ;
- Le taux d'humidité nominal des planches de bois avant assemblage des plis doit être compris entre 6 % et 15 % conformément à la norme NF EN 16351. Une procédure doit définir les contrôles, leur fréquence et leur enregistrement ;
- Le contrôle réalisé afin de s'assurer du bon encollage et du bon pressage conformément au Contrôle de Production en Usine ;
- Le contrôle visuel sur chaque élément fini.

L'ensemble des résultats ainsi que les dispositions prises en cas de résultat non conforme doivent être consignés sur un cahier ou sur des fiches de contrôle.

Un contrôle externe est réalisé sur les panneaux HEXAPLI par le FCBA permettant de vérifier la conformité des performances du panneau (valeur de résistance en cisaillement roulant notamment) et le bon suivi du CPU.

La synthèse de ce contrôle externe doit être transmise une fois par an au CSTB.

2.33 Conditions de mise en œuvre

2.331 Sollicitations perpendiculaires au fil

Bien que les panneaux HEXAPLI eux-mêmes permettent la reprise locale de flexion transversale (sens perpendiculaire au fil des plis externes), compte tenu de l'impossibilité qu'il y a à transmettre des moments entre panneaux adjacents, les panneaux doivent être conçus et mis en œuvre de manière à fonctionner en flexion sur deux appuis et non pas sur 4 côtés.

2.332 Manutention et stabilité provisoire

Le protocole de montage devra préciser les modes de manutention et des points de levage (type, nombre, résistance), au cas par cas ainsi que les dispositifs pour assurer leur stabilité provisoire. Ces éléments seront clairement identifiés sur les panneaux livrés sur chantier

2.333 Plans d'exécution

Le bureau d'études devra fournir les plans d'exécution détaillés comprenant le calepinage et le sens des panneaux, les types et détails des ancrages en pied de panneaux et chaînages en tête de panneaux et tout autre détail nécessaire (traitement des ouvertures, etc…).

Conclusions

Appréciation globale

L'utilisation du procédé dans le domaine d'emploi accepté (cf. paragraphe 2.1) est appréciée favorablement.

Validité

A compter de la date de publication présente en première page et jusqu'au 28/02/2021.

Pour le Groupe Spécialisé n°3.3
Le Président

3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

Le Groupe tient à attirer l'attention des utilisateurs du procédé HEXAPLI sur le fait que ses particularités nécessitent le recours, pour le dimensionnement des éléments, à un bureau d'études spécialisé.

Ce dimensionnement doit tenir compte, pour les différentes phases du projet, des exigences relatives à la stabilité des éléments d'une part et à la stabilité générale de l'ouvrage d'autre part, et des rigidités de l'ensemble des éléments participant au contreventement.

Dans le cas de l'association de structures de rigidités différentes, il est nécessaire d'en tenir compte pour la détermination des efforts de contreventement.

En outre, compte tenu de ce que les éléments HEXAPLI offrent des surfaces de prise au vent importantes lors de leur manutention, il est impératif d'une part de recourir aux précautions habituelles relatives à la manutention des éléments de grande dimension, d'autre part de cesser la mise en œuvre lorsque la vitesse du vent empêche la manutention aisée par deux personnes.

Il est rappelé que le DTU 31.2 préconise la mise en œuvre d'une coupure anti-capillarité en pied de panneaux fixés au soubassement.

Comme pour toutes les structures légères, les performances acoustiques de l'ouvrage doivent être vérifiées in situ. En effet, les outils de calcul ne permettent pas actuellement de prévoir la performance acoustique à la conception des constructions légères.

Le Rapporteur du Groupe Spécialisén°3.3

Annexe 1 à l'Avis Technique

- La présente annexe fait partie de l'Avis Technique : le respect des prescriptions indiquées est une condition impérative de la validité de l'avis.

1. Dimensionnement des planchers

1.1 Données

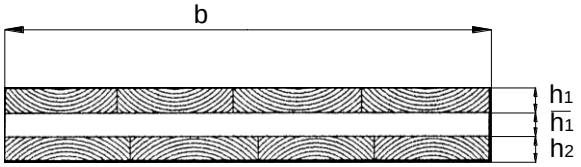


Figure 1 : Coupe transversale d'un panneau 3 plis.

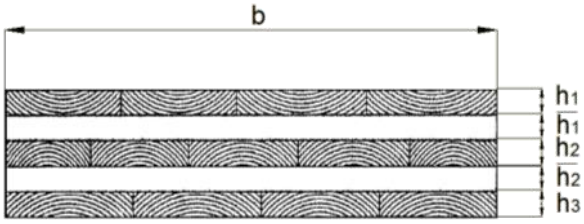


Figure 2 : Coupe transversale d'un panneau 5 plis.

Portée	L
Résistance caractéristique à la flexion	$f_{m,k}$
Résistance caractéristique à la traction	$f_{t,0,k}$
Résistance caractéristique au cisaillement roulant	$f_{R,k}$
Module d'élasticité moyen du bois	$E_{0,mean}$
Module de cisaillement moyen du bois	$G_{,mean}$
Module de cisaillement roulant moyen du bois	$G_{R,mean}$
Coefficient de sécurité Bois	γ_m
Coefficient de modification	k_{mod}
Coefficient de déformation	k_{def}

Résistance de calcul à la flexion $f_{m,0,d} = k_{mod} \times f_{m,k} / \gamma_{m,I}$

Résistance de calcul à la traction $f_{t,0,d} = k_{mod} \times f_{t,0,k} / \gamma_{m,I}$

Résistance de calcul au cisaillement $f_{R,d} = k_{mod} \times f_{R,k} / \gamma_{m,I}$

M_u : moment de flexion de calcul maximum à l'ELU

V_u : effort tranchant maximum de dimensionnement

1.2 Conception

Bien que les panneaux HEXAPLI eux-mêmes permettent la reprise locale de flexion transversale (sens perpendiculaire au fil des plis externes), compte tenu de l'impossibilité qu'il y a à transmettre des moments entre panneaux adjacents, les planchers doivent être conçus et mis en œuvre de manière à fonctionner en flexion sur deux appuis et non pas sur 4 côtés.

Lorsque les panneaux HEXAPLI utilisés comme planchers porteurs sont pourvus d'ouvertures, les éléments formant trémie doivent faire l'objet d'une vérification spécifique (cf. §7.3 du dossier technique établi par le Demandeur).

Le dimensionnement est réalisé en appliquant les coefficients k_{mod} fonction de la classe de service et de la durée d'application des charges. Les flèches sont calculées en tenant compte du fluage par le coefficient k_{def} pris selon les valeurs définies pour le contreplaqué dans la norme NF EN 1995-1-1 et au §6.4 du Dossier Technique établi par le Demandeur.

1.3 Vérifications à l'ELU instantané

Instantané – charges à court terme

Il convient que la rigidité efficace en flexion soit prise selon :

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^{3} \left(I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^{\,2} \right)$$

En utilisant les valeurs moyennes de E et où :

$$A_i = b \cdot h_i$$

$$I_i = \frac{b \cdot h_i^3}{12}$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean_i} \cdot A_i \cdot \bar{h}_i}{L^2 \cdot G_{R,mean} \cdot b} \right]^{-1} \quad \text{pour } i = 1 \text{ et } i = 3$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} \right) - a_2$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2} \right) - \gamma_3 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} \right)}{\sum_{i=1}^{3} (\gamma_i \cdot A_i)}$$

$$a_3 = \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} \right) + a_2$$

Les contraintes normales sont prises selon

$$\sigma^{i}_{t,0,d=} \frac{\gamma_i \cdot \mathrm{a_i} \cdot \mathrm{M_u}}{\mathrm{I_{ef}}}$$

$$\sigma^{i}_{m,0,d} = \frac{0{,}5 \cdot \mathrm{h}_i \cdot \mathrm{M_u}}{\mathrm{I_{ef}}}$$

Vérification de la traction et flexion combinée des couches de bois

$$\frac{\sigma^{i}_{\mathrm{t,0,d}} + \sigma^{\mathrm{i}}_{\mathrm{m,0,d}}}{f_{\mathrm{m,o,d}}} \leq 1$$

Vérification du cisaillement roulant

$$\tau_{v,d} = \frac{\mathrm{V_u} \cdot \gamma_i \cdot S_i}{\mathrm{I_{ef}} \cdot b} \leq f_{R,d}$$

Avec

Moment statique d'un pli au sein d'un section rectangulaire

$$S_i = b.h_i.x_i$$

b : largeur du panneau (mm)

hi : épaisseur du pli (mm)

xi : abscisse du barycentre du pli à l'axe de symétrie du panneau (mm)

Avec la valeur caractéristique de résistance au cisaillement roulant de 1,1 N/mm² pour les compositions de panneaux HEXAPLI avec des plis ayant un rapport entre largeur et épaisseur supérieure ou égale à 4 et 0,7 N/mm² pour les compositions de panneaux avec des plis ayant un rapport entre largeur et épaisseur inférieure à 4 conformément à la norme NF EN 16351.Une attention particulière doit être portée à la conception des planchers et notamment à l'emplacement respectif des joints entre panneaux et des surcharges pour ne pas mobiliser de manière importante les cisaillements entre panneaux adjacents. Les détails de jonctions entre panneaux sont indiqués dans les dispositions constructives 5 annexées au Dossier Technique établi par le Demandeur.

La compression transversale et le cisaillement sur appui doivent faire l'objet d'une vérification selon les principes énoncés dans les §7.12 et §7.13 du Dossier Technique Etabli par le Demandeur.

1.4 Vérifications à l'ELU final

Les caractéristiques élastiques prises en compte sont réduites pour pouvoir considérer le fluage. La réduction est obtenue par la prise en compte des coefficients de fluage. Pour une combinaison d'actions pour laquelle chaque action appartient à une classe de durée de chargement différente, la contribution de chaque action doit être calculée séparément en utilisant le coefficient ψ2 · kdef approprié, puis être additionnée aux autres pour les vérifications.

$$E_{0,mean,fin} = \frac{E_{o,mean}}{1+\psi_2 \cdot k_{def}}$$

$$G_{R,mean,fin} = \frac{G_{R,mean}}{1+\psi_2 \cdot k_{def}}$$

- avec GR,mean le module de cisaillement roulant moyen est pris égal à 50 MPa
- Avec ψ2 = 1 pour les charges permanentes.

1.5 Vérifications ELS

1.51 Caractéristiques mécaniques Instantané (charge à court terme - instantanées)

Il convient de considérer la rigidité efficace en flexion déterminée au §1.3.

1.52 Caractéristiques mécaniques Final (charge à long terme - permanentes)

Les caractéristiques élastiques prises en compte sont réduites pour pouvoir considérer le fluage. La réduction est obtenue par la prise en compte des coefficients de fluage. Pour une combinaison d'actions pour laquelle chaque action appartient à une classe de durée de chargement différente, la contribution de chaque action doit être calculée séparément en utilisant le coefficient kdef approprié, puis être additionnée aux autres pour les vérifications.

$$E_{0,mean,fin} = \frac{E_{o,mean}}{1+k_{def}}$$

$$G_{R,mean,fin} = \frac{G_{R,mean}}{1+k_{def}}$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{1+k_{def}}$$

avec G_{mean} le module de cisaillement moyen du panneau HEXAPLI pris égal à 50 MPa.

1.53 Vérifications de flèche

Les vérifications des flèches doivent être menées en considérant d'une part la flèche générée par le moment fléchissant en considérant la rigidité efficace du panneau HEXAPLI et d'autre part la flèche générée par l'effort tranchant en considérant le module de cisaillement du panneau HEXAPLI.

1.54 Vérifications flèche totale – absolue

La flèche finale ne pourra excéder L/250 où L est la portée du panneau entre appuis. La flèche est calculée en considérant les caractéristiques mécaniques finales des panneaux HEXAPLI.

1.55 Vérifications flèche instantanée

La flèche instantanée due aux actions variables ne pourra excéder L/300 où L est la portée du panneau entre appuis. La flèche est calculée en considérant les caractéristiques mécaniques instantanées des panneaux HEXAPLI.

1.56 Vérifications flèche active

En l'absence de précision fournie par la norme NF EN 1995-1-1 ou son Annexe Nationale, il convient de prendre pour les déplacements des éléments HEXAPLI, les valeurs suivantes :

Pour les planchers, la flèche active, pouvant nuire aux revêtements de sols rigides, ne doit pas dépasser :

- soit la valeur fixée par les DTU correspondants, si disponible ;
- soit L/500 de la portée si celle-ci est ≤ à 7,0m ; 0,7 cm + L/1 000 de la portée si celle-ci est supérieure à 7,0 m.

Pour les planchers n'ayant pas à supporter des revêtements de sols rigides, la flèche active est limitée, par la norme, ou en l'absence d'autres précisions, aux valeurs suivantes :

- soit L/350 de la portée si celle-ci est ≤ 7,00 m ;
- soit 1 cm + L/700 de la portée si celle-ci est supérieure à 7,00 m.

On appelle flèche active la part des déformations du plancher risquant de provoquer des désordres dans un ouvrage considéré généralement supporté (par exemple : cloison, carrelage, …). C'est donc l'accroissement de la flèche, ou fléchissement, pris par le plancher à partir de l'achèvement de l'ouvrage concerné.

Les critères de flèche active doivent être vérifiés en considérant les caractéristiques mécaniques instantanées des panneaux HEXAPLI.

2. Dimensionnement des murs

2.1 Vérification en phase définitive des éléments porteurs verticaux soumis à des charges verticales

La résistance des éléments porteurs verticaux soumis à des charges verticales dans leur plan doit être justifiée vis-à-vis du risque de flambement hors plan. Le calcul de l'élancement du panneau HEXAPLI est effectué en considérant d'une part la longueur de flambement calculée de manière usuelle en fonction des conditions d'appuis (considérées comme des articulations), d'autre part le rayon de giration dont le calcul est donné dans §8.21 du Dossier Technique établi par le Demandeur. Le calcul de la contrainte majorée de compression est effectué suivant la norme NF EN 1995-1-1.

Les murs étant chargés de façon dissymétrique, la charge verticale est considérée comme excentrée. Cet excentrement sera pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes : 1/6 de l'épaisseur du panneau ou l'excentricité réelle.

Lorsque les panneaux HEXAPLI utilisés comme murs porteurs sont pourvus d'ouvertures, les éléments formant poteaux entre ouvertures doivent faire l'objet d'une vérification spécifique en tenant compte, si besoin, du risque de flambement dans les deux directions (cf. §8.52 du Dossier Technique établi par le Demandeur).

De la même façon, les éléments formant linteaux au-dessus des ouvertures doivent faire l'objet d'une vérification spécifique. Il convient de se reporter au §8.5 du Dossier Technique établi par le Demandeur pour la conception des porteurs verticaux avec linteaux et ouvertures.

2.2 Vérification en phase définitive des éléments porteurs verticaux soumis à des charges horizontales

Lorsque des panneaux HEXAPLI sont utilisés pour assurer le contreventement, il est possible :

- soit de les considérer comme une succession de panneaux isolés les uns des autres. Il est alors nécessaire de justifier leur tenue et celle de leurs ancrages en les considérant comme libres en tête et encastrés en pied. Ceci n'est applicable que si les panneaux sont fixés mécaniquement en pied et d'une largeur supérieure à 0,60 m. Il est également nécessaire de s'assurer de la présence d'une lisse haute transmettant l'effort horizontal et de justifier la transmission de l'effort aux panneaux par cette lisse et en ne tenant compte que des plis orientés dans le sens de cet effort.
- Soit de considérer les liaisons entre panneaux. Il est alors nécessaire de justifier la tenue des panneaux et celles de leurs ancrages d'une part, de justifier la transmission des efforts de glissement entre panneaux d'autre part.

Lorsque des panneaux HEXAPLI munis d'ouvertures sont utilisés pour assurer le contreventement, il doit être vérifié que la « membrure » supérieure du panneau est capable de transmettre l'effort horizontal en ne tenant compte que des plis orientés dans le sens de cet effort.

La capacité résistante au cisaillement des panneaux doit être justifiée lorsque ceux-ci sont soumis à des charges horizontales. La vérification consiste à s'assurer que les trois modes de ruptures potentiels ne sont pas atteints à l'ELU:

$$\tau_{1,d} = \frac{V_d}{b \cdot t} \le f_{v,1,d}(N/mm^2) \text{ avec } f_{v,1,k} = 3{,}5 N/mm^2$$

$$\tau_{2,d} = \frac{V_d}{b \cdot t_{\min}} \le f_{v,2,d}(N/mm^2) \text{ avec } f_{v,2,k} = 5{,}0 N/mm^2$$

$$\tau_{3,d} = \frac{V_d \cdot h}{\sum I_p} \frac{a}{2} \le f_{v,3,d}(N/mm^2) \text{ avec } f_{v,3,k} = 2{,}5 N/mm^2$$

b la largeur du panneau (mm)

t l'épaisseur du panneau (mm)

Vd effort tranchant agissant sur le panneau (N)

tmin somme des épaisseurs des plis transversaux ou des plis longitudinaux, la plus petite des deux valeurs étant à retenir (mm)

a largeur d'une planche (mm)

Ip moment d'inertie polaire des sections croisées (mm^4)

h hauteur du panneau perpendiculaire à l'effort agissant horizontal (mm)

Les ancrages, reprenant les efforts de soulèvement générés par les charges horizontales, sont dimensionnés pour ne reprendre que ces efforts. L'effort tranchant à la base des éléments porteurs verticaux est alors équilibré par des connecteurs dédiés à cet usage et n'intervenant pas dans l'équilibrage des efforts de soulèvement.

Dossier Technique
établi par le demandeur

A. Description

1. Principe et domaine d'emploi revendiqué

1.1 Panneaux HEXAPLI

Les panneaux HEXAPLI sont des panneaux structurels de grandes dimensions - panneaux lamellés croisés ou CLT - constitués de lamelles en bois massif ou en bois massifs aboutées empilées en alternance de couches majoritairement croisées à 90° et collées entre elles sur toute leur surface.

1.2 Domaine d'emploi

Les panneaux HEXAPLI sont destinés à la réalisation de planchers et murs porteurs avec éventuelle fonction de contreventement pour la réalisation de bâtiments d'habitation, de bureaux, ainsi que les bâtiments industriels, agricoles et les établissements recevant du public.

Les limitations du domaine d'emploi résultent alors du respect de la réglementation en vigueur applicable à ces bâtiments, notamment vis-à-vis de la résistance au feu des parois à base de panneaux structuraux massifs bois.

Le domaine d'emploi est limité à la réalisation de bâtiments R+3 ou 4 niveaux de surélévation, sans pour autant dépasser 18 m

Les panneaux HEXAPLI sont destinés à une utilisation pour :

- Les ouvrages situés en zones sismiques 1 à 4 (cf. §5) ;
- Les ouvrages abrités des intempéries et non soumis à des atmosphères agressives ;
- Un dimensionnement des structures selon la norme NF EN 1995-1-1 (Eurocode 5) ;
- Les structures relevant des conditions des Classes de Service 1 & 2 au sens de la norme NF EN 1995-1-1 ;
- Les ouvrages relevant de la Classe d'Emploi 1 & 2 au sens de la norme NF EN 335 ;
- Les locaux à faible ou moyenne hygrométrie, à l'exclusion des locaux à forte et très forte hygrométrie, c'est-à-dire ceux pour lesquels W/n > 5g/m3, avec : W = quantité de vapeur d'eau produite à l'intérieur du local par heure ; n = taux horaire de renouvellement d'air.

Pour les planchers ce domaine est complété comme suit :

- Seuls les planchers sous charges à caractère statique ou quasi-statique pour des catégories d'usage A, B, C1, C2, C3 et D1 au sens de la norme NF EN 1991-1-1 sont visés ;
- Dans les constructions usuelles, les planchers sur passage ouvert sont considérés comme abrités des intempéries ;
- A l'exclusion de la reprise des cloisons maçonnées ou fragiles, lorsque la déformation du panneau s'avère incompatible avec la déformation admissible de celles-ci.

Les panneaux HEXAPLI ne sont pas destinés :

- aux utilisations sous charges pouvant entraîner des chocs ou des phénomènes de fatigue.

2. Composition des panneaux

2.1 Composition des lamelles

Les panneaux HEXAPLI sont exclusivement composés de lamelles de bois (les panneaux à base de bois ne sont pas utilisés).

Les bois utilisés pour la réalisation des lamelles constituant les panneaux HEXAPLI sont le Pin, le Douglas et l'Epicéa.

L'utilisation de bois recyclé n'est pas permise.

Les bois sont classés mécaniquement selon la norme NF EN 14081.

Leur classe de résistance est déclarée selon la norme NF EN 338. Des valeurs de module d'élasticité supérieures sont déclarées pour le Pin (Emean=12000N/mm²) et le Douglas (Emean=13000N/mm²) de classes de résistances égales à C24. Les modules d'élasticité retenus pour les planches de classe C18 sont ceux de la norme NF EN 338.

Les lamelles rabotées sont d'épaisseurs 20, 30 et 40mm

La largeur des lamelles rabotées est comprise entre 95 et 300mm.

Les lamelles peuvent être rainurées pour réduire le tuilage et la fissuration. La profondeur maximale des rainures est de 90% de l'épaisseur et la largeur maximale est de 4mm. Les distances entre les rainures contigües dans les lamelles et la distance entre les rainures et les chants des lamelles sont supérieures ou égales à 40 mm.

2.2 Composition des plis

Les plis sont constitués de planches en bois massif abouté dans le sens parallèle à leur fil selon la norme NF EN 16351, sauf lorsque la longueur de la planche correspond à la dimension du panneau dans la direction du fil de celle-ci.

Les panneaux HEXAPLI intègrent des lamelles de classements mécaniques C18, C24. La gamme est constituée de lamelles C24 pour les lamelles orientées dans le sens des plis extérieurs du panneau et de lamelles C18 ou C24 pour les lamelles orientées perpendiculairement au sens des plis extérieurs du panneau. Toutes les planches d'un même pli appartiennent à la même classe de résistance. Les plis au sein d'un même panneau pouvant être de classements mécaniques différents, les propriétés mécaniques des lamelles sont considérées en fonction de leur orientation.

Les panneaux sont constitués de 3 à 9 plis de lamelles croisées à 90°. La configuration des plis (et couches) du panneau est symétrique (géométriquement et mécaniquement) par rapport au pli central. Les plis (ou couches) extérieur(e)s des deux faces opposées des panneaux sont orienté(e)s dans la même direction.

Sur les panneaux T, les plis transversaux sont placés à l'extérieur.

Sur les panneaux L, les plis longitudinaux sont placés à l'extérieur.

Des configurations de panneaux L2 sont produites avec des couches contiguës collées parallèlement au fil. Ces configurations sont disponibles pour les panneaux 5, 7 et 8 plis. Conformément à la norme NF EN 16351, l'épaisseur de ces couches contiguës ne dépasse pas 90mm.

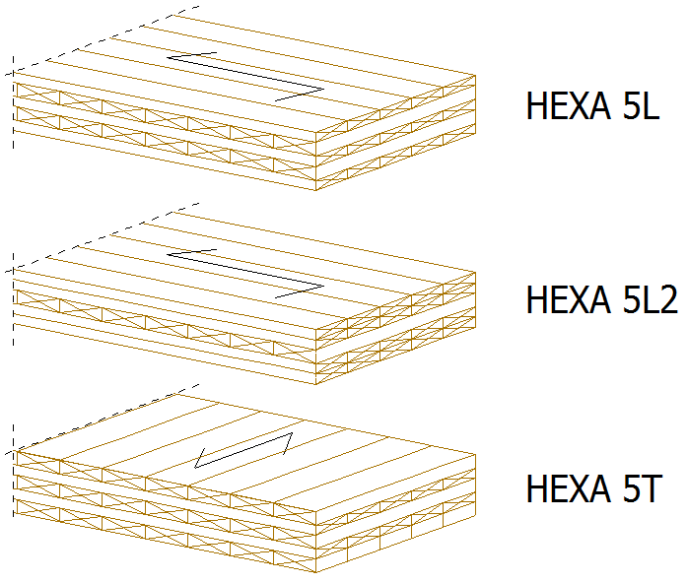


Figure 1 – Exemples de configurations L, L2 et T pour des panneaux HEXAPLI 5 plis

Les dimensions des panneaux sont :

- Largeur maximale : 3,50 m ;
- Longueur maximale : 16,00 m ;
- Epaisseur : 60 à 360 mm.

Les lamelles ne sont pas collées sur chants par un collage structurel, un collage non structurel des chants peut être effectué.

2.3 Adhésifs utilisés

Les adhésifs utilisés pour la fabrication, aboutages et lamellation, sont des adhésifs polyuréthanes (PUR) mono composants de type I selon la norme NF EN 15425. Ils appartiennent tous à la gamme HBS de la société PURBOND Ils ne contiennent ni solvant, ni formaldéhyde.

Pour l'aboutage :

- Purbond HB S 109 (Certificats FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/274, FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/275, FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/276 du 25/05/09)

- Purbond HB S 049 (Certificats FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/274, FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/275, FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/276 du 25/05/09)

Pour la lamellation :

- Purbond HB S 309 (Certificats FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/274, FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/275, FCBA n°LBO/GL/MP/403/09/276 du 25/05/09)

3. Contrôle et fabrication

3.1 Fabrication

Les panneaux HEXAPLI sont exclusivement produits par Piveteau Bois sur le site de Sainte-Florence conformément à la norme NF EN 16351 :

- L'humidité des bois est contrôlée ;
- Les planches sont classées mécaniquement conformément à EN 14081 ;
- En fonction de leur longueur et des dimensions des panneaux, les planches peuvent être aboutées selon la norme NF EN 16351 (La longueur des planches correspond à la dimension du panneau dans la direction du fil de celle-ci. Les planches de longueur plus courte sont donc obligatoirement aboutées) ;
- Rabotage des lamelles et mise à longueur des lamelles en fonction des dimensions des panneaux ;
- Composition du panneau et encollage. Plusieurs panneaux peuvent être fabriqués simultanément, un film plastique est alors intercalé entre les différents panneaux ;
- Mise en presse hydraulique. Un pressage latéral est effectué pour supprimer les jeux entre lamelles. Le pressage vertical est ensuite effectué, la pression appliquée est supérieure ou égale à 6 bars. Le temps de presse est établi conformément à la fiche technique du fabricant d'adhésif ;
- Après stabilisation, les panneaux sont détourés, taillés et éventuellement poncés.

3.2 Constance des performances

3.21 Contrôles internes

La constance des performances est assurée grâce à un contrôle de production en usine mis en place conformément à la norme NF EN 16351.

Ce contrôle de production fait l'objet du manuel qualité « MQCLT ». Les paramètres ci-dessous font l'objet de contrôles avec enregistrements :

- Essences, dimensions, classes de résistances et humidité des lamelles ;
- Résistance à la flexion des aboutages ;
- Combinaison du panneau HEXAPLI (composition et orientation des plis) ;
- Date et numéro de production ;
- Heure de début et de fin de l'application de l'adhésif ;
- Heure de début et de fin du serrage, pression de serrage ;
- Résistance du collage par essais de délamination ;
- Contrôles dimensionnels sur les panneaux ;
- Marquage du panneau.

L'humidité relative de l'air, la température durant toutes les phases de collage et de stabilisation du produit sont contrôlées et enregistrées.

Les essais de contrôle de production en usine requis par NF EN 16351 sont effectués :

- Enregistrement en continu des conditions climatiques atelier ;
- Contrôle d'humidité individuel sur les lamelles ;
- Résistance à la flexion des aboutages (2 échantillons par poste) ;
- Résistance du collage par essais de délamination (2 échantillons par poste) ;
- Vérification des données géométriques à chaque changement de combinaison.

Conformément à la norme NF EN 16351 §5.2.3.3 « Détermination à partir d'essais avec du bois lamellé croisé », des essais (ainsi que l'interprétation des résultats) ont été réalisés par le FCBA sur des panneaux CLT ainsi que sur des lamelles. Des modules d'élasticité supérieurs ont été trouvés, retenus pour le Pin à Emean = 12000N/mm² et pour le Douglas à Emean = 13000N/mm².

En CPU pour assurer la constance des performances, la société PIVETEAU réalise des essais sur les modules d'élasticité (en plus des essais mécaniques de résistance sur les lamelles pour valider leur classement mécanique). Ces essais ont été mis en place avec le FCBA conformément à la norme NF EN 16351 - Tableau 4 (essais détaillés dans le chapitre 2.3.1.3.1 de notre manuel qualité v3).

Ainsi, nous déclarons donc des performances conformément à EN 16351 §5.1.1 avec un profil de résistance spécifique qui correspond à un C24 avec des propriétés de module d'élasticité gonflées.

La procédure de traitement des non-conformités est documentée. Les non-conformités font l'objet d'une identification, elles sont enregistrées et font l'objet d'une mise en place d'actions correctives.

Les enregistrements sont conservés pendant au moins 10 ans.

3.22 Contrôles externes

La supervision du contrôle interne est effectuée par le FCBA qui audite le site de production deux fois par an.

3.3 Identification et marquage

3.31 Identification

L'essence composant le panneau HEXAPLI est repérée par un code de 2 lettres, PI pour le Pin, DG pour le Douglas et EP pour l'Epicéa.

La gamme HEXAPLI est constituée de lamelles C24 pour les lamelles orientées dans le sens des plis extérieurs du panneau (sens x) et de lamelles C18 ou C24 pour les lamelles orientées perpendiculairement au sens des plis extérieurs du panneau (sens y). Les panneaux HEXAPLI (x:C24/y:C18) portent l'indice 1, et les panneaux (x:C24/y:C24) portent l'indice 2.

Ainsi, un panneau HEXAPLI PI1 sera constitué de pin, de lamelles C24 pour les lamelles orientées dans le sens des plis extérieurs du panneau et de lamelles C18 pour les lamelles orientées perpendiculairement au sens des plis extérieurs du panneau.

3.32 Marquage

Les panneaux HEXAPLI font l'objet d'un marquage en sortie de production, ce marquage comporte :

- Nom et adresse du site de production ;
- Identification et composition des panneaux (sections, essences, épaisseurs et nombres de plis, orientations et classements mécaniques des plis) ;
- Identification du produit pour assurer sa traçabilité.

4. Propriétés des panneaux

4.1 Propriétés mécaniques des panneaux HEXAPLI

Les propriétés mécaniques des panneaux HEXAPLI sont déclarées conformément à la norme NF EN 16351 par détermination et déclaration des données géométriques et des propriétés pertinentes des couches.

Il n'est pas pris en compte de coefficient d'effet système k_{sys} pour la détermination des propriétés mécaniques des panneaux HEXAPLI dans le présent avis technique.

Les propriétés mécaniques des couches sont données dans le *Tableau 1* disponible en annexe.

4.11 Masse volumique

La masse volumique caractéristique d'un panneau HEXAPLI est prise égale à $\rho_k = 1{,}1.\rho_{lay,k}$, où $\rho_{lay,k}$ est la masse volumique caractéristique de la classe de bois déclarée la plus faible d'une couche de bois du panneau HEXAPLI.

La masse volumique moyenne d'un panneau HEXAPLI est prise égale à $\rho_{mean} = \rho_{lay,mean}$, où $\rho_{lay,mean}$ est la masse volumique moyenne de la classe de bois déclarée la plus faible d'une couche de bois du panneau HEXAPLI.

4.12 Coefficient partiel sur les matériaux γ_M

Les coefficients partiels de sécurités sont :

- $\gamma M = 1{,}25$ pour les panneaux HEXAPLI
- $\gamma M = 1$ pour les vérifications accidentelles

4.13 Coefficient modificatif k_{mod}

Le dimensionnement est réalisé en appliquant le facteur de modification de résistance k_{mod}, fonction de la classe de service et de la durée d'application des charges. Les valeurs de k_{mod} retenues sont celles du bois massif données dans la norme NF EN 1995-1-1 – tableau 3.1.

Matériau	Classe de service	Classe de durée de chargement				
		Action permanente	Action long terme	Action moyen terme	Action court terme	Action instantanée
Bois massif	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1

4.14 Coefficient de déformation k_{def}

Les valeurs retenues pour k_{def} sont celles définies pour le contreplaqué dans la norme NF EN 1995-1-1.

Matériau	Classe de service	
	1	2
CLT	0,80	1,00

4.15 Tolérances dimensionnelles

L'épaisseur corrigée de la section transversale ≤ max (épaisseur nominale ± 2 mm ou 2 % de l'épaisseur nominale).

La largeur des jeux entre lamelles est contrôlée, elle est inférieure ou égale à 6mm.

Dans le cas où le panneau HEXAPLI est usiné en usine et destiné à une utilisation directe sur chantier, ce sont les tolérances dimensionnelles et de planéité du DTU 31.2 P1-1 qui s'appliquent, elles sont alors de :

- Tolérances dimensionnelles :
  - hauteur : ± 3 mm sur la cote nominale ;
  - largeur : ± 3 mm sur la cote nominale ;
  - épaisseur : ± 2 mm sur la cote nominale ;
  - différence de longueur entre les deux diagonales ≤ 5 mm si la diagonale est inférieure ou égale à 6 m et ≤ 7mm si la diagonale est supérieure à 6 m ;
  - faux équerrage : ≤ 1 mm/m.
- Tolérances de planéité :
  - Lorsque l'on pose une règle de 2 m sur un endroit quelconque d'un élément de structure, cet élément ne doit pas révéler une flèche supérieure à 5 mm.

4.2 Autres caractéristiques physiques des panneaux

4.21 Capacité calorifique massique

La capacité calorifique massique des panneaux HEXAPLI est de cp = 1,60 kJ/kg.K.

4.22 Coefficient de conductivité thermique

Les panneaux HEXAPLI ont un coefficient de conductivité thermique λ = 0,13 W/m.K.

4.23 Facteur de résistance à la vapeur d'eau

Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau est μ = 50 (sec) et μ = 20 (humide) conformément aux règles Th U fascicule 2 pour les résineux légers de masse volumique moyenne.

4.24 Affaiblissement acoustique R_w

Les valeurs d'affaiblissement acoustique au bruit aérien R_w des panneaux HEXAPLI ont été calculées selon la norme NF EN 12354-1 :

Panneau	R_w (dB)
HEXAPLI 100	36 dB
HEXAPLI 120	38 dB
HEXAPLI 140	40 dB
HEXAPLI 160	41 dB
HEXAPLI 180	42 dB
HEXAPLI 200	43 dB
HEXAPLI 220	44 dB
HEXAPLI 240	45 dB
HEXAPLI 260	45 dB

Des exemples de compositions de parois permettant de satisfaire aux exigences réglementaires sont données en §11.

4.25 Dimensions corrigées

Les dimensions des panneaux sont influencées par les variations d'humidité. Si l'humidité des panneaux diffère de l'humidité de référence (entre 6 et 15%) les dimensions corrigées doivent être déterminées.

Les variations dimensionnelles du panneau dans son plan est très faible du fait de la présence de planches disposées longitudinalement : elle est de 0,01% pour 1% de variation d'humidité du bois.

Les variations dimensionnelles du panneau dans son épaisseur est de 0,24% pour 1% de variation d'humidité du bois.

La dimension corrigée du panneau peut être calculée à partir de la dimension réelle :

$a_{cor} = a_a (1 + k_{cor,\alpha} (u_{réf} – u_a))$

où :

- a_{cor} est la dimension corrigée en mm ;
- a_a est la dimension réelle en mm ;
- $k_{cor,\alpha}$ est le coefficient de rétractabilité perpendiculaire au fil pour une modification de la teneur en humidité comprise entre 6 et 25 % (inclus) ;
- $u_{réf}$ = 12 % est la teneur en humidité de référence en % ;
- u_a est la teneur réelle en humidité, mesurée conformément à l'Annexe G de la norme NF EN 16351, en %.

Le facteur de rétractabilité pour des déformations induites par l'humidité est pris égal à :

- $k_{cor,90}$ = 0,0024 pour les déformations perpendiculaire au plan ;
- $k_{cor,0}$ = 0,0002 pour les déformations dans le plan.
- Conditions d'usage - classe de service, durabilité, traitement

Conformément à l'arrêté du 27 juin 2006, les panneaux HEXAPLI qui participent à la solidité des bâtiments sont naturellement durables ou ont une durabilité conférée contre les insectes à larves xylophages sur l'ensemble du territoire, et en complément, contre les termites dans les départements dans lesquels a été publié un arrêté préfectoral pris par application de l'article L.133-5 du code de la construction et de l'habitation.

Ainsi hors zones termitées, les panneaux HEXAPLI en Douglas peuvent être utilisés sans traitement de préservation complémentaire avec une proportion maximale d'aubier n'excédant pas 10 % (NF DTU 31-2).

En fonction de la classe d'emploi liée à la position du panneau HEXAPLI dans l'ouvrage d'une part, et à l'essence utilisée d'autre part, un traitement de préservation du bois peut être nécessaire. Il convient de respecter à cet égard les prescriptions des normes NF EN 335 (classe d'emploi) et NF EN 350 (durabilité naturelle de l'essence). Lorsqu'un traitement est nécessaire, il est réalisé après façonnage des planches et après les éventuelles découpes réalisées sur les panneaux. Ce traitement est effectué avec le Sarpeco 9+ de chez Berkem. Ce produit est certifié CTB P+.

5. Jonctions des panneaux HEXAPLI

5.1 Introduction

Les jonctions entre panneaux HEXAPLI font notamment entrer dans leur fonctionnement structural les composants suivants :

- Éléments de fixation de type tige (clous, vis, agrafes) et chevilles mécaniques ;
- Connecteurs métalliques plats ou tridimensionnels pour certains assemblages porteurs ;
- Panneaux à base de bois à usage structural utilisés pour la réalisation de liaisons entre panneaux HEXAPLI ou d'autres dispositions constructives du présent document.

Ces composants relèvent d'exigences ou de spécifications décrites ci-dessous.

5.2 Dispositions spécifiques aux composants métalliques

5.21 Organes de fixation de type tige

Les organes de fixation métalliques de type tige utilisés pour l'assemblage de panneaux HEXAPLI entre eux ou avec d'autres éléments de l'ouvrage font l'objet :

- d'un marquage CE selon la norme NF EN 14592 lorsque l'organe ne traverse pas plus de deux plans de cisaillement.
- d'un ATE ou d'une ETE visant la fixation dans un panneau structural massif bois lorsque l'organe traverse plus de deux plans de cisaillement.

5.22 Connecteurs métalliques tridimensionnels

Les connecteurs métalliques tridimensionnels utilisés pour l'assemblage des panneaux HEXAPLI entre eux ou avec d'autres éléments de l'ouvrage font l'objet d'un ATE, d'une ETE ou d'un AT visant la fixation dans un support bois.

Alternativement, des ferrures mécano-soudées peuvent également être utilisées. Elles se conforment alors aux dispositions des NF DTU 31.1, NF DTU 31.2 et sont dimensionnées selon la norme NF EN 1993 et réalisées selon la norme NF EN 1090-2. Les connecteurs mécano-soudés peuvent être mis en œuvre en zone sismique seulement si la justification des structures assemblées par panneaux HEXAPLI est menée en suivant le principe de comportement de structure faiblement dissipatif (DCL). Dans le cas d'une utilisation en zone sismique en classe DCM, les ferrures mécano-soudées peuvent être utilisées uniquement pour l'assemblage des panneaux ne participant pas à la transmission des efforts sismiques.

Les connecteurs sont fixés conformément aux prescriptions du fabricant pour le support considéré. On veillera à adapter la longueur des éléments de fixation (clous, vis) aux dimensions de l'élément fixé.

- On veillera également à limiter (ou prendre en considération au moment de la conception) l'excentrement de certains connecteurs par

rapport à leur position théorique, lié aux variations de planéité ou de position du support (notamment ceux liés aux tolérances de ce dernier).

5.23 Compatibilité des organes métalliques

Les connecteurs (acier et revêtement de surface) et leurs organes de fixation doivent en outre être adaptés :

- à la Classe de Service et la Classe d'Emploi de l'ouvrage en panneaux massifs structuraux bois considéré ;
- à l'essence de bois du pli avec lequel ils sont en contact (*).
- (*) Compte tenu de son acidité naturelle, le Douglas ne doit pas être mis directement au contact de zinc, d'aluminium ou de plomb. Il ne présente aucun risque au contact de l'acier, de l'acier galvanisé, de l'acier peint et du cuivre.

5.3 Autres composants à base de bois à usage structural

Les panneaux à base de bois à usage structural devront notamment :

- être marqués CE selon les normes NF EN 13986, NF EN 14374, NF EN 14279 ou posséder un ETE ;
- être adaptés à la Classe de Service et la Classe d'Emploi de l'ouvrage en panneaux massifs structuraux bois considéré.

Les panneaux de type CLT de faible épaisseur (p.ex. panneaux « trois-plis ») conformes à la norme NF EN 16351 peuvent également être utilisés pour la réalisation de liaisons entre panneaux HEXAPLI ou d'autres dispositions constructives du présent avis technique.

Lorsqu'ils sont utilisés pour la réalisation de liaisons entre panneaux HEXAPLI ou d'autres dispositions constructives du présent avis technique, les panneaux à base de bois sont fixés conformément aux prescriptions du présent avis technique.

On veillera toujours à adapter la longueur des éléments de fixation (clous, vis) aux dimensions de l'élément fixé.

5.4 Dispositions constructives

5.41 Généralités

Lorsque les panneaux HEXAPLI sont utilisés pour la réalisation de bâtiments entrant dans le domaine d'application du DTU 31.2, c'est à dire d'une manière générale pour les bâtiments dont la structure principale porteuse est en bois, les dispositions non spécifiquement visées dans le cadre du présent document doivent être conformes aux prescriptions du DTU 31.2 pour la conception, et aux prescriptions des Eurocodes pour le calcul.

Lorsque les panneaux HEXAPLI sont utilisés pour une ou plusieurs de leurs fonctions, pour la réalisation de bâtiments n'entrant pas dans le domaine d'application du DTU 31.2 (par exemple les panneaux utilisés pour réaliser les planchers d'un bâtiment à structure porteuse verticale en béton armé ou en maçonnerie de petits éléments), la réalisation des interfaces doit tenir compte des exigences éventuelles des textes visant les autres éléments porteurs (NF EN 1992, DTU 20.1, etc…). Dans ce cas, la structure porteuse formant support des panneaux HEXAPLI devra respecter les exigences de tolérance du support précisées au DTU 31.2.

De manière générale les exigences de tolérance du DTU 31.2 ne préjugent pas d'exigences plus sévères liées aux autres parties d'ouvrage (p.ex. revêtement de façade) ou à l'effet du cumul des tolérances.

5.42 Appuis des panneaux HEXAPLI

Que ce soit comme élément de plancher ou élément de mur, les panneaux HEXAPLI doivent être supportés aux appuis par le dessous (sauf cas particulier), soit en reposant sur le matériau support (appui simple), soit au moyen d'une pièce d'appui qui, elle, fournira le support adéquat (appui sur muralière, cornière métallique, ferrure mécano-soudée).

On distingue les appuis (simple ou pièces d'appui) selon la nature du matériau support : bois, métal, béton Les configurations d'appui usuelles sont décrites en annexe, *Figure 31*.

De manière générale, la fixation des panneaux HEXAPLI au support doit permettre d'assurer l'équilibre statique de la structure et la transmission des efforts verticaux et horizontaux.

5.43 Longueur minimale d'appui

Pour un élément de plancher, la longueur d'appui doit permettre, toutes tolérances épuisées, de reprendre les efforts de compression transversale sur appui et de respecter les règles de pince de l'organe d'assemblage du panneau à son support. Sauf justification particulière, la longueur d'appui minimale est de 45mm.

Un élément de mur doit reposer entièrement sur son support. Un débord de l'élément de mur dans le sens de son épaisseur est possible, et doit être justifié en tenant compte des principes suivants toutes tolérances épuisées :

- à l'appui, seuls les plis verticaux effectivement supportés transfèrent les charges verticales en compression ;
- le pli vertical extérieur non supporté peut être mobilisé dans la justification du flambement (section et inertie) en tenant compte de l'excentrement réel.

Sauf justification particulière, le débord, toutes tolérances épuisées n'excède pas 10mm ou la demi-épaisseur du pli extérieur (en retenant la plus petite des deux valeurs), sans préjuger d'exigences de tolérances plus sévères liées aux autres parties de l'ouvrage (p.ex. revêtement de façade).

5.44 Appui sur support bois

Les panneaux HEXAPLI doivent être fixés mécaniquement au support bois à chaque appui au moyen d'organes de fixation ou connecteurs métalliques tels que définis au §5.21 et §5.22 respectivement.

Les configurations d'appui usuelles sur support bois sont décrites en *Figure 31*.

5.45 Appui sur support métallique

Les panneaux HEXAPLI doivent être fixés mécaniquement au support métallique à chaque appui au moyen d'organes de fixation tels que définis au §5.21. La fixation métal-bois directe est possible.

Les configurations d'appui usuelles sur support métalliques sont décrites en *Figure 31*.

5.46 Appui sur support béton

Les panneaux HEXAPLI doivent être fixés mécaniquement au support béton à chaque appui au moyen :

- de connecteurs métalliques tels que définis au §5.22,
- fixés aux panneaux au moyen d'organes de fixation tels que définis au §5.21, et
- ancrés au support béton au moyen de chevilles de fixation devant bénéficier d'un ATE ou d'une ETE selon l'ETAG 001.

L'appui peut également être réalisé par interposition d'une lisse d'appui en bois ou dérivés du bois, elle-même fixée au support béton, et formant alors pour le panneau un appui sur support bois. La lisse d'appui respecte alors les prescriptions du NF DTU 31.2 pour ce type de pièce, notamment quant aux dispositions relatives à la durabilité.

Le panneau ou la lisse, comme toute pièce de bois, doit être isolé de tout contact direct avec le support béton par une barrière de protection conforme aux prescriptions du paragraphe 6.1 du NF DTU 31.2 partie 1-2 (CGM) visant les barrières d'étanchéité vis-à-vis des remontées capillaires (bande d'arase).

Les configurations d'appui usuelles sur support béton sont décrites en *Figure 31*.

5.47 Calage des éléments

Le calage ponctuel des panneaux (sous lisse d'appui ou directement sous le panneau) peut s'avérer nécessaire, de manière transitoire ou définitive.

On justifie :

- le panneau et le support des cales en tenant compte du caractère ponctuel de ces appuis ;
- la capacité portante et la durabilité des cales.

NOTE : On veillera à protéger le panneau ainsi que les cales qui le nécessitent (cales bois ou métal par exemple) contre les risques de remontées capillaires (cf. §5.46).

5.5 Assemblage des panneaux HEXAPLI

5.51 Assemblage dans un même plan

L'assemblage des panneaux HEXAPLI entre eux dans un même plan est réalisé par organe de fixation de type tige à mi-bois ou au moyen d'une ou plusieurs languettes en métal ou en panneaux à base de bois. L'utilisation de bois massif est proscrite.

Les différentes typologies d'assemblages sont :

- assemblage par languette en simple cisaillement.
- assemblage par deux languettes en simple cisaillement.
- assemblage par languette en double cisaillement.
- assemblage à mi-bois

Ces différentes solutions de liaisons sont décrites en Figure 36 et Figure 37.

Les panneaux à base de bois utilisés sont tels que définis au §5.3.

Le choix des organes de fixation doit satisfaire aux dispositions du §5.21, les pointes lisses ne sont pas admises.

De manière générale, la fixation des panneaux HEXAPLI entre eux dans un même plan doit permettre d'assurer :

- l'équilibre statique de la structure ;
- la transmission des efforts de diaphragme et de contreventement entre panneaux adjacents (mur et/ou plancher) ;

- la limitation des déformations différentielles entre panneaux de plancher adjacents (pianotage).

Une attention particulière doit être portée à la conception des planchers et notamment à l'emplacement respectif des joints entre panneaux et des charges ponctuelles.

Cette typologie d'assemblage est sensible aux efforts de traction transversale, qui doit être vérifiée, notamment dans le cas d'assemblage entre eux d'éléments de plancher.

L'assemblage entre panneaux peut être renforcé en surface du panneau par un plat métallique pour la reprise des efforts de cisaillement (diaphragme et contreventement).

5.52 Assemblage en angle

L'assemblage des panneaux HEXAPLI entre eux en angle (assemblage d'angles de murs ou entre mur et plancher) est réalisé :

- par vissage direct entre les panneaux (vissage à chant ou lardé);
- au moyen de clés vissées aux panneaux ;
- au moyen de connecteurs métalliques tridimensionnels, plats, ou en âme ;
- par l'intermédiaire d'une pièce d'appui (muralière ou cornière métallique) elle-même vissée aux panneaux par plats métalliques posés en applique ou en âme

Un assemblage peut combiner plusieurs de ces solutions. Ces différentes solutions de liaisons sont décrites dans le Tableau 10.

De manière générale, la fixation des panneaux HEXAPLI entre eux en angle doit permettre d'assurer :

- l'équilibre statique de la structure ;
- la transmission des efforts de diaphragme et de contreventement entre panneaux assemblés (mur-mur et/ou mur-plancher) ;
- la limitation des déformations différentielles entre étages.

Le choix des organes de fixation et des connecteurs métalliques doit en outre satisfaire aux dispositions du §5.21 et §5.22 respectivement.

6. Vérifications – principes généraux

6.1 Introduction

Les panneaux HEXAPLI peuvent être soumis à un chargement dans leur plan (charge verticale d'un mur, linteau, diaphragme) et/ou hors plan (plancher, vent normal).

Le dimensionnement s'effectue selon la norme NF EN 1995-1-1 et son annexe nationale en tenant compte des dispositions du présent document.

Une liste des bureaux d'études techniques disposant de l'expertise requise pour le dimensionnement des panneaux HEXAPLI est disponible sur demande sur le site de la société PIVETEAU BOIS. De plus, PIVETEAU BOIS met à disposition de ses clients un outil de prédimensionnement afin de vérifier en phase définitive les éléments porteurs verticaux et horizontaux.

Les caractéristiques mécaniques et vérifications décrites dans le document sont établies selon la convention suivante :

- Indice x = orientation des plis extérieurs des panneaux
- Indice y = plis perpendiculaires aux plis extérieurs des panneaux
- Indice z = orientation perpendiculaire aux plis du panneau (hors plan)

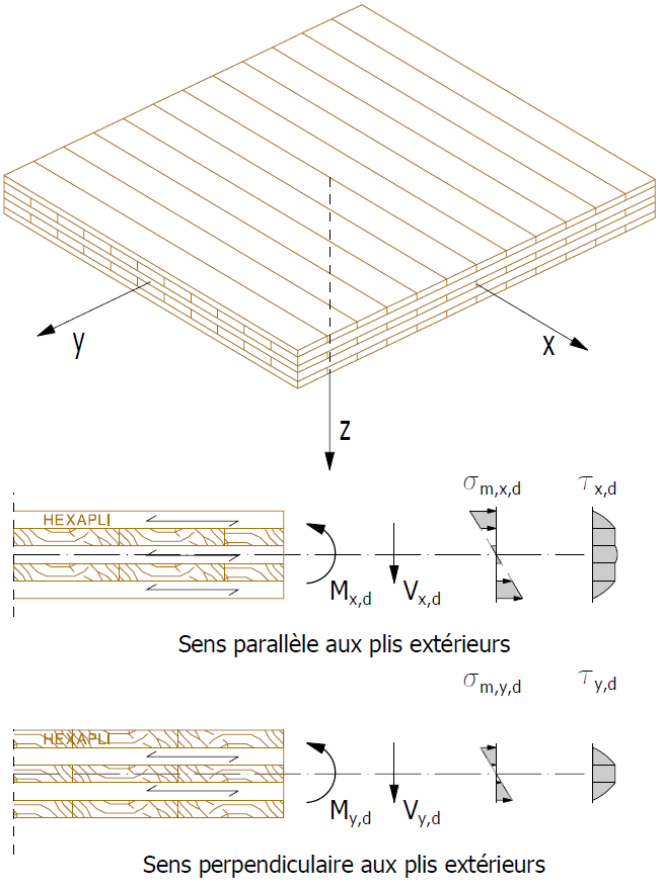


Figure 2: Définition des directions porteuses sous sollicitations hors plan

La modélisation du panneau HEXAPLI doit prendre en compte notamment :

- l'influence de la composition du panneau (épaisseur, classement mécanique et orientation des plis), des joints entre chants, des éventuelles rainures sur les propriétés mécaniques du panneau ;
- l'influence de la distribution des charges, du système statique et de la composition du panneau sur la distribution des contraintes et les déformations ;
- l'effet de concentrations de contraintes localisées (par exemple résistance sur appui, assemblages, charges concentrées,…) ;
- l'effet des ouvertures et trémies.

Pour déterminer la répartition des contraintes et des efforts internes, il est nécessaire de prendre en compte l'influence des déformations dues au cisaillement.

Les panneaux HEXAPLI eux-mêmes permettent la reprise locale de flexion transversale (sens perpendiculaire au fil des plis externes) notamment dans les configurations suivantes :

- trémies ;
- porte-à-faux ;
- panneau effectivement appuyé sur plus de deux côtés (les appuis pouvant être continus ou ponctuels).

Cependant, compte tenu de l'impossibilité qu'il y a à transmettre des moments entre panneaux adjacents au moyen des assemblages courants (cf. §5.51), les planchers composés de plusieurs panneaux adjacents doivent être conçus et mis en œuvre de manière à fonctionner en flexion sur deux appuis (modèle poutre) et non pas sur quatre côtés (modèle dalle).

6.2 Fonctionnement en modèle poutre

Le fonctionnement mécanique général du panneau HEXAPLI en flexion en modèle poutre est le suivant :

- Les plis transversaux fonctionnent comme des liaisons entre les plis longitudinaux dont la raideur de glissement est prise en compte en généralisant la méthode des γ de l'Annexe B de la norme NF EN 1995-1-1 ;
- La distribution des contraintes et les déformations peuvent alors être déterminées à partir de la rigidité efficace en flexion tenant compte de cette raideur de glissement ;
- Le module d'élasticité perpendiculaire au fil du bois doit être considéré comme nul, Ey,mean = 0 ;

- Il en résulte que les contraintes de flexion ne sont considérées que pour les plis dont les lames sont orientées dans la même direction que le fil du bois des couches considérées ;
- De même, les contraintes normales induites par l'effet des actions agissant dans le plan du panneau sont calculées en négligeant des plis orientés perpendiculairement à ces actions ;
- On calcule alors la contrainte normale en utilisant la section nette des plis mobilisables et l'inertie effective des panneaux.

Les plis de parements (§13.2) appliqués sur l'un des côtés des panneaux uniquement — notamment des couches de planches additionnelles qui en résultent — ne sont pas pris en compte dans les calculs.

6.21 Calcul de la rigidité efficace des panneaux CLT

Pour le dimensionnement des éléments HEXAPLI soumis à un chargement hors plan, il est d'usage de prendre des éléments de 1 m de large.

Les éléments sont considérés comme appuyés simplement à leurs extrémités et sur les appuis intermédiaires. La longueur effective L_{ef} est la distance entre les milieux de deux appuis consécutifs, elle est déterminée en fonction de la configuration d'appuis :

Appuis	Lef
Appui simple	L
Poutres continues	0,8 L
Poutres en porte-à-faux	2 L

La rigidité efficace est calculée en utilisant la théorie des poutres composites en flexion (méthode des γ) de l'Annexe B de la norme NF EN 1995-1-1 et en tenant compte de la raideur de glissement de cisaillement des plis transversaux agissant comme liaison entre les plis longitudinaux.

A cet effet, on remplace le terme $\frac{K_i}{S_i}$ de l'Annexe B de la norme NF EN 1995-1-1 par le terme $\frac{G_{r,i,j}.b}{h_{,ji}}$.

où :

- $G_{r,i,j}$ est le module de cisaillement roulant du pli transversal situé entre les plis i et j, en N/mm² ;
- b est la largeur de l'élément en mm ;
- $h_{i,j}$ est l'épaisseur du pli transversal situé entre les plis i et j, en mm.
- Méthode gamma - panneaux CLT 3 et 5 plis

Il convient que la rigidité efficace en flexion soit prise selon :

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^{3}\left(I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2\right)$$

Avec :

$$A_i = b \cdot h_i$$

$$I_i = \frac{b \cdot h_i^3}{12}$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{x,mean_i} \cdot A_i \cdot \bar{h}_i}{L^2 \cdot G_{r,mean} \cdot b}\right]^{-1} \text{ pour } i = 1 \text{ et } i = 3$$

$$a_1 = \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2}\right) - a_2$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_2}{2}\right) - \gamma_3 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}\right)}{\sum_{i=1}^{3}(\gamma_i \cdot A_i)}$$

$$a_3 = \left(\frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}\right) + a_2$$

Et où :

- $E_{x,mean,i}$ est le module d'élasticité moyen du pli i ;
- $G_{r,mean,i}$ est le module de cisaillement roulant moyen du pli i ;
- b est la largeur du panneau ;
- h_i est l'épaisseur du pli i.

6.22 Méthode gamma généralisée

Pour les panneaux de plus de 5 plis, il est possible de généraliser la méthode précédente et de déterminer les valeurs de γ_i pour toute composition symétrique de panneau de type CLT.

Les coefficients γ_i pour un panneau avec m plis travaillants s'obtiennent en résolvant l'équation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ v_{2,1} & v_{2.2} & v_{2.3} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & v_{3.2} & v_{3.3} & v_{3.4} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & v_{4.3} & v_{4.4} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & v_{m,m-1} & v_{m,m} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \vdots \\ \gamma_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ \vdots \\ s_m \end{pmatrix}$$

avec :

$$V_{1,1} = \left(C_{1,2} + D_1\right).a_1$$

…

$$V_{j,j+1} = -C_{j,j+1}.a_{j+1}$$

$$V_{j,j} = \left(C_{j-1,j} + C_{j,j+1} + D_j\right).a_j$$

$$V_{j+1,j} = -C_{j,j+1}.a_j$$

…

$$V_{m,m} = \left(C_{m-1,m} + D_m\right).a_m$$

Où la raideur équivalente du pli i tenant compte des glissements entre les plis travaillants est :

$$s_i = -C_{i,i+1}.(a_{i+1} - a_i) + C_{i-1,i}.(a_i - a_{i-1})$$

la raideur du pli transversal entre les plis longitudinaux j et k est :

$$C_{j,k} = \frac{G_{r,j,k}\,.\,b}{t_{j,k}}$$

la raideur du pli longitudinal travaillant i est :

$$D_i = \frac{\pi^2.E_{x.mean.i}\,.\,b\,.\,t_i}{L^2}$$

avec :

- j,k : le pli transversal entre les plis longitudinaux j et k
- ti : l'épaisseur du pli longitudinal i
- tj,k : l'épaisseur du pli transversal entre les plis longitudinaux j et k
- ai : la distance entre l'axe médian d'un pli longitudinal i et le centre de gravité de la section d'un panneau
- L : la portée de référence
- Gr,j,k : le module de cisaillement roulant du pli transversal situé entre les plis longitudinaux i et j
- Ex,mean,i : le module d'élasticité moyen du pli longitudinal i

6.3 ELU

6.31 Vérification ELU instantanée

6.311 Contraintes normales et de flexion

Les contraintes normales (ici de traction) et de flexion dans le pli travaillant i sont prises selon :

$$\sigma^i{}_{t,x,d} = \frac{\gamma_i\,.\,a_i\,.\,M_d}{I_{ef,x}}$$

$$\sigma^i{}_{m,x,d} = \frac{0{,}5\,.\,t_i\,.\,M_d}{I_{ef,x}}$$

On vérifie la traction et flexion combinée dans le pli travaillant i :

$$\sigma^i{}_{t,x,d} + \sigma^i{}_{m,x,d} = (\gamma_i\,.\,a_i + 0{,}5\,.\,t_i).\frac{M_d}{I_{ef,x}} \le f_{m,x,d}$$

La contrainte combinée maximale est vérifiée au point le plus éloigné de l'axe neutre.

Note : Les facteurs d'ajustement k_h de la résistance caractéristique en flexion et en traction définis dans la norme NF EN 1995-1-1, §3.2(3) ne s'appliquent pas.

6.312 Cisaillement roulant

De manière sécuritaire, on vérifie uniquement le cisaillement roulant, plus défavorable que le cisaillement longitudinal.

Le coefficient k_{cr} défini dans la norme NF EN 1995-1-1, §6.1.7(2) est pris égal à 1,0.

La résistance en cisaillement roulant $f_{r,k}$ est prise à 0,7N/mm² pour les lamelles d'élancement (ratio b_l/t_l = largeur/épaisseur) inférieur à quatre, 1,1N/mm² pour les lamelles d'élancement supérieur ou égal à quatre.

On vérifie ainsi pour un pli perpendiculaire aux plis extérieurs :

$$\tau_{r,xz,d} = \frac{\gamma_i \,.\, S_i}{I_{ef,x} \,.\, b} . V_d \leq f_{r,y,d}$$

Où le moment statique d'un pli au sein d'une section rectangulaire est :

$$S_i = b \,.\, t_i \,.\, x_i$$

Avec :

- b largeur du panneau ;
- ti l'épaisseur du pli i ;
- xi l'abscisse du barycentre du pli à l'axe de symétrie du panneau.

Note: Dans le cas d'un panneau à pli central transversal, les efforts de cisaillement maximaux s'exercent au centre de la section qui se situe au niveau de ce pli. On déterminera donc l'effort de cisaillement au niveau du joint collé le plus proche du centre de gravité général.

6.313 Flexion sur chant avec risque de déversement

La vérification en flexion sur chant avec risque de déversement s'effectue selon la norme NF EN 1995-1-1 (6.3.3). L'élancement relatif en flexion autour de l'axe x s'écrit :

$$\lambda_{rel,m,x} = \sqrt{\frac{f_{m,edge,x,k}}{\sigma_{m,x,ap,crit}}}$$

Avec :

- $\sigma_{m,x,ap,crit} = \frac{M_{x,crit}}{W_{x,ap}}$
- $W_{x,ap} = \frac{h_{xlam}^2 . t_{xlam}}{6}$
- $M_{x,crit} = \frac{\pi}{l_{ef}} . \sqrt{\left(E_{0.05} . I_{y,ap}\right) . \left(G_{tor,0.05} . \frac{I_{tor,ap}}{3}\right)}$
- $E_{y,0.05} = 5/6 \,.\, E_{y,mean}$
- $G_{tor,0.05} = 5/6 \,.\, G_{tor,mean}$
- $I_{tor,ef} = \frac{I_{tor,ap}}{3} = \frac{t_{xlam}^3 . h_{xlam}}{9} . (1 - 0.6 . \frac{t_{xlam}}{h_{xlam}})$
- $I_{y,ap} = \frac{t_{xlam}^3 . h_{xlam}}{12}$
- $\sigma_{m,x,ap,crit}$ la contrainte de flexion critique apparente
- $W_{x,ap}$ le module d'inertie apparent selon l'axe fort x
- $I_{tor,ef}$ le moment d'inertie efficace en torsion
- $I_{y,ap}$ le moment d'inertie apparent selon l'axe y
- E0,05 la valeur à 5 % du module d'élasticité moyen équivalent Emean ;
- G0,05 la valeur à 5 % du module de cisaillement moyen équivalent Gmean ;
- lef la longueur efficace de la poutre ;
- txlam l'épaisseur du panneau HEXAPLI
- hxlam la hauteur du panneau HEXAPLI

6.32 Vérification à l'ELU final

Les caractéristiques élastiques prises en compte sont réduites pour pouvoir considérer le fluage. La réduction est obtenue par la prise en compte des coefficients de fluage. Pour une combinaison d'actions pour laquelle chaque action appartient à une classe de durée de chargement différente, la contribution de chaque action doit être calculée séparément en utilisant le coefficient ψ_2. k_{def} approprié, puis additionnées pour les vérifications.

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{1 + \psi_2 . k_{def}}$$

$$G_{r,mean,fin} = \frac{G_{r,mean}}{1 + \psi_2 . k_{def}}$$

Avec :

- Ψ2 est défini dans l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1990 ; ψ2=1,0 pour les charges permanentes ;
- Gr,mean le module de cisaillement roulant moyen du panneau. Gr,mean est pris égal à 50N/mm².

6.4 ELS

6.41 Vérification ELS instantané

La vérification s'effectue en utilisant la rigidité efficace déterminée au paragraphe §6.21.

6.42 Vérification ELS final

Les caractéristiques élastiques prises en compte sont réduites pour pouvoir considérer le fluage. La réduction est obtenue par la prise en compte des coefficients de fluage. Pour une combinaison d'actions pour laquelle chaque action appartient à une classe de durée de chargement différente, la contribution de chaque action doit être calculée séparément en utilisant le coefficient k_{def} approprié, puis additionnées pour les vérifications.

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{1 + k_{def}}$$

$$G_{r,mean,fin} = \frac{G_{r,mean}}{1 + k_{def}}$$

$$G_{xy,mean,fin} = \frac{G_{xy,mean}}{1 + k_{def}}$$

Avec :

- Gr,mean le module de cisaillement roulant moyen du panneau;
- Gxy,mean le module de cisaillement moyen du panneau.

6.43 Vérifications de flèche

Les vérifications des flèches doivent être menées en considérant d'une part la flèche générée par le moment fléchissant et d'autre part la flèche générée par l'effort tranchant en considérant le module de cisaillement du panneau.

Les vérifications des flèches sont faites conformément à EN 1995-1-1/NA.

La flèche finale ne pourra excéder L/250 où L est la portée du panneau entre appuis. La flèche est calculée en considérant les caractéristiques mécaniques finales des panneaux HEXAPLI.

La flèche instantanée due aux actions variables ne pourra excéder L/300 où L est la portée du panneau entre appuis. La flèche est calculée en considérant les caractéristiques mécaniques instantanées des panneaux HEXAPLI.

Pour les planchers, la flèche active, pouvant nuire aux revêtements de sols rigides, ne doit pas dépasser :

- soit la valeur fixée par les DTU correspondants, si disponible ;
- soit L/500 de la portée si celle-ci est ≤ à 7,0m ; 0,7 cm + L/1 000 de la portée si celle-ci est supérieure à 7,0 m.

Pour les planchers n'ayant pas à supporter des revêtements de sols rigides, la flèche active est limitée, par la norme, ou en l'absence d'autres précisions, aux valeurs suivantes :

- soit L/350 de la portée si celle-ci est ≤ 7,00 m ;
- soit 1 cm + L/700 de la portée si celle-ci est supérieure à 7,00 m.

Les valeurs limites du tableau 7.2 de NF EN 1995-1-1/NA s'appliquent pour les déplacements horizontaux, y compris pour les éléments individuels soumis au vent pour lesquels on retient la valeur de L/200.

Les critères de flèches peuvent être dictés par les autres éléments de structure et/ou par les éléments de second œuvre mis en œuvre sur les panneaux HEXAPLI, il convient de vérifier que les déformations des panneaux HEXAPLI sont compatibles avec les déformations admissibles des autres procédés. Les critères de flèches limites spécifiés ci-dessus sont donc donnés à titre indicatif, il est nécessaire de déterminer les critères de flèches limites en se référant aux Eurocodes et leurs annexes nationales, évaluations techniques, DTU, etc.

6.5 Conception des assemblages

6.51 Principe

Les organes de fixation et les connecteurs mécaniques tridimensionnels doivent satisfaire aux exigences du §5.21 et du §5.22, respectivement.

Les organes de fixation ou d'assemblages doivent être justifiés en tenant compte des prescriptions suivantes :

- les organes de fixation conformes à la norme NF EN 14592 peuvent être dimensionnés selon la norme NF EN 1995-1-1, §7.1 et §8 lorsque l'organe ne traverse pas plus de deux plans de cisaillement ;
- lorsque l'organe traverse plus de deux plans de cisaillement, l'organe de fixation doit faire l'objet d'un ATE ou d'une ETE visant la fixation dans un panneau structural massif bois qui précise alors notamment :
    - les modalités de détermination de la portance locale selon l'orientation de l'effort ;
    - les dispositions relatives aux fixations dans l'épaisseur du panneau ;
    - les règles de pinces ;
    - les modules de glissement applicables dans un panneau structural massif bois.

6.52 Cas des assemblages bois/métal

En ce qui concerne les assemblages bois/métal, seuls les assembleurs dans les plans de cisaillements aux interfaces bois/métal sont considérés ici.

Il y a par ailleurs lieu de justifier également les éléments métalliques au regard des prescriptions de la norme NF EN 1993-1-1 et son Annexe Nationale. Ce point de dimensionnement n'est pas traité dans le présent document.

6.53 Cas des ancrages

L'ancrage des panneaux structuraux massifs bois dans les ouvrages d'infrastructure (usuellement support béton), réalisé par exemple au moyen de chevilles de fixations, doit également faire l'objet d'une vérification.

Les chevilles de fixation doivent bénéficier d'un ATE ou d'une ETE selon l'ETAG 001 précisant leurs capacités résistantes et leur modalité de dimensionnement. Ce point de dimensionnement n'est pas traité dans le présent document.

6.54 Calcul aux ELS

Une attention particulière doit être portée à la détermination du glissement des assemblages des structures en panneaux structuraux massifs bois, afin de s'assurer qu'il n'engendre pas de déformations de structure qui amèneraient celle-ci à ne plus respecter les exigences de la norme NF EN 1995-1-1 et son Annexe Nationale et/ou des NF DTU concernés.

6.55 Dispositions spécifiques pour les vis

Pour les vis, les formules suivantes sont à utiliser pour déterminer la portance locale et la valeur caractéristique de la capacité à l'arrachement (*Uibel & Blass, « Edge joints with dowel type fasteners in Cross Laminated Timber (2007)*) :

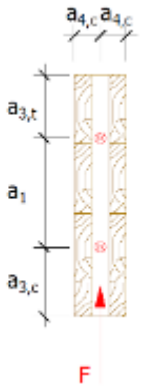
	Sollicitation	Vis
Fixation sur la face	Portance	Pour les vis sans pré-perçage : $f_{h,k} = 0{,}112.d^{-0{,}5}.\rho_k^{1{,}05}$ en N/mm²
	Arrachement	Pour les vis : $R_{ax,k} = \frac{0{,}35\,.\,d^{0{,}8}\,.\,l_{ef}^{0{,}9}\,.\,\rho_k^{0{,}75}}{1{,}5.\cos^2\varepsilon+\sin^2\varepsilon}$ en N
Fixation sur le chant	Portance	Pour les vis sans pré-perçage : $f_{h,k} = 0{,}862.d^{-0{,}5}.\rho_{lay,k}^{0{,}56}$ en N/mm²
	Arrachement	Pour les vis : $R_{ax,k} = \frac{0{,}35\,.\,d^{0{,}8}\,.\,l_{ef}^{0{,}9}\,.\,\rho_k^{0{,}75}}{1{,}5.\cos^2\varepsilon+\sin^2\varepsilon}$ en N

avec :

- d : diamètre nominal de la vis en mm
- ρk : masse volumique caractéristique du panneau HEXAPLI en kg/m3
- ρlay,k : masse volumique caractéristique du pli concerné
- ε : angle entre l'axe de la vis et la direction du fil du panneau HEXAPLI (égal à 90° pour une fixation sur face latérale et à 0° pour une fixation sur chant)
- lef : profondeur de pénétration de la vis en mm
- fh,k : valeur caractéristique de la portance locale en N/mm²
- Rax,k : valeur caractéristique de la capacité résistante en N

Pour les vis vissées sans pré-perçages dans les chants des panneaux, on retiendra les valeurs de pinces suivantes :

Espacement	Vis sans pré-perçages
a_1	10 d
a_2	3 d
$a_{3,t}$	12 d
$a_{3,c}$	7 d
$a_{4,c}$	5 d



7. Vérifications spécifiques aux planchers

7.1 Vérifications ELU

7.11 Contraintes normales de flexion et de cisaillement

Ces vérifications sont détaillées dans la partie 6. Vérifications – principes généraux.

7.12 Compression transversale

Les vérifications sont menées selon la norme NF EN 1995-1-1 (6.1.5) en tenant compte de l'orientation des plis.

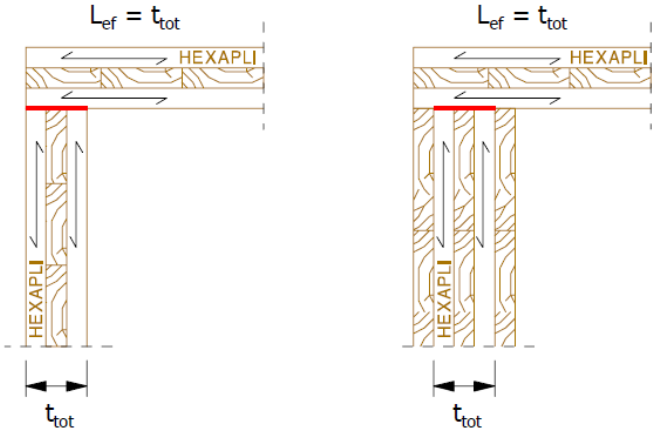
$$\sigma_{c.z,d} = \frac{F_{c,z,d}}{A_{ef}} \leq k_{c.90}.f_{c,z,d}$$

$$\text{avec } f_{c,z,d} = \frac{f_{c,z,k}.k_{mod}}{\gamma_M}$$

L'aire efficace A_{ef} est déterminée en considérant une répartition et une distribution uniforme des contraintes, la rotation des appuis n'est pas prise en compte.

A_{ef} est déterminée en considérant un élément de plancher de 1m et de largeur efficace de distribution L_{ef}.

L_{ef} est fonction de l'orientation des plis du panneau horizontal et de l'orientation des plis du panneau vertical ayant rôle d'appui, les différentes configurations sont décrites ci-dessous :



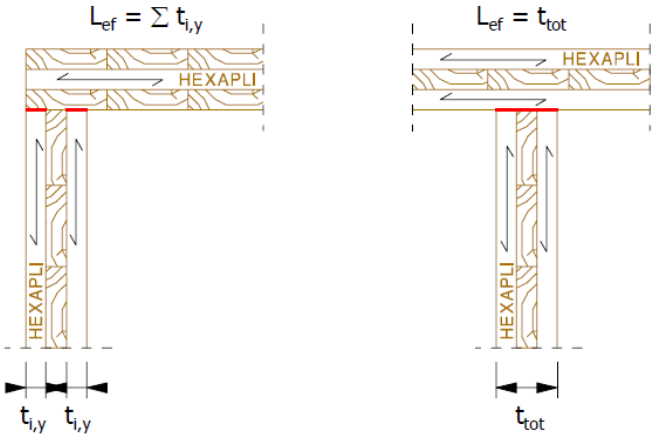


Figure 3 : Valeurs de L_{ef} en fonction de la configuration d'appui

La longueur de contact réelle L_{ef} est augmentée de chaque côté de 30 mm mais sans dépasser a, l ou 0,5 x l_1 (voir Figure 3).

En cas d'appui du panneau horizontal sur un autre matériau (béton, acier, bois massif), on considère la largeur totale de cet élément et on s'intéresse à l'orientation des plis du panneau horizontal pour déterminer L_{ef}.

La résistance caractéristique à la compression perpendiculaire est à associer à une valeur de $k_{c,90}$:

- prise égale à 1,25 pour les panneaux reposant sur appuis continus avec une distance l1 ≥ 2h.

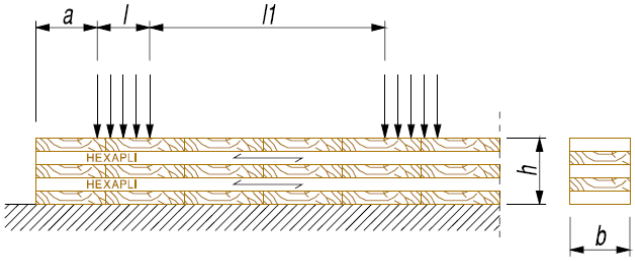


Figure 4 : Panneau reposant sur appuis continus

- prise égale à 1,5 pour des panneaux reposant sur appuis discrets soumis à une charge à une distance de l'appui l1 ≥ 2h.

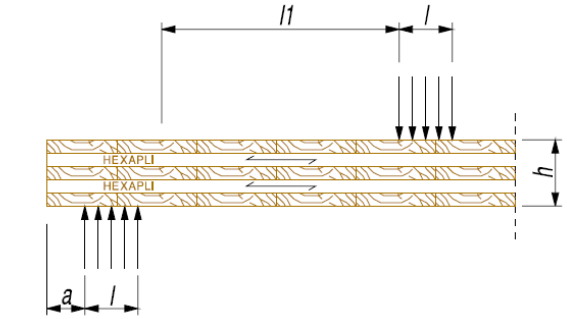


Figure 5 : Panneau reposant sur appuis discrets

- dans les autres cas kc,90 est pris égal à 1.

7.13 Cisaillement

Pour les panneaux non entaillés, la vérification en cisaillement s'effectue conformément au paragraphe §6.312.

7.131 Panneau avec entaille au niveau de l'appui

Pour les éléments HEXAPLI entaillés au niveau des appuis, il convient de calculer la contrainte de cisaillement au niveau de l'appui entaillé en utilisant la hauteur efficace réduite h_{ef} (prenant en compte l'orientation des plis à l'appui). La résistance au cisaillement $f_{v,d}$ sera minorée par le coefficient k_v conformément à EN 1995-1-1 (6.5.2).

On vérifie :

$$\tau_d = \frac{1{,}5 \cdot V_d}{b \cdot h_{ef}} \leq k_v \cdot f_{r,d} \quad (1)$$

Pour les poutres entaillées sur la face opposée à l'appui, k_v = 1.

Sinon :

$$k_v = min\left\{\frac{1}{\sqrt{h}\left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0{,}8.\frac{x}{h}.\sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2}\right)}\right.$$

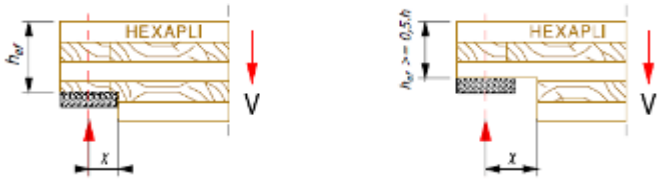


Figure 6 : Panneau avec entaille du côté de l'appui

avec :

- h est la hauteur de la poutre en mm ;
- x est la distance entre la ligne d'action de la réaction de l'effort et le coin de l'entaille, en mm (voir Figure 6 : Panneau avec entaille du côté de l'appui) ;
- $\alpha = \frac{h_{ef}}{h}$;
- kn = 4,5.

Si l'équation (1) n'est pas vérifiée, il est nécessaire de renforcer les zones tendues avec des vis dimensionnées pour reprendre l'effort de traction transversale au niveau de l'appui $F_{t,z,d}$ engendré par l'effort de cisaillement :

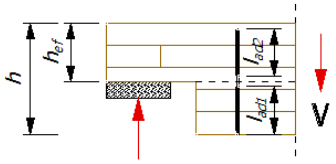
$$F_{t,z,d} = 1{,}3 \cdot V_d \cdot [3 \cdot (1-\alpha)^2 - 2 \cdot (1-\alpha)^3]$$

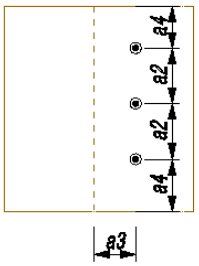
Les connecteurs de type tige utilisés vérifient les exigences du §5.21 et le paramètre d'arrachement $f_{ax,k}$ doit être précisé. Les connecteurs de type tige utilisables sont des vis entièrement filetées, des vis à double filetage, ou des tiges filetées. L'utilisation de vis sans filetage sous la tête est prohibée.

Les vis devront de plus vérifier les conditions suivantes :

- une résistance ultime à la traction de l'acier fub ≥ 600 Mpa et une résistance limite élastique de l'acier fyb ≥ 480 Mpa
- la longueur des vis est adaptée à la configuration de l'entaille (lef>6d)

Les conditions de pinces suivantes doivent être vérifiées :





a_3	a_2	a_4
10d	5d	4d

La répartition des vis sur le rang doit être assurée, il convient de vérifier : $1<a_2/a_4<5/4$.

Il convient de placer les vis au plus proche de l'entaille (au plus proche de la pince a_3).

Dimensionnement :

- La traction transversale d'anti-fendage ne peut être reprise que par le premier rang de vis. Il convient donc de n'utiliser que le premier rang de vis dans la vérification à l'arrachement de la partie filetée et dans la vérification en traction.
- Le dimensionnement ci-dessous ne tient compte que de la traction transversale au niveau de l'entaille. En cas de combinaison d'efforts axiaux et latéraux, une étude particulière doit être réalisée.
- Pour la vérification en arrachement, Fax,k est déterminée selon NF EN 1995-1-1 ou selon les données fabricant en retenant pour lef = min(lad,1 ; lad,2) avec lef ≥ 6d.

7.132 Contribution à l'effort tranchant au niveau de l'appui

Conformément à EN 1995-1-1 (6.1.7(3)) la contribution à l'effort tranchant total d'une charge concentrée F agissant sur la face supérieure d'un panneau HEXAPLI et à une distance h ou h_{ef} à partir de l'extrémité de l'appui peut être négligée (voir Figure 7). Pour les poutres dotées d'une entaille au niveau de l'appui, cette réduction de l'effort tranchant s'applique seulement lorsque l'entaille est du côté opposé à l'appui.

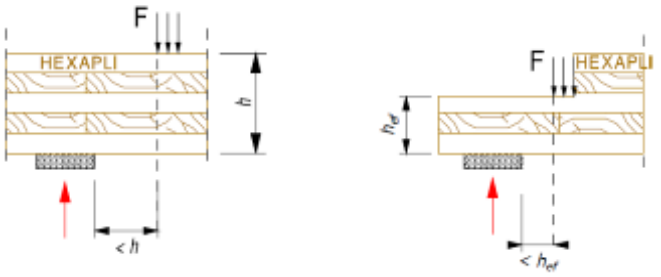


Figure 7 : Panneau avec entaille du côté opposé à l'appui

7.2 Vérifications ELS

7.21 Critères de flèches

La vérification à l'ELS se fait selon les prescriptions communes décrites au §6.4.

7.22 Vérification vibratoire

Les planchers d'un ouvrage résidentiel doivent faire l'objet d'une vérification du critère vibratoire défini au §7.3.3 de la norme NF EN 1995-1-1 qui s'applique pour les planchers pour lesquels la fréquence fondamentale f_1 est supérieure à 8 Hz. La méthode présentée ci-dessous s'applique pour les cas où 4,5 Hz ≤ f_1 ≤ 8 Hz.

La vérification se fait en trois étapes :

- le calcul de la fréquence fondamentale : f1 (Hz)
- le calcul de la souplesse : déformation du plancher sous charge unitaire d'1 kN : w1kN (mm)
- le calcul de l'accélération arms (m/s2)
- des bâtiments de catégories d'usage A, B, C1, C3 et D1 selon la norme NF EN 1991-1-1.
- avec une masse surfacique ≥ 50 kg/m² (en considérant la charge permanente et la part quasi permanente des charges d'exploitation).
- dès lors que l'ouvrage de plancher peut être classé selon la classification décrite ci-après et en respecte les critères constructifs.

Les planchers de masse inférieure et/ou à destination d'usage particulière (salles de sport, de danse, de gymnastique, laboratoires, …) doivent faire l'objet d'une analyse spécifique.

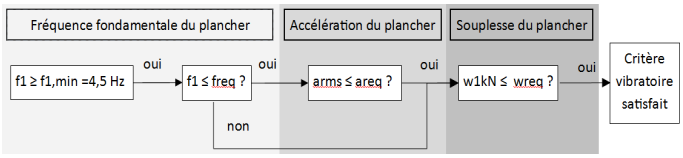
On distingue les ouvrages de plancher selon leur position, leur destination et leur composition constructive :

Catégorie	**Planchers de classe I**	**Planchers de classe II**	**Planchers de classe III**
	A, B, C1, C3, D1		**A**
Utilisation	Planchers entre différentes catégories d'usages Planchers séparatifs de logements, de bureaux, de salles de conférences, etc. Couloirs avec de faibles portées	Planchers au sein d'un même logement	Planchers sous locaux non habités Planchers sans exigences vis-à-vis des vibrations
Exigences constructives			
Chape flottante humide	Chape avec lestage lourd ou chape avec lestage léger 1)	Chape seule	-
Chape flottante sèche	Chape avec lestage lourd 1)	Chape avec lestage lourd 1)	-

1) Un lestage lourd est défini par une masse surfacique supérieure à 60 kg/m².
Un lestage léger est défini par une masse surfacique supérieure à 30 kg/m² et inférieure à 60 kg/m².

Exigences de fréquence, de raideur et d'accélération			
Fréquence	f1 ≥ 4,5 Hz		-
	freq = 8 Hz	freq = 6 Hz	-
Raideur	wreq = 0,25 mm	wreq = 0,5 mm	-
Accélération	areq = 0,05 m/s²	areq = 0,10 m/s²	-

Le critère vibratoire est satisfait si les conditions suivantes sont respectées :



Fréquence fondamentale du plancher :

Pour un plancher de dimensions l x b appuyé sur ses quatre côtés, la fréquence fondamentale f_1 (en Hz) est calculée comme suit :

Pour un plancher à rigidité transversale réduite (*) :

$$f_1 = k_{e,1} \cdot \frac{\pi}{2.L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_x}{m}}$$

Pour un plancher à rigidité transversale élevée (*) :

$$f_1 = k_{e,1} \cdot \frac{\pi}{2.L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_x}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \cdot \frac{(EI)_y}{(EI)_x}}$$

où :

- (EI)x la rigidité longitudinale du plancher (N.m²/m) ;
- (EI)y la rigidité transversale du plancher (N.m²/m) avec : (EI)y ≤ (EI)x ;
- m la masse du plancher (kg/m²) correspondant à la somme des actions permanentes et quasi-permanentes ;
- ke,1 est un facteur permettant la prise en compte de l'influence de portées dissymétriques pour les planchers sur 3 appuis. Pour un plancher sur 2 appuis, ke,1 = 1.

ke,1											
l2/l	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
ke,1	1	1,09	1,16	1,21	1,25	1,28	1,39	1,36	1,41	1,47	1,56
l2 / l est le ratio des portées avec l2 la portée la plus longue L'interpolation linéaire entre valeurs est autorisée											

(*) On considère qu'il y a distribution transversale élevée lorsque :

$$\frac{(EI)_y}{(EI)_x} \geq 0{,}05$$

La rigidité des chapes peut être prise en compte dans le calcul des rigidités du plancher, néanmoins sans effet composite entre la chape et le plancher CLT.

Calcul de la souplesse du plancher :

La souplesse ou déformation sous charge unitaire F = 1 kN du plancher W_{1kN} est calculée comme suit :

$$w_{1kN} = \frac{F.L^3}{48.(EI)_x.b_{ef}}$$

où b_{ef} est la largeur contributive du plancher :

$$b_{ef} = min \begin{cases} b \\ \frac{l}{1{,}1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_y}{(EI)_x}} \end{cases}$$

Cette équation s'applique aux planchers sur 2 appuis. Par simplification, elle est également applicable aux planchers sur 3 appuis en prenant l comme la valeur de la plus grande portée.

Calcul de l'accélération a_{rms} du plancher :

On calcule l'accélération a_{rms} (accélération due à la marche) du plancher comme suit:

$$a_{rms} = \frac{0{,}4.\alpha.F_0}{2.\zeta.M^*}$$

où :

- α= e-0,47 f1 coefficient de Fourier de la fréquence fondamentale
- F0 force correspondant au poids d'une personne (F0 = 700 N)
- ζ rapport d'amortissement modal

• **Type de plancher**	• **Rapport d'amortissement modal ζ**
• Plancher CLT avec chape flottante et lestage lourd	• 0,04
• Plancher CLT avec ou sans lestage léger	• 0,025

M^* masse modale (kg) calculée comme suit :

$$M^* = \frac{m.l.b_{ef,M^*}}{2}$$

Où b_{ef,M^*} est la largeur contributive à ma masse modale du plancher :

$$b_{ef,M^*} = min\begin{cases} \frac{b}{2} \\ \frac{l}{1{,}1}.\sqrt[4]{\frac{(EI)_y}{(EI)_x}} \end{cases}$$

7.3 Conception et dimensionnement des trémies

Il est possible de réaliser des ouvertures (trémies) dans les ouvrages de plancher en panneaux HEXAPLI :

- soit au moyen de renforts structuraux de type poutre (formant un chevêtre porteur), le panneau est alors calculé comme normalement supporté ;
- soit avec des panneaux HEXAPLI seuls, il est alors nécessaire de procéder à des vérifications particulières détaillées ci-dessous.
- On distingue 3 cas :
- La réservation est de faibles dimensions (inférieures à 30 x 30 cm) : certaines dispositions permettent de s'affranchir d'une vérification spécifique ;
- La réservation est située en bordure de panneau (voir Figure 8) ; la vérification peut être réalisée par décomposition comme décrit au §7.311;
- La réservation est intégralement comprise dans un même panneau, la vérification peut être réalisée par report de charge comme décrit au §7.312.
- Réservations de faibles dimensions

On entend par « réservations de faibles dimensions » les réservations de forme rectangulaire ou circulaire de dimensions inférieures à 30 x 30 cm. Pour ces réservations, aucune justification particulière n'est nécessaire lorsque l'ensemble des dispositions suivantes sont vérifiées (on appelle d_{res} la dimension la plus grande de la réservation concernée ou de deux réservations adjacentes) :

- leur nombre n'excède pas deux par travée d'un même panneau ;
- l'espacement bord à bord entre deux réservations successives est d'au moins deux fois dres ;
- la distance du bord du panneau au bord de la réservation est d'au moins une fois dres ou la réservation n'excède pas 15 x 15 cm ;
- aucune charge concentrée n'est localisée à une distance inférieure à deux fois dres du bord de la réservation (la charge d'exploitation concentrée Qk n'est pas concernée par cette disposition);
- le taux de travail en flexion et en cisaillement du panneau (considéré comme plein) ne dépasse pas 30%.

Pour toute réservation qui ne satisfait pas aux dispositions de ce paragraphe, une vérification spécifique est nécessaire.

7.31 Vérification simplifiée des trémies

7.311 Réservations situées en bordure de panneau de plancher - Principe de décomposition

Le principe de décomposition est applicable moyennant le respect des dispositions suivantes :

- la trémie se situe au bord d'un élément porteur de plancher ;
- la largeur de la trémie est inférieure à la moitié de la largeur de l'élément de plancher ;
- le plancher repose sur trois ou quatre appuis perpendiculaires à la longueur du panneau ;
- l'escalier impose un chargement surfacique uniforme soit selon la largeur soit selon la longueur de la trémie, ou n'impose aucun chargement supplémentaire ;
- les poutres virtuelles, issues de la modélisation (voir Figure 8) doivent présenter un élancement (rapport de la portée à l'épaisseur) au moins égal à 6.

On décompose le panneau en poutres virtuelles élémentaires, selon le principe de la Figure 8:

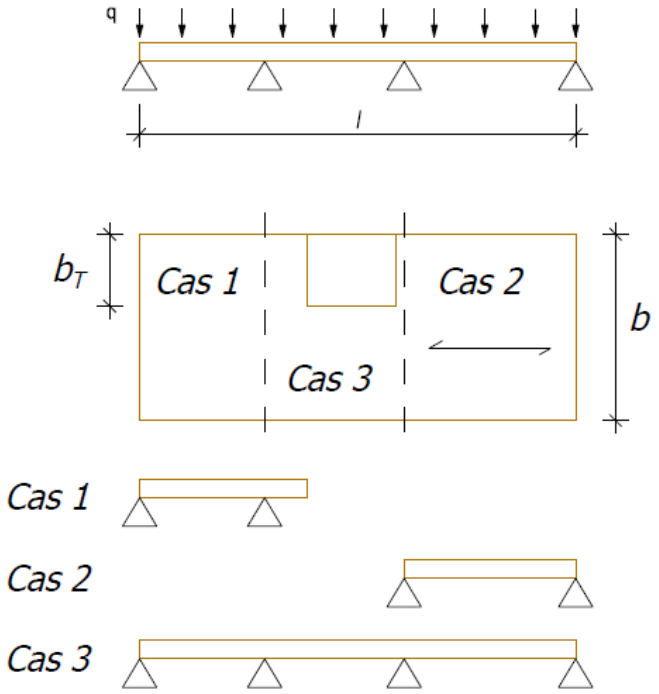


Figure 8 : Modélisation d'une réservation en bord de panneau

Pour chacune des poutres virtuelles élémentaires, on vérifie les efforts et flèches maximaux en travées et en porte-à-faux. Le cas échéant le chargement imposé par l'escalier est appliqué sur le bord concerné de la poutre virtuelle le supportant.

7.312 Réservations intégralement comprises dans un même panneau de plancher – Principe de report de charge

Le principe de report de charge est applicable moyennant le respect des dispositions suivantes :

- la trémie se situe intégralement au sein d'un seul et même élément porteur de plancher ;
- la largeur de la trémie est inférieure au 2/3 de la largeur de l'élément de plancher ;
- le plancher repose sur deux appuis perpendiculaires à la longueur du panneau ;
- l'escalier impose un chargement surfacique uniforme soit selon la largeur soit selon la longueur de la trémie, ou n'impose aucun chargement supplémentaire.

On définit :

- a longueur de la réservation
- bT largeur de la réservation
- c bande transversale de largeur 40cm permettant le report des charges par l'intermédiaire des plis transversaux
- l1 et l2 distances respectives entre l'appui du plancher et l'appui fictif c
- q charge répartie à reprendre par le plancher

Etape 1 : vérification de la section à hauteur de la bande b_T au niveau de la réservation seule :

On calcule la réaction d'appui élastique fictive R qui s'exerce sur la bande c : R = q x (max(l1;l2)+ c) x 0.5

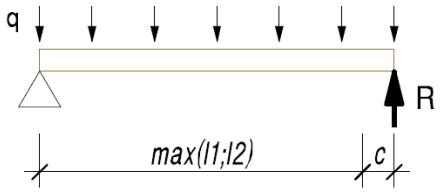


Figure 9 : Etape 1 de la vérification

Etape 2 : la bande de largeur c transmet les charges perpendiculairement à la direction principale du panneau vers les bords par le biais des plis transversaux. On la modélise comme une poutre encastrée à ses 2 extrémités soumise à une charge linéique R en kN/ml.

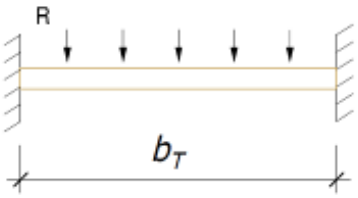


Figure 10 : Etape 2 de la vérification

On vérifie alors les contraintes de flexion et de cisaillement ainsi que la déformation de cette poutre fictive (transversale) en considérant l'inertie transversale du panneau.

Etape 3 : les bandes b_1 et b_2 qui ne sont pas entrecoupées par la réservation reprennent respectivement les bandes de chargement A1 et A2. On vérifie alors les deux bandes latérales sous ce chargement majoré en flexion, cisaillement ainsi qu'en déformation.

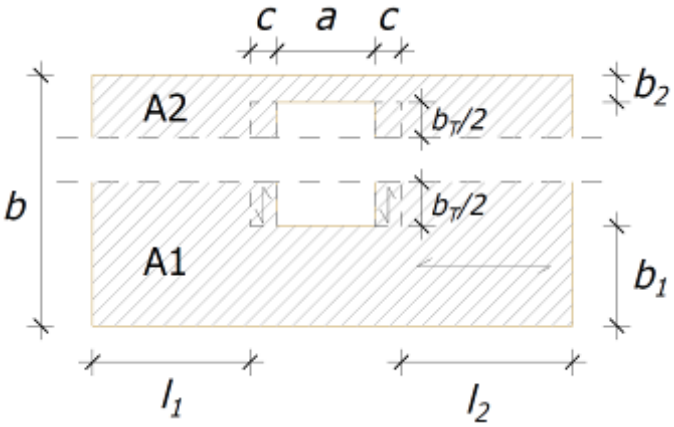


Figure 11 : Etape 3 de la vérification

7.32 Modélisation avec des éléments finis

Afin de modéliser tout type de charge et de géométrie, l'utilisation d'un logiciel d'éléments finis est une autre méthode possible. Pour effectuer les vérifications réglementaires, il est recommandé d'utiliser un logiciel permettant de prendre en compte le caractère orthotrope du CLT.

7.4 Diaphragme de plancher

7.41 Principe

La structure de plancher en panneaux HEXAPLI participe au contreventement global du bâtiment par sa fonction de diaphragme.

Le fonctionnement en diaphragme des planchers assure la répartition des efforts horizontaux (vent, poussée des terres, séisme, etc…) entre les éléments de contreventement (voiles, portiques). Pour cela, le plancher diaphragme doit avoir une rigidité suffisante afin que la déformabilité de cisaillement soit négligeable par rapport aux déplacements horizontaux des éléments porteurs.

L'analyse peut être menée en considérant le comportement du plancher comme celui d'une poutre horizontale plate, proche du mécanisme de poutre en treillis.

Pour un plancher en panneaux HEXAPLI, le diaphragme de plancher se compose de plusieurs panneaux connectés entre eux sur toute leur longueur. Les efforts de cisaillement dus aux efforts horizontaux sont transmis par les assemblages entre panneaux dans un même plan décrits au §5.51. Le calcul des efforts internes du diaphragme permet de dimensionner les assemblages de panneaux entre eux dans le plan du plancher.

Par ailleurs, l'effort horizontal, parallèle au sens de portée des panneaux HEXAPLI, induit une flexion du diaphragme qui tend à solliciter en traction les assemblages entre panneaux situés sur la face de la poutre opposée à l'action.

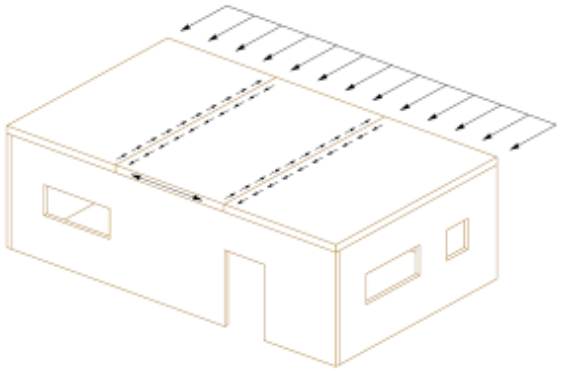


Figure 12 : Schématisation du diaphragme de plancher

Les organes d'assemblages entre panneaux de plancher peuvent donc être sollicités à la fois en cisaillement parallèle au joint et en cisaillement transversal (induit par l'effort de traction).

L'assemblage des éléments de plancher aux murs doit permettre de transmettre les efforts de cisaillement en rive.

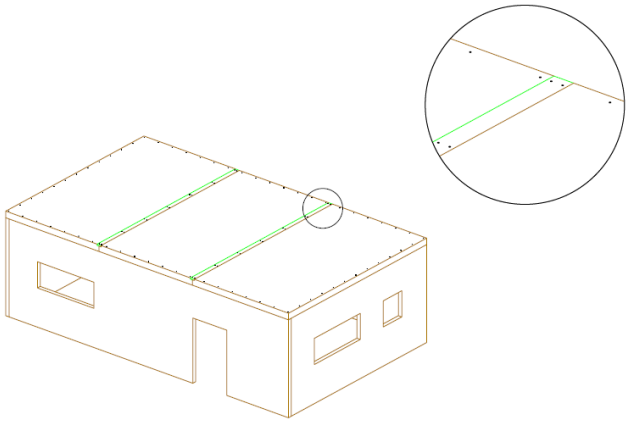


Figure 13 : Assemblage du diaphragme de plancher sur les murs du niveau inférieur

Dans le cas de planchers reposant sur des murs composés de plusieurs panneaux, il est nécessaire de recréer un chainage en tête de mur. Il convient de vérifier :

- la capacité des plis des éléments de plancher parallèles à l'axe de l'effort horizontal en traction et compression ;
- la capacité des vis à transférer les efforts aux panneaux adjacents (efforts de cisaillement sur l'assemblage entre panneaux dans un même plan) ;
- le dimensionnement du tirant en bord de plancher (pièce rapporté ou joints renforcés) ;
- la résistance des liaisons des éléments de plancher aux murs porteurs.

7.42 Diaphragmes avec ouvertures

Lorsque les panneaux de plancher HEXAPLI comportent des ouvertures, une justification spécifique doit être apportée afin de justifier de la raideur en plan du diaphragme.

Le diaphragme avec ouvertures est considéré comme rigide si lorsqu'il est modélisé avec sa flexibilité en plan effective, ses déplacements n'excèdent en aucun point les déplacements du diaphragme rigide de plus de 10 %. L'étude est alors effectuée selon la méthode décrite pour les diaphragmes pleins.

Dans le cas contraire, les zones avec ouvertures ne sont pas considérées dans le calcul du diaphragme, mais comme des zones opaques. Il est alors nécessaire de vérifier que ces zones et leurs jonctions permettent bien le transfert des efforts horizontaux.

8. Vérifications spécifiques aux murs

8.1 Chargement

8.11 Charges perpendiculaires à la surface du panneau

Pour la reprise des charges perpendiculaires à la surface du panneau HEXAPLI (action du vent), l'étude est similaire à celle d'un élément de plancher soumis à la flexion plane. (cf : §7.11 et §7.21).

Il convient de vérifier aux ELU les contraintes de flexion et de cisaillement induites par ces charges conformément au §6.31 et de vérifier aux ELS les flèches des panneaux selon §6.43.

8.12 Charges verticales

La résistance des éléments porteurs verticaux soumis à des charges verticales dans leur plan doit être justifiée vis-à-vis du risque de flambement hors plan.

Le calcul de l'élancement des panneaux HEXAPLI est effectué en considérant d'une part la longueur de flambement calculée de manière usuelle en fonction des conditions d'appuis (considérées comme des articulations), d'autre part le rayon de giration dont le calcul est donné en §8.21.

Le calcul de la contrainte majorée de compression est effectué suivant la norme NF EN 1995-1-1.

Les contraintes normales induites par l'effet des actions verticales agissant dans le plan du panneau sont calculées en négligeant des plis orientés perpendiculairement à ces actions. On ne considère donc que les seuls plis dont le sens du fil est parallèle à la résultante des efforts dus aux actions verticales exercées. Ces plis travaillent en compression axiale ou plus rarement en traction axiale.

Les murs étant chargés de façon dissymétrique, il convient de considérer un excentrement de la charge verticale pris égal à la plus grande des valeurs suivantes :

- 1/6 de l'épaisseur du panneau ;
- ou l'excentrement réel.

On détermine la contrainte de compression (ou de traction) en utilisant la section nette A_{net} et en utilisant l'inertie effective des panneaux I_{ef} calculée conformément au §6.21.

Lorsque les panneaux HEXAPLI utilisés comme murs porteurs sont pourvus d'ouvertures, les éléments formant poteaux entre ouvertures doivent faire l'objet d'une vérification spécifique en tenant compte, si besoin, du risque de flambement dans les deux directions.

De la même façon, les éléments formant linteaux au-dessus des ouvertures doivent faire l'objet d'une vérification spécifique.

8.2 Vérifications sous charges verticales

8.21 Compression ou traction simple

Pour les murs non sollicités par des actions horizontales perpendiculaires au plan (mur intérieur par exemple), on vérifie pour la direction x:

Pour la compression avec risque de flambement dans la direction z:

$$\frac{\sigma_{c,x,d}}{k_{c,z}.f_{c,x,d}} = \frac{F_{c,x,d}}{A_{x,net}.k_{c,z}.f_{c,x,d}} \leq 1$$

Il y a risque de flambement lorsque le rapport d'élancement dans la direction concernée $\lambda_{rel,z}$ ou $\lambda_{rel,y}$ est strictement supérieur à 0,3.

Avec :

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{{k_z}^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$$

$$k_z = 0{,}5.\left(1 + \beta_c\left(\lambda_{rel,z} - 0{,}3\right) + \lambda_{rel,z}^2\right)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c,x,k}}{E_{0,05}}}$$

$$\lambda_z = \frac{l_{ef}}{i_{ef}}$$

- lef = longueur de flambement du poteau, qui est égale à la longueur du poteau pour les panneaux considérés comme biarticulés.
- ßc = 0,1

La vérification de stabilité est réalisée avec le rayon de giration efficace i_{ef} prenant en compte la déformation par glissement entre les plis et déterminé comme suit :

$$i_{ef} = \sqrt{\frac{I_{ef}}{A_{x,net}}}$$

Pour la compression sans risque de flambement :

$$\frac{\sigma_{c,x,d}}{f_{c,x,d}} = \frac{F_{c,x,d}}{A_{net,x}.f_{c,x,d}} \leq 1$$

Pour la traction :

$$\frac{\sigma_{t,x,d}}{f_{t,x,d}} = \frac{F_{t,x,d}}{A_{net,x}.f_{t,x,d}} \leq 1$$

avec :

- Ax,net = section nette du panneau (tenant compte uniquement des plis travaillants dans la direction sollicitée)

8.22 Compression et flexion combinées

Le calcul des efforts de compression et de flexion combinés doit être mené selon le §6.3.2 de la norme NF EN 1995-1-1 pour les poteaux sollicités en compression seule ou en compression et flexion combinées. Lorsqu'il y a risque de flambement (rapport d'élancement $\lambda_{rel,z}$ ou $\lambda_{rel,y}$ strictement supérieur à 0,3), on vérifie pour la direction x avec risque de flambement selon z:

$$\left|\frac{\sigma_{c,x,d}}{k_{c,z}.f_{c,x,d}}\right| + \left|\frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}}\right| \leq 1$$

Lorsqu'il n'y a pas de risque de flambement (rapport d'élancement $\lambda_{rel,z}$ et $\lambda_{rel,y}$ inférieurs ou égaux à 0,3), on vérifie pour la direction x:

$$\left|\frac{\sigma_{c,x,d}}{f_{c,x,d}}\right|^2 + \left|\frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}}\right| \leq 1$$

8.23 Compression oblique

Le calcul de compression oblique s'effectue conformément au §6.2.2 de la norme NF EN 1995-1-1, en ne prenant en compte que les plis dont le fil forme un angle α avec l'effort à reprendre c'est-à-dire les plis chargés en bois de bout. On vérifie pour la direction x :

$$\sigma_{c.\alpha,d} = \frac{F.\frac{t_{xlam}}{\cos\alpha}}{\sum_i \frac{t_i}{\cos\alpha}.L} \leq \frac{f_{c,x,d}}{\frac{f_{c,x,d}}{k_{c,90}.f_{c,z,d}}.\sin^2\alpha + \cos^2\alpha}$$

Avec :

- F l'effort de chargement linéique (N/ml)
- ti épaisseur du pli i dont le fil forme un angle α avec l'effort F (plis en bois de bout travaillants)
- L la largeur du panneau
- D = txlam / cos α = la hauteur chargée.

Il peut être nécessaire de vérifier le cisaillement roulant lorsque, pour des valeurs de α importantes (supérieures à 60°), les plis transversaux sont sollicités.

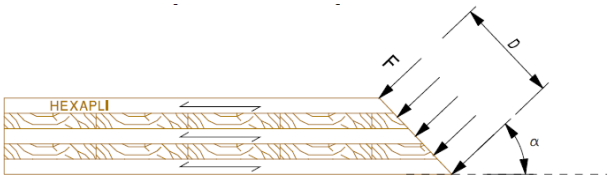


Figure 14 : Compression oblique

8.24 Compression sous charge ponctuelle

Les contraintes de compression axiales engendrées par des appuis ponctuels, poutres ou poteaux en appui sur le mur par l'intermédiaire de connecteurs ou de sabots etc. sont reprises uniquement par les plis orientés verticalement et ce sans considérer de répartition de contraintes. On vérifie pour la direction x :

$$\frac{\sigma_{c,x,d}}{f_{c,x,d}} = \frac{F_{c,x,d}}{A_{x,net}.f_{c,x,d}} \leq 1$$

$A_{x,net}$ est défini dans les figures ci-dessous :

où :

- bef largeur de contact efficace de la poutre
- lef longueur de contact efficace de la poutre

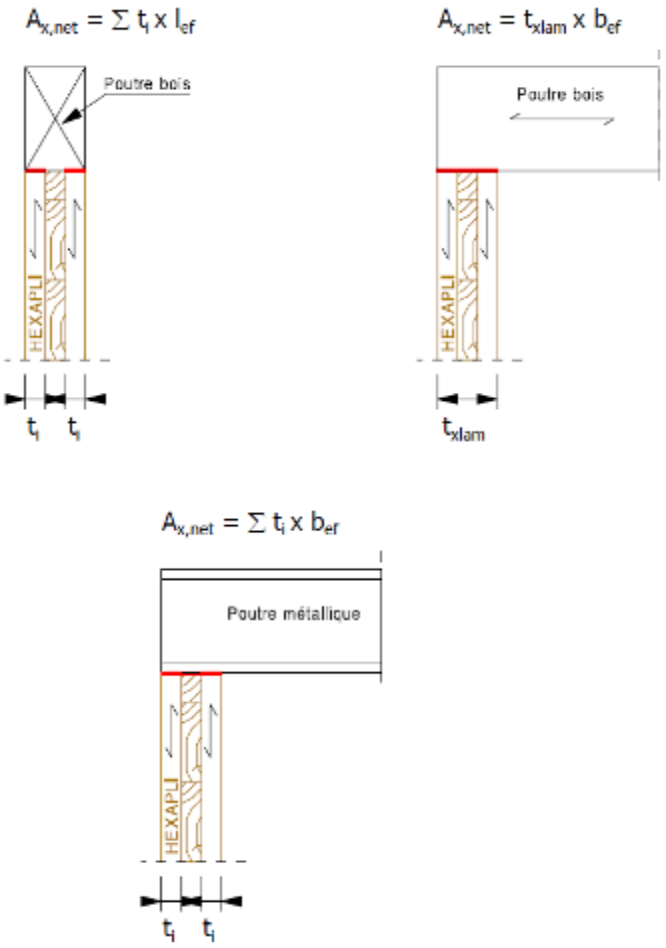


Figure 15 : Valeurs de $A_{x,net}$ en fonction du type d'appui

Dans le cas d'un appui de poutre en bois, la compression transversale de cette poutre peut être dimensionnante et doit être vérifiée en tenant compte de la surface d'appui telle que représenté dans la figure ci-dessus.

8.3 Vérifications sous charges horizontales

8.31 Rôle de contreventement

Lorsque des panneaux HEXAPLI sont utilisés pour assurer le contreventement, il est possible :

- Soit de les considérer comme une succession de panneaux isolés les uns des autres :
  - Il est alors nécessaire de justifier leur tenue et celle de leurs ancrages en les considérant comme libres en tête et encastrés en pied ;
  - Ceci n'est applicable que si les panneaux sont fixés mécaniquement en pied et d'une largeur supérieure à 0,60 m ;
  - Il est également nécessaire de s'assurer de la présence d'une lisse haute transmettant l'effort horizontal et de justifier la transmission de l'effort aux panneaux par cette lisse et en ne tenant compte que des plis orientés dans le sens de cet effort.
- Soit de considérer les liaisons entre panneaux :
  - Il est alors nécessaire de justifier la tenue des panneaux et celles de leurs ancrages d'une part, et
  - de justifier la transmission des efforts de glissement entre panneaux d'autre part.

Lorsque des panneaux HEXAPLI munis d'ouvertures sont utilisés pour assurer le contreventement, il doit être vérifié que le linteau supérieur du panneau est capable de transmettre l'effort horizontal en ne tenant compte que des plis orientés dans le sens de cet effort.

Il convient de vérifier :

- la capacité résistante au cisaillement des panneaux soumis à une poussée horizontale dans leur plan qui mobilise aussi bien les plis longitudinaux que les plis transversaux ;
- les ancrages qui reprennent les efforts de soulèvement générés par les charges horizontales (modèle de rotation rigide suivant la norme NF EN 1995-1-1 Méthode A) ;
- les assemblages entre panneaux adjacents dans un même plan lorsque la liaison entre panneaux est considérée.

Un exemple de cheminement des efforts est donné Figure 16.

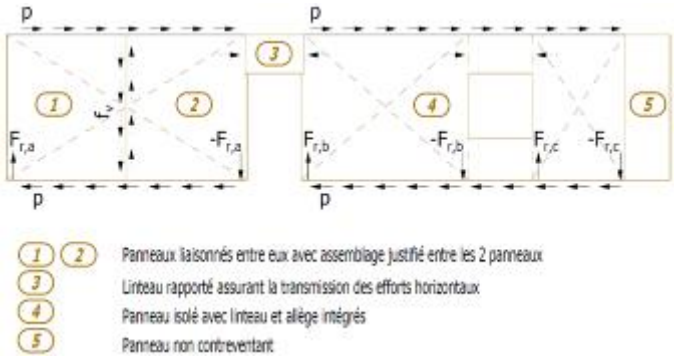


Figure 16 : Exemple de cheminement des efforts horizontaux dans un mur de contreventement

avec :

- k : indice de l'élément contreventant
- p : charge linéique en tête de mur en N/m
- Fr,k : effort de soulèvement provoqué par la charge p
- fv : effort de cisaillement dans les liaisons entre panneau adjacents en N.

8.32 Cisaillement dans le plan

On vérifie la capacité résistante au cisaillement des panneaux soumis à une poussée horizontale dans leur plan. Pour ce faire, on vérifie les trois modes de ruptures potentiels sous ce type de sollicitation à l'ELU :

1) Cisaillement du panneau entier :

- $\tau_{xy,gross,d} = \frac{V_d}{b.t_{xlam}} \leq f_{v,xy,gross,d}$
- Cisaillement au croisement des planches collées entre plis :
- $\tau_{xy,net,d} = \frac{V_d}{b.t_{min}} \leq f_{v,xy,net,d}$
- Cisaillement des joints entre les planches :
- $\tau_{tor,node,d} = \frac{V_d.H}{\Sigma I_p} . \frac{b_{min}}{2} \leq f_{v,tor,node,d}$

où :

- b la largeur du panneau ;
- txlam l'épaisseur du panneau ;
- Vd l'effort tranchant agissant sur le panneau ;
- tmin la somme des épaisseurs de plis transversaux ou des plis longitudinaux, la plus petite des deux valeurs étant à retenir ;
- bmin la largeur de la planche la moins large par plan de croisement (mm) ;
- Ip le moment d'inertie polaire d'une section surface de croisement. $I_p = \frac{a^4}{6}$ pour un plan de croisement carré;
- ΣIp la somme des moments d'inertie polaire de l'ensemble des surfaces de croisement du panneau. ΣIp = nombre de plans de croisement x nombre de plans de collage x Ip
- H la hauteur du panneau perpendiculaire à l'effort agissant horizontal

8.33 Conception des ancrages en pieds

Deux types d'efforts sont induits en pied des panneaux soumis à une poussée horizontale dans leur plan :

- les efforts de soulèvement d'une part, induits par le mouvement de rotation (basculement ou renversement) généré par l'application de la poussée en tête de mur ;
- les efforts de cisaillement d'autre part, correspondant à l'effort horizontal de contreventement transmis au support du mur.
- De manière générale on privilégiera une conception dans laquelle :
- les ancrages, reprenant les efforts de soulèvement ainsi générés, sont dimensionnés pour ne reprendre que ces efforts ; et
- l'effort tranchant à la base des éléments porteurs verticaux est alors équilibré par des connecteurs dédiés à cet usage et n'intervenant pas dans l'équilibrage des efforts de soulèvement.

8.34 Vérification des assemblages entre panneaux adjacents

Lorsque l'on se place dans la configuration considérant les liaisons entre panneaux, il est nécessaire de porter une attention particulière à la conception des assemblages entre panneaux adjacents afin d'assurer le transfert entre eux des efforts de cisaillement induits par les efforts de contreventement.

Les assemblages entre panneaux dans un même plan sont décrits au §5.51.

8.35 Efforts de traction-compression dus au renversement

L'application en tête de mur de la poussée horizontale dans le plan des panneaux génère un moment de renversement (ou basculement) qui doit être vérifié.

Si l'importance du moment de renversement est telle que des forces de traction sont exercées sur un côté, il convient de :

- dimensionner des tirants d'ancrage pour reprendre ces efforts (cf. §8.33) ;
- vérifier les efforts de traction et de compression dans les panneaux ;
- vérifier les efforts de compression induits dans le support du panneau. La longueur lef,c de la zone de compression est calculée de la manière suivante :

$$l_{ef,c} = \frac{n_a \cdot R_{ax,d} + F_{d,vert}}{b_{ef} \cdot f_{c,x,d}}$$

où :

- na nombre de tirants d'ancrage ;
- Rax,d résistance à la traction du tirant d'ancrage ;
- Fd,vert force de dimensionnement verticale ;
- bef largeur effective de la section transversale du mur (= somme des épaisseurs des plis verticaux).

Avec :

- Md moment de renversement utilisé pour le calcul
- Lef longueur efficace du mur de contreventement ;
- lz bras de levier interne ;
- lax distance du tirant d'ancrage de l'extrémité du mur ;
- lef,c largeur de la zone de compression ;
- Kax rigidité des ressorts de l'ancrage (varie en fonction du tirant d'ancrage) ;
- Kc rigidité des ressorts de la zone de compression.

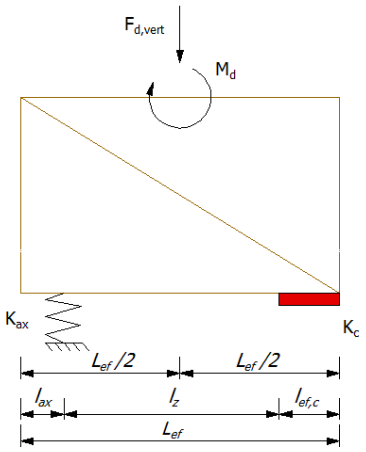


Figure 17 : Moment de renversement – Longueur de la zone de compression

8.4 Déformation des panneaux

La déformation des panneaux CLT est le résultat de 3 déformations.

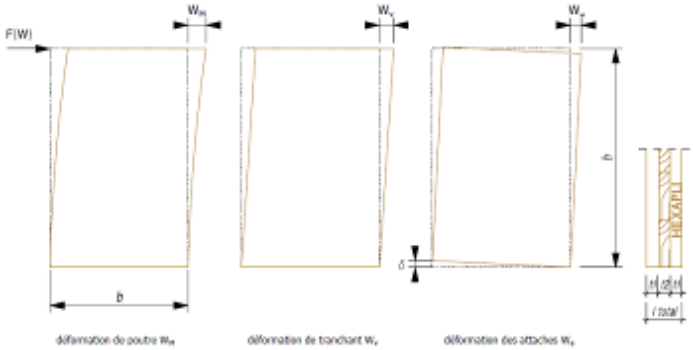


Figure 18 : Schématisation des 3 déformations dans un panneau CLT

Déformation de poutre $w_M = \frac{F.h^3}{3.E_{x,mean}.I_{ap}}$

Déformation de l'effort tranchant $w_v = \frac{F.h}{0.75.G_{yz,mean}.A}$

Déformation des attaches (raideur des attaches) $w_a = \frac{F.h^2}{b^2.k}$

Déformation totale horizontale $w_{hor} = w_M + w_v + w_a$

où :

- F effort en tête de mur, soit Wi
- Ex,mean module d'élasticité moyen dans le plan du panneau
- Iap Σtx x b3/12 (somme des inerties des plis verticaux)
- A aire totale du CLT, soit b x ltotal
- 0,75.Gyz,mean module de cisaillement dans le plan du panneau
- k raideur de l'attache (selon kser, glissement d'assemblage)
- δ déplacement vertical selon la raideur de l'attache

Les critères de flèches sont spécifiés au §6.43.

8.5 Vérification des linteaux

On distingue les configurations de linteaux suivantes :

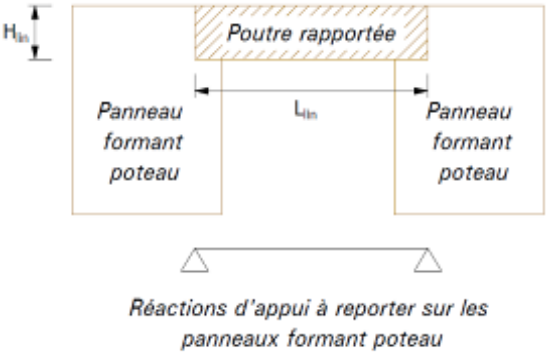
- les linteaux constitués de poutres rapportées en bois ou dérivés du bois ou d'autres matériaux et appuyés sur des entailles dans le panneau de mur ;
- les linteaux constitués de pièces rapportés de panneau structural massif bois et appuyés sur des entailles dans le panneau de mur ;
- les linteaux faisant partie intégrante du panneau (linteau résultant de la découpe de l'ouverture dans le panneau).

8.51 Linteaux constitués de poutres rapportées

Pour les linteaux constitués de poutres rapportées sollicités en flexion dans leur plan, il convient de vérifier la poutre sur appuis simples en configuration de flexion sur chant :

- en considérant la section homogène pour une poutre en bois ou dérivé du bois ;
- en considérant les plis horizontaux comme une section homogène en bois massif et en faisant abstraction des plis verticaux pour une pièce de panneau structural massif bois (qui peut être orientée dans un sens comme dans l'autre).

On procède aux vérifications aux ELU et aux ELS d'un élément fléchi à chant conformément à la NF EN 1995-1-1 et aux prescriptions du §6.



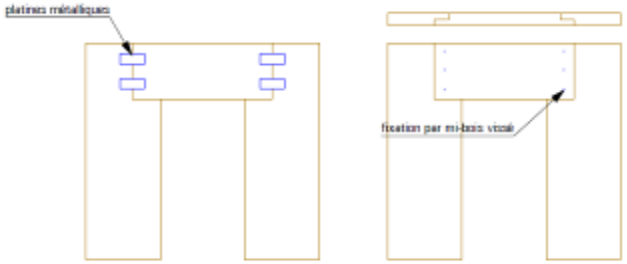


Figure 19 : Linteau constitué d'une poutre rapportée

On vérifie les contraintes de compression et le risque de flambement dans les parties d'éléments de mur formant poteau selon les dispositions des §8.21 et §8.22.

Pour une pièce rapportée de panneau structural massif bois formant linteau :

- on vérifie les contraintes de compression transversale sur appui selon les dispositions du §7.12;
- on s'assure que les plis horizontaux (travaillants) du linteau coïncident avec les plis verticaux (travaillants) du mur formant poteau.

8.52 Linteaux faisant partie intégrante du panneau

Pour un linteau faisant partie intégrante du panneau de mur, on le modélise :

- par une poutre encastrée à ses extrémités lorsque la hauteur du linteau est inférieure à la largeur des bandes de murs formant poteaux ;
- comme une poutre simplement appuyée (linteau constitué d'une pièce rapportée, cf. §8.51), dans le cas contraire.

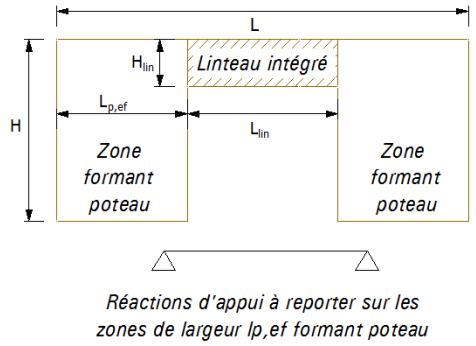


Figure 20 : Linteau faisant partie intégrante du panneau

Lorsque la condition d'encastrement est vérifiée, la réaction d'appui et le moment d'encastrement du linteau doivent être transmis à la paroi de mur par l'intermédiaire de la surface de collage. La réaction d'appui génère des contraintes de cisaillement verticales. Le moment de flexion génère des contraintes de cisaillement en torsion.

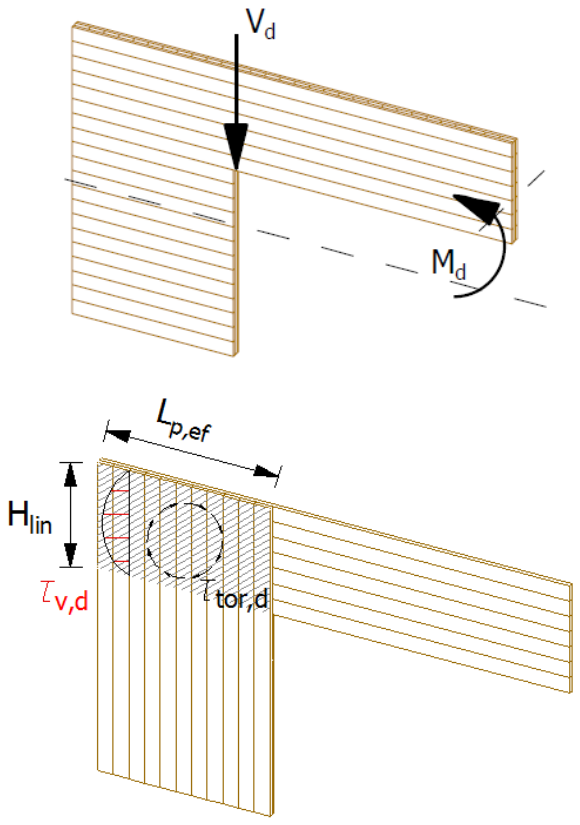


Figure 21 : Linteau faisant partie intégrante du panneau – Efforts transmis au panneau

On vérifie alors la contrainte de cisaillement totale :

$$\tau_{p,d} = \left(\frac{1{,}5.V_d}{A_{v,ef}} + \frac{M_d}{W_{p,ef}}\right).\frac{1}{n} \leq f_{v,tor,node,d}$$

où :

- n le nombre de plans de collage ;
- Vd l'effort tranchant à l'appui de linteau ;
- Md le moment d'encastrement ;
- Av,ef surface cisaillée par le linteau :
- $A_{v,ef} = L_{p,ef}.h_{lin}$
- Lp,ef longueur d'appui fictive du linteau dans le panneau ;
- Wp,ef l'inertie polaire du plan de collage :

$$W_{p,ef} = \frac{L_{p,ef}.{h_{lin}}^2 + {L_{p,ef}}^2.h_{lin}}{6}$$

On peut déterminer la longueur d'appui fictive en substituant $W_{p,ef}$ et $A_{v,ef}$ dans l'inéquation de vérification du cisaillement total transformée en égalité et en résolvant en $L_{p,ef}$ ($L_{p,ef}$ pour laquelle $\tau_{p,d} = f_{v,d}$).

$$L_{p,ef} = \frac{1}{4.f_{v,tor,node,d}.h_{lin}.n_a}.\left[3.V_d - 2.f_{v,tor,node,d}.{h_{lin}}^2.n_a + \sqrt{96.f_{v,tor,node,d}.h_{lin}.n_a.M_d + 9.{V_d}^2 + 12.f_{v,tor,node,d}.{h_{lin}}^2.n_a.V_d + 4.{f_{v,tor,node,d}}^2.h^4.n^2}\right]$$

On vérifie les contraintes de compression et le risque de flambement dans les parties d'éléments de mur formant poteau selon les dispositions des §8.21 et §8.22.

Dans le cas où un des poteaux n'est pas suffisamment large pour reprendre ces sollicitations (notamment le moment), on considère que le linteau est encastré d'un côté et appuyé de l'autre. C'est en général le cas en-dessous de 400mm.

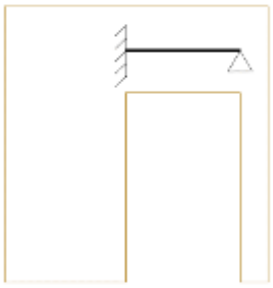


Figure 22 : Linteau faisant partie intégrante du panneau – appui sur mur étroit

8.6 Distribution des charges concentrées dans les éléments de mur

La distribution d'une charge concentrée d'une largeur d'application w peut être déterminée en calculant la largeur efficace $w_{ef(H/2)}$ à mi-hauteur et $w_{ef(H)}$ en pied de mur comme suit.

On distingue les configurations de charge concentrées suivantes, illustrés en Figure 23 :

(a) Charge concentrée à l'extrémité d'un mur

(b) Charge concentrée en plein mur

(c) Charges concentrées dont les largeurs efficaces respectives en pied de mur sont en recouvrement

(d) Charge concentrée sans distribution (w ≈ H)

(e) Charges concentrées en opposition en tête et pied de mur (transfert de charge) – en plein mur

(f) Charges concentrées en opposition en tête et pied de mur (transfert de charge) – à l'extrémité d'un mur

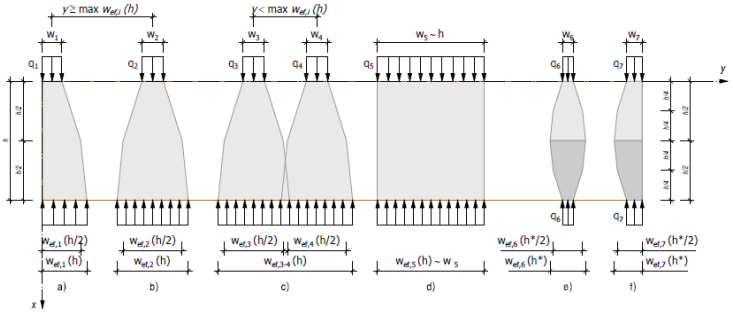


Figure 23 : Schéma des configurations de charges concentrées

De plus, la Figure 24 décrit les modalités de distribution des charges concentrées au droit des ouvertures.

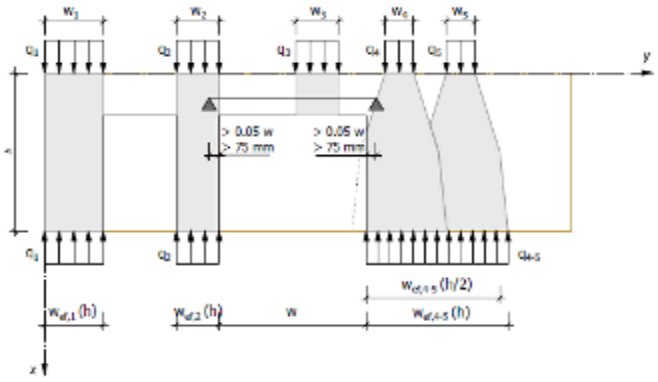


Figure 24 : Schéma des configurations de charges concentrées au droit des ouvertures

Pour une charge concentrée à l'extrémité d'un mur :

- La largeur efficace à mi-hauteur wef(H/2) peut être calculée de la manière suivante :

$$\boldsymbol{w_{ef(H/2)} = 0,90.w^*_{ef(H/2)}}$$

- La largeur efficace en pied de mur wef(H) peut être calculée de la manière suivante :

$$w_{ef(H)} = \min\begin{cases}(0{,}50.\xi^2 - 0{,}90.\xi + 1.30).w^*_{ef(H/2)}\\ 0{,}90.w^*_{ef(H/2)}\end{cases}$$

Pour une charge concentrée en plein mur :

- La largeur efficace à mi-hauteur wef(H/2) peut être calculée de la manière suivante :

$$w_{ef(H/2)} = 0{,}90.\xi^{0.25}.w^*_{ef(H/2)}$$

- La largeur efficace en pied de mur wef(H) peut être calculée de la manière suivante :

$$w_{ef(H)} = \min\begin{cases}(-0{,}45.\xi^2 + 0{,}85.\xi + 0.50).w^*_{ef(H/2)}\\ 0{,}90.\xi^{0.25}.w^*_{ef(H/2)}\end{cases}$$

où :

$$w^*_{ef(H/2)} = \frac{\frac{w}{2}.\pi.(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1.\tan^{-1}\left(\frac{w}{\lambda_2.H}\right) - \lambda_2.\tan^{-1}\left(\frac{w}{\lambda_1.H}\right)}$$

avec :

$$\lambda_1 = \sqrt{p^2 + \sqrt{p^4 - q^4}} \text{ et } \lambda_2 = \sqrt{p^2 - \sqrt{p^4 - q^4}}$$
$$\text{et} \quad \xi = w/h$$

où :

$$p = \sqrt{\frac{1}{2}.\frac{E_{x,mean}}{G_{xy,mean}}.\frac{t_x}{t_{xlam}}} \qquad \text{et} \qquad q = \sqrt[4]{\frac{t_x}{t_y}}$$

avec :

- Ex,mean module d'élasticité moyen du pli dans la direction x
- Gxy,mean module de cisaillement efficace dans le plan
- H hauteur du mur
- tx épaisseur du pli dans la direction x
- ty épaisseur du pli dans la direction y
- txlam épaisseur totale du mur
- w largeur d'application de la charge concentrée
- w*ef(H/2) largeur fictive à mi-hauteur
- wef(H/2) largeur efficace à mi-hauteur
- wef(H) largeur efficace en pied de mur

La contrainte sous charge concentrée qi peut alors être déterminée selon :

$$\sigma_{(H/2)} = \frac{w_i.q_i}{w_{ef(H/2),i}.t_{xlam}} \text{ et} \qquad \sigma_{(H)} = \frac{w_i.q_i}{w_{ef(H),i}.t_{xlam}}$$

9. Sismique

9.1 Principes généraux

L'étude sismique est effectuée selon la norme NF EN 1998-1-1 et son annexe nationale.

Les effets sismiques sur la structure sont déterminés par une analyse élastique linéaire, deux méthodes peuvent être utilisées :

- La méthode d'analyse par forces latérales de la norme NF EN 1998-1-1 (§4.3.3.2) - pour les bâtiments respectant les conditions indiquées dans ce même paragraphe, avec notamment les critères de régularité en plan et en élévation donnés en EN1998 -1-1 (§4.2.3).
- L'analyse modale utilisant les spectres de réponse de la norme NF EN 1998-1-1 (§4.3.3.3) - qui est applicable à tous les types de bâtiments.

Le bâtiment est ensuite dimensionné soit en suivant le principe de comportement de structure (§8.1.3) :

- soit dissipatif (classe de ductilité M) - DCM
- soit faiblement dissipatif (classe de ductilité L) – DCL.

Les coefficients de comportements utilisés sont q=2 pour la classe DCM et q=1,5 pour la classe DCL. (Tableau 8.1). Si le bâtiment est irrégulier en élévation (voir §4.2.3.3), il convient de réduire ces valeurs de 20 %, sans qu'il soit nécessaire de les prendre inférieures à q=1,5. (8.3).

Les coefficients de modification k_{mod} correspondant à une classe de durée de chargement instantanée sont appliqués.

Les coefficients de sécurité partiels des matériaux γ_M appliqués sont ceux relatifs aux combinaisons accidentelles d'actions (8.6).

Le coefficient partiel γ_M pris en compte dépend du principe de comportement de la structure :

- pour le comportement dissipatif (DCM) on peut appliquer γM=1,0.
- pour le comportement faiblement dissipatif (DCL) on conserve les coefficients relatifs aux combinaisons fondamentales ;
- Lorsqu'ils sont prévus en zone sismique, les panneaux utilisés en plancher doivent être organisés afin d'observer les points suivants :
- l'intégrité de la structure lors d'un séisme,
- la fonction tirant-buton horizontal, assurée uniquement par les plis orientés dans le sens de l'effort à reprendre. La valeur de l'effort tirant-buton doit être déterminée par une étude sismique spécifique. Cet effort sera pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes : 15 kN ou l'effort de tirant-buton déterminée par calcul,
- la fonction diaphragme horizontal avec justification des jonctions entre panneaux adjacents pour les efforts de cisaillement induits.

La justification des panneaux utilisés en murs de contreventement en zone sismique doit être effectuée en :

- menant les vérifications précisées dans les parties §6 et §8 du présent document ;
- réalisant la fixation des panneaux au soubassement béton :
  - soit par des tiges d'ancrage et/ou bêches, le dimensionnement étant réalisé selon les dispositions de la norme NF EN 1993-1-8 pour les boulons d'ancrage tendus ;
  - soit par des chevilles bénéficiant d'une ETE visant une utilisation en béton fissuré et sous sollicitation sismique (catégorie C2), le dimensionnement tenant compte des dispositions spécifiques de l'ETE pour cet usage ; on considère en outre un diagramme d'interaction linéaire pour justifier les chevilles sous charges combinées de traction et de cisaillement.

NOTE : Il est fréquent que l'ETE de la cheville limite la capacité résistante en cisaillement de ces chevilles à la moitié de celle indiquée sous sollicitation statique.

9.2 Principe de dimensionnement en comportement de structure faiblement dissipatif (DCL)

En zone sismique, les différents organes d'assemblages doivent dissiper l'énergie et conférer de la ductilité à la structure, à l'exception des ancrages. Ainsi, la rupture doit être orientée dans ces organes et non pas dans les panneaux dont la rupture en cisaillement est considérée fragile.

Ces organes jouent alors le rôle de dissipateur de la structure. La conception des assemblages est réalisée suivant les prescriptions de la norme NF EN 1995-1-1 et son amendement A1. Il convient de s'assurer que le mode de rupture obtenu est celui de la plastification de l'organe d'assemblage.

En outre, les ancrages devront avoir une résistance et une raideur grandes devant celles des autres assemblages pour garantir un bon comportement dissipatif de la structure. Le dimensionnement des ancrages au soubassement béton réalisé en multipliant les actions par 4/3 satisfait à cet objectif.

NOTE : Ce coefficient (4/3) correspond au coefficient retenu dans les recommandations de la CNC2M concernant la justification des ouvrages en classe de ductilité DCL et DCL+.

9.3 Principe de dimensionnement en comportement de structure dissipatif (DCM)

La conception de l'ouvrage suivant le principe de comportement de structure dissipatif (DCM) impose de porter la plus grande attention à la conception des assemblages (vis de liaison, équerres, ancrages, etc.…) au regard des efforts de cisaillement engendrés par l'action sismique. A ce titre, il convient :

- de hiérarchiser les zones de rupture dans les organes d'assemblage des panneaux en vérifiant la résistance suffisante des panneaux dont la rupture en cisaillement est considérée fragile ;
- d'exploiter la source de ductilité des organes d'assemblage des ancrages et équerres, la justification de la capacité résistante étant menée suivant les principes la norme NF EN 1995-1-1 en s'assurant que le mode de rupture obtenu est celui de la plastification de l'organe d'assemblage ; les organes de fixation de type broches ne sont pas admis sans disposition complémentaire s'opposant à leur arrachement ; les pointes lisses ne sont pas admises ;
- de s'assurer que les connecteurs tridimensionnels mis en œuvre satisfassent les critères fixés pour la classe de ductilité M au §8.3(3)P de la norme NF EN 1998-1-1 :
    - l'AT ou l'ETE précise leur comportement sous sollicitation cyclique, lorsqu'ils relèvent de ce type d'évaluation au sens du §2.3.3.1 ;
    - En classe DCM, les connecteurs mécano-soudés peuvent être utilisés uniquement pour l'assemblage des panneaux ne participant pas à la transmission des efforts sismiques.
- de s'assurer que le dimensionnement des ancrages de panneaux sera réalisé en appliquant les principes du dimensionnement en capacité de la norme NF EN 1998-1 en considérant un coefficient de sur-résistance pour l'ancrage γ_{rd} = 1,3 pour les murs formés d'un seul panneau continu et γ_{rd} = 1,6 pour les murs formés de plusieurs panneaux assemblés par des vis.

Ces dispositions s'appliquent également aux liaisons entre diaphragmes horizontaux et diaphragmes verticaux.

NOTE : Il résulte de ce qui précède que les seules zones de dissipation à considérer se situent au niveau des liaisons autres que les ancrages et les liaisons externes entre diaphragmes verticaux et horizontaux.

9.4 Exemples de solutions constructives

Les dispositions constructives proposées ci-après sont destinées à assurer le transfert des efforts du niveau supérieur au niveau inférieur. Le présent document fait l'hypothèse d'une séparation des rôles entre :

- les équerres destinées à reprendre les efforts de cisaillement et à les transférer au plancher ;
- les ancrages ou les plaques destinés à reprendre les efforts de soulèvement.
- Le soulèvement est généralement le point critique amenant la ruine. Les meilleures performances (résistance et ductilité) sont obtenues en assurant un transfert vertical très performant et en dimensionnant les équerres de manière à obtenir la plastification au niveau des vis sous effort horizontal.

Les trois exemples ci-après sont envisageables pour reprendre les efforts verticaux :

- L'utilisation d'une plaque continue en façade ;
- la plaque en façade peut être complétée par des ancrages côté intérieur ;
- des ancrages seuls peuvent être utilisés lorsqu'ils sont reliés verticalement.

Les équerres doivent être suffisamment nombreuses pour reprendre la totalité des efforts de cisaillement en pied de paroi verticale ainsi que les efforts provenant du diaphragme s'il y a lieu. Il est nécessaire d'utiliser un minimum de deux équerres avec 6 vis chacune pour chaque panneau quel que soit sa longueur afin d'assurer la ductilité d'ensemble. Les équerres et ancrages doivent être dimensionnés de manière à ce que la rupture se produise en premier lieu dans les vis des parties verticales des connecteurs. Le mode de rupture des vis doit également être ductile.

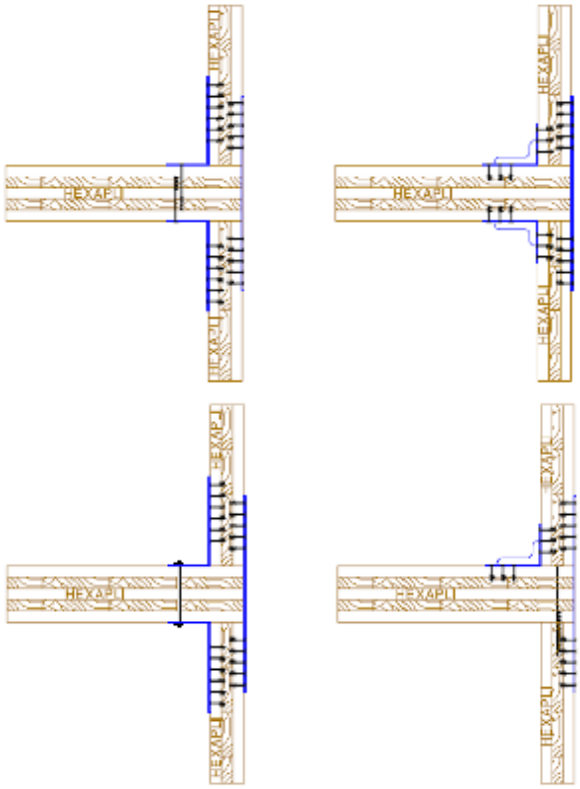


Figure 25 : Dispositions constructives assurant le transfert des efforts du niveau supérieur au niveau inférieur

10. Sécurité incendie

10.1 Résistance et réaction au feu

La résistance ainsi que la réaction au feu des panneaux HEXAPLI font l'objet de l'appréciation de laboratoire AL17-212 réalisée par le CSTB.

10.11 Réaction au feu

La réaction au feu est exprimée selon les Euroclasses définies dans la norme NF EN 13501-1. Les panneaux HEXAPLI bénéficient d'un classement conventionnel D-s2, d0.

Des produits bénéficiant de PV de classement en réaction au feu sur des supports bois et permettant d'améliorer la réaction au feu du panneau HEXAPLI peuvent être appliqués.

10.2 Propagation du feu aux façades

Conformément à l'arrêté du 24 mai 2010, et dans les limites d'application de celui-ci, les dispositions constructives permettant à la façade de participer à l'indice C+D (écran thermique, jonction façade/plancher) ainsi que les dispositions visant à limiter le risque de propagation du feu en façade sont déterminées par application des dispositions de l'Instruction Technique 249, précisée et complétée par le guide « Bois construction et propagation du feu par les façades » rédigé en application de l'Instruction Technique 249 (qui a valeur d'appréciation de laboratoire).

Il est possible d'optimiser ou bien de justifier des solutions de façade bois non décrites dans le présent document. Ces solutions pourront faire l'objet d'une Appréciation de laboratoire sur le risque de propagation du feu par la façade dans les conditions fixées au chapitre 5.3 de l'Instruction Technique n°249.

11. Acoustique

11.1 Exigences

Les réglementations acoustiques françaises sont des réglementations de résultat et non de moyens, ce n'est donc pas la performance propre des produits ou des systèmes qui est visée, mais la performance globale du bâtiment évaluée in situ. Par conséquent la satisfaction à ces exigences nécessite une analyse et une conception globale au niveau de l'ouvrage, prenant en compte non seulement la performance des parois, mais aussi les détails de réalisation des points singuliers et les transmissions latérales.

Les panneaux HEXAPLI sont utilisés soit en plancher (intermédiaire ou haut), soit en mur séparatif ou en façade, la contrainte acoustique porte donc sur l'isolement aux bruits aériens et/ou sur le niveau des bruits de choc.

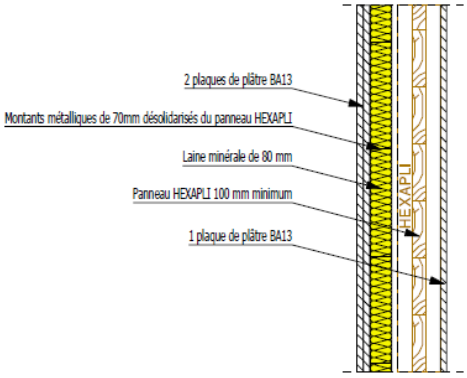
11.2 Exemples de solutions

Les panneaux HEXAPLI seuls, qu'ils soient utilisés en tant que murs ou planchers, ne permettent pas toujours de satisfaire les exigences en vigueur en matière d'isolation acoustique entre logements dans les bâtiments d'habitation. L'atteinte des critères d'isolation fixés par la réglementation nécessite parfois la mise en œuvre de matériaux d'isolation acoustique ou d'ouvrages complémentaires par exemple un plafond suspendu, et/ou une chape désolidarisée en plancher, ou un doublage isolé sur une ou deux faces en mur.

Des exemples de solutions sont proposés ci-dessous :

Exemples de solutions acoustiques		
Parois verticales intérieures		Doublage en plaques de plâtres sur tasseaux bois directement fixé au support ou sur ossature métallique avec matériau isolant
Façade	Intérieur	Système de doublage similaire à celui d'une paroi
	Extérieur	Isolation thermique par l'extérieur
Planchers	Plancher	Revêtement de sol comprenant ou pas un système flottant (sec ou fluide) Ragréage gravier Chape béton désolidarisée
	Plafond	Plaques de plâtres suspendues avec matériau isolant
Mur/plancher	Murs filants	Les différents éléments sont vissés entre eux et la liaison est renforcée par des équerres d'assemblage. Des joints peuvent être utilisés entre les différents éléments.
	Planchers filants	

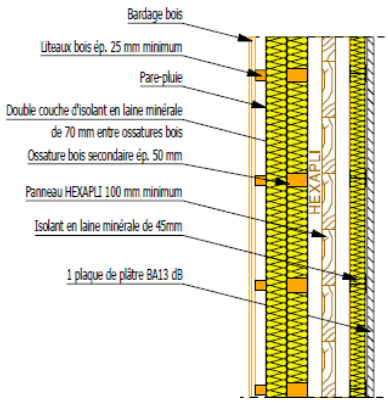
Des performances de complexes issues de l'étude ACOUBOIS « Méthodes simplifiée et exemples de solutions acoustiques » V2.0 de juin 2014 sont données dans les Figure 26, Figure 27 et Figure 28



Coupe verticale sur mur séparatif

$R_w(C;C_{tr})$ = 62(-3;-10) dB
$R_w+C_{50\text{-}3150}$ = 51 dB
(valeurs selon étude ACOUBOIS : respect des exigences acoustiques dans les bâtiments d'habitation à ossature bois)

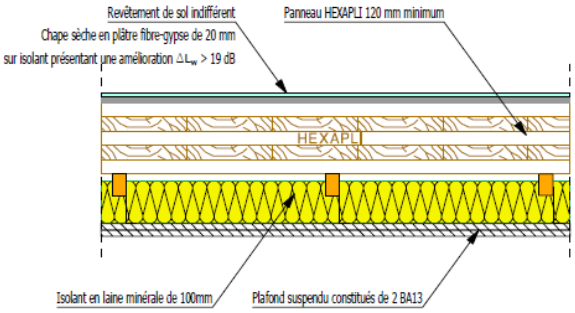
Figure 26 : Coupe verticale sur mur séparatif



Coupe verticale sur mur de façade

$R_w(C;C_{tr})$ = 58(-7;-15) dB
$R_w+C_{tr50\text{-}3150}$ = 37 dB
(valeurs selon étude ACOUBOIS : respect des exigences acoustiques dans les bâtiments d'habitation à ossature bois)

Figure 27 : Coupe verticale sur mur de façade



Coupe horizontale sur plancher séparatif

$R_w(C;C_{tr})$ = 64(-3;-10) dB
$R_w+C_{50\text{-}3150}$ = 57 dB
$L_{n,w}$ = 51 dB
(valeurs selon étude ACOUBOIS : respect des exigences acoustiques dans les bâtiments d'habitation à ossature bois)

Figure 28 : Coupe horizontale sur plancher séparatif

11.3 Fréquence de résonance

Dans le cas d'un plancher, on s'assurera en outre que la fréquence de résonance de la paroi est inférieure à 60 Hz.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{K\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)}$$

avec :

- f0 = la fréquence de résonance en Hz,
- m1 = la masse, en kilogramme, d'un mètre carré de plancher brut,
- m2 = la masse, en kilogramme, d'un mètre carré de plafond rapporté,
- K = le coefficient de raideur dynamique du dispositif de suspension du plafond ; il s'exprime en N/m et il correspond au rapport de la force, en N, à appliquer, au déplacement qui en résulte pour le dispositif de suspension, déplacement exprimé en mètres (m).

Ce coefficient K doit être rapporté à 1 m² de plancher. Dans le cas particulier d'utilisation de suspentes très courtes et rigides, réalisées en fers plats fixés sur les faces latérales des poutres en bois (voir DTU 25.41 « Ouvrages en plaques de parement en plâtre »), on ne peut pas connaître avec précision le coefficient de raideur dynamique K, ni de ce fait, la fréquence de résonance f_0. Dans ce cas, seul un essai permet de déterminer l'indice d'affaiblissement acoustique de l'ensemble planché et plafond suspendu rapporté.

12. Isolation thermique

12.1 Calcul des coefficients de transmission thermique surfacique des parois

Les panneaux HEXAPLI, peuvent nécessiter, selon leur emplacement dans l'ouvrage, la mise en œuvre d'une isolation thermique complémentaire. Les coefficients de transmissions thermiques des parois sont évalués comme ceci :

Coefficient de transmission thermique surfacique des parois HEXAPLI		
Parois verticales extérieures	Isolation extérieure	$Up = \frac{1}{0,26+\frac{e_{CLT}}{0,13}+R_{isolant}} + \frac{\Psi_{chev}}{E_{chev}} + \frac{\chi_{patte}}{E_{patte} x E_{chev}}$
	Isolation intérieure	$Up = \frac{1}{0,26+\frac{e_{CLT}}{0,13}+R_{isolant}} + \frac{\Psi_{montant}}{E_{montant}} \frac{L_{fract}\Psi_{fract}}{A_p}$
	Isolation mixte	$Up = \frac{1}{0,26+\frac{e_{CLT}}{0,13}+R_{isolant}} + \frac{\Psi_{chev}}{E_{chev}} + \frac{\Psi_{montant}}{E_{montant}} \frac{L_{fract}\Psi_{fract}}{A_p} + \frac{\chi_{patte}}{E_{patte} x E_{chev}}$
Parois horizontales	Planchers bas sur vide sanitaire isolé sous chape	$Up = \frac{1}{0,37+\frac{e_{CLT}}{0,13}+R_{isolant}}$
	Planchers bas sur vide sanitaire isolé en sous face	$Up = \frac{1}{0,37+\frac{e_{CLT}}{0,13}+R_{isolant}} + \left(\frac{1}{l}+\frac{1}{L}\right)\Psi_j + n_f\chi_f$

où :

- Risolant : résistance thermique utile de l'isolant, en m².K/W

- eCLT : épaisseur du panneau CLT, en m
- ψchev : coefficient de transmission thermique linéique du pont thermique dû aux chevrons support de bardage
- Echev : entraxe entre chevrons support de bardage, en m
- ψmontant : coefficient de transmission thermique linéique du pont thermique dû aux montants d'ossature de l'isolation intérieure
- Emontant : entraxe entre montants d'ossature de l'isolation intérieure, en m
- ψfract : coefficient de transmission thermique linéique du pont thermique dû au dispositif de fractionnement de la lame d'air
- Lfract : linéaire total du dispositif de fractionnement de la lame d'air, en m
- Ap : surface totale de la paroi, en m²
- χpatte : coefficient de transmission thermique ponctuel du pont thermique dû à la patte de fixation du bardage
- Epatte : entraxe moyen entre pattes de fixation sur un chevron de bardage, en m
- l : largeur des panneaux isolants utilisés, en m
- L : longueur des panneaux isolants utilisés, en m
- ψj : coefficient de transmission thermique linéique du pont thermique dû aux joints entre panneaux isolants
- nf : densité de fixations par m²
- χf : coefficient de transmission thermique ponctuel du pont thermique dû aux fixations métalliques

13. Constituants des complexes

13.1 Étanchéité à l'eau

Les panneaux HEXAPLI eux-mêmes ne sont pas destinés à jouer un rôle seul vis-à-vis de l'étanchéité à l'eau. Les parois exposées au climat extérieur doivent donc obligatoirement être revêtues.

13.2 Plis de parements

Des plis de parement à base de bois (éventuellement d'une autre essence) peuvent être rapportés sur les panneaux HEXAPLI pour fournir un aspect visuel particulier.

Ces plis ne sont pas destinés à assurer un rôle structurel.

Lorsque nécessaire, pour prévenir tout impact sur la symétrie géométrique et/ou mécanique du panneau, ces plis sont mis en œuvre par le biais d'une ossature secondaire sur la surface des panneaux HEXAPLI.

13.3 Pare vapeur

Concernant les murs extérieurs, un pare vapeur sera systématiquement mis en œuvre sur la face du Panneau CLT exposée au climat intérieur (entre le panneau CLT et l'ouvrage en plaque de plâtre). La valeur de Sd du pare-vapeur sera au minimum de 18m lorsque le revêtement extérieur est ventilé et de 90m le cas contraire.

13.4 Bardages rapportés

Un revêtement extérieur conforme au NF DTU 41.2 peut être mis en œuvre sur parois en panneaux HEXAPLI dans le respect des dispositions du NF DTU 31.2. Compte-tenu de la nature massive du support (épaisseur pleine et continue de mini 60 mm), l'ossature du bardage peut être fixée selon un calepinage dépendant uniquement de ce dernier (contrairement à un système sur COB pour lesquelles fixations doivent être localisées au droit des montants de l'ossature.)

13.5 Autres revêtements extérieurs

Le panneau HEXAPLI permet par ailleurs la mise en œuvre de vêture, vêtage ou système d'isolation thermique par enduit sur isolant (ETICS). La mise en œuvre sera alors conforme à l'évaluation technique du revêtement extérieur.

14. Mise en œuvre

14.1 Plans de pose et d'exécution

La pose et l'exécution des panneaux HEXAPLI font l'objet de plans et de documents suffisants pour définir entièrement les dispositions des ouvrages à réaliser, et portent la marque commerciale du procédé, l'identification du site de fabrication et les références à l'AT.

Figurent notamment sur ces plans et documents :

- Les hypothèses de charge appliquées sur l'ouvrage concerné ;
- La définition des panneaux HEXAPLI spécifiées (type, dimensions, etc.) ;
- La définition des autres éléments de structure prépondérants (connecteurs, accessoires et/ou renforts divers, …) ;
- Le repérage des panneaux HEXAPLI et celui de leur implantation par rapport à la structure ;
- Les dispositions à respecter pour les appuis, assemblages, détails de pose spécifiques ;
- Le cas échéant, les dispositions complémentaires et leurs justifications permettant d'assurer les fonctions de diaphragme ou de stabilité (provisoire et définitive) de l'ouvrage ;
- Les conditions de stockage et de manutention ;
- Les indications que le présent AT font obligation de faire figurer sur les documents de pose et d'exécution.

Ces éléments figurent sur le « plan de pose ». Celui-ci est établi soit par un bureau d'études, soit par le fabricant, soit par une entreprise disposant d'un bureau d'études qualifié. Dans ce dernier cas, les indications doivent être complétées par le bureau d'études chargé de l'étude d'exécution du bâtiment en ce qui concerne les interfaces avec les autres parties de l'ouvrage.

14.2 Sécurité

D'une manière générale, et quelle que soit la fonction des panneaux dans l'ouvrage, la mise en œuvre de ceux-ci impose les dispositions usuelles relatives à la sécurité des personnes contre les chutes de hauteur.

La sécurité du travail sur chantier peut être normalement assurée, moyennant les précautions habituelles à prendre pour la manutention d'éléments préfabriqués de grandes dimensions. Compte tenu des grandes surfaces de prise au vent et de la légèreté des éléments HEXAPLI, une attention particulière doit être apportée à la vitesse du vent lors du levage.

14.3 Livraison

Les panneaux seront généralement livrés directement sur chantier, en juste à temps, par transport routier prêts à grutés. Les panneaux de murs sont usuellement transportés en position verticale avec chevalet et les panneaux de planchers en position horizontale. Le taux d'humidité moyen des panneaux sortant d'usine est de 12 % environ. L'entreprise en charge des travaux doit prendre les dispositions nécessaires sur chantier afin de prévenir des reprises d'humidité trop importantes avant la mise hors d'eau du bâtiment. En cas de stockage sur chantier, il doit être effectué sur une aire plane et stable prévue par la maitrise d'œuvre. Les panneaux ne doivent pas être en contact direct avec le sol, le stockage doit permettre la circulation de l'air et éviter la condensation, et les panneaux doivent être protégés contre la salissure et les risques de réhumidification. Pour les panneaux de qualité visible, une protection contre les U.V. et les salissures peut s'avérer nécessaire.

14.4 Réception

Avant le levage des panneaux structuraux massifs bois pour leur positionnement dans l'ouvrage, il convient de :

- vérifier les tolérances d'exécution du support, le cas échéant corrigées par calage (voir notamment les dispositions du §5.46 et du §5.47);
- vérifier les éléments clés du protocole de montage, notamment la visibilité du poids des panneaux, les points de levage et la capacité des moyens de levage ;
- s'assurer de la présence et de la bonne disposition des éléments participant à l'étanchéité à l'eau (provisoire et/ou définitive) et à l'air entre le support et les panneaux.

14.5 Levage

Les points d'attache sont conçus et dimensionnés par le concepteur et/ou Piveteau Bois. Pour le levage, les murs sont généralement munis de deux points d'ancrage tandis que les planchers en ont quatre. La conception prend notamment en compte le poids de chaque élément, le transport (position, orientation, etc.) et les contraintes de levage de l'entreprise de pose. Toute la chaine de manutention doit être dimensionnée de sorte de supporter les charges induites par les panneaux HEXAPLI.

Les points de levage peuvent être des sangles, des crochets, des plaques ou tout autre moyen d'attache permettant d'assurer la sécurité nécessaire lors de la manutention. Les modes de manutention prévus ainsi que les points de levage sont précisés et sont clairement identifiables pour chaque panneau livré sur chantier ainsi que sur les plans, ils doivent être respectés sur le chantier.

Les contraintes provoquées par le levage peuvent être supérieures à celles subies par l'élément en service dans l'ouvrage. Une attention particulière sera accordée aux éléments comprenant des ouvertures, elles peuvent au besoin être renforcées par le biais d'entretoises pour renforcer le panneau lors du levage (bandes de panneaux lamellé croisé conservées pour le levage et découpées par la suite ou pièces de bois rapportées), renforts à dimensionner en fonction des efforts induits par le levage.

14.6 Phase provisoire

Lors des phases provisoires, et tant que l'ensemble des éléments nécessaires au contreventement définitif de l'ouvrage ne sont pas mis en œuvre, la stabilité des panneaux, en position verticale ou horizontale, doit être assurée au moyen d'un étaiement garantissant la stabilité particulière de chaque élément et la stabilité générale du bâtiment en cours de construction.

L'entreprise en charge des travaux doit aussi prendre les dispositions nécessaires sur chantier afin de prévenir des reprises d'humidité trop importantes après la pose, en attendant la mise hors d'eau de la structure. Il convient également de veiller à protéger les points singuliers. Pour les murs, les points singuliers à protéger sont les parties horizontales telles que les têtes de mur et les têtes d'allège. Pour les planchers, il convient de protéger les nez de dalle et de disposer une étanchéité provisoire qui couvre la surface des planchers. Il convient également de chasser toute stagnation d'eau.

B. Résultats expérimentaux

- Essais de délamination des joints de collage – FCBA – n°403/17/7773 - n°403/17/7773/1 et n°403/17/7773/2.
- Essais de flexion 4 points sur lamelles et panneaux HEXAPLI – FCBA – Rapport d'essai n° 403-17-7773-3 / 403-17-7773-4 / 403-17-7773-5 / 403-17-7773-6 avec rapport d'interprétation.
- Appréciation de laboratoire AL 17-212 du CSTB.

C. Références

C1. Données Environnementales

Le procédé HEXAPLI ne fait pas l'objet d'une Déclaration Environnementale (DE). Ils ne peuvent donc revendiquer aucune performance environnementale particulière.

Les données issues des DE ont notamment pour objet de servir au calcul des impacts environnementaux des ouvrages dans lesquels les procédés visés sont susceptibles d'être intégrés.

C2. Autres références

Bâtiment de bureaux R+2 à Sainte Florence (85) – Utilisation des panneaux en murs et planchers avec fonction de contreventement. BET entreprise LCA

Tableaux et figures du Dossier Technique

Tableau 1 : Propriétés mécaniques des couches des panneaux HEXAPLI

Caractéristiques mécaniques des couches en N/mm²		
	C18	**C24**
$f_{m,x,k}$ $f_{m,y,k}$	18	24
$f_{m,edge,x,k}$ $f_{m,edge,y,k}$	17	20,5
$f_{t,x,k}$ $f_{t,y,k}$	10	14,5
$f_{t,z,k}$	0,4	
$f_{c,x,k}$ $f_{c,y,k}$	18	21
$f_{c,z,k}$	3	
$f_{v,k}$	3,4	4
$f_{r,k}$	Lamelles avec élancement ≥ 4 : 1,1 Sinon : 0,7	
$f_{v,xy,net,k}$ $f_{v,yx,net,k}$	5	
$f_{v,xy,gross,k}$ $f_{v,yx,gross,k}$	3,5	
$f_{v,tor,node,k}$	2,5	
$E_{x,mean}$ $E_{y,mean}$	9000	Epicéa : 11000 Pin : 12000 Douglas : 13000
$E_{z,mean}$	300	370
$G_{xz,mean}$ $G_{yz,mean}$	560	690
$G_{xy,mean}$ $G_{yx,mean}$ $G_{tor,mean}$	$max\begin{cases}\frac{650}{1+2,6\cdot(\frac{t_l}{b_l})^{1,2}} \ (1)\\ 450\end{cases}$	
$G_{r,mean}$	50	
ρ_k	$1,1\ \rho_{lay,k}$	
ρ_{mean}	$\rho_{lay,mean}$	

(1) t_l épaisseur des lamelles et b_l largeur des lamelles

Tableau 2 - Caractéristiques géométriques des panneaux HEXAPLI DG1 (DOGLASx:C24/y:C18)

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction x - sens parallèle aux plis extérieurs - Essence : DOUGLAS																		
réf panneau: DG1		$E_{x,mean}$ = 13000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm				
		G_{mean} = 690 N/mm²																
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{x,net}$ [cm²]	$I_{x,net}$ [cm⁴]	$W_{x,net}$ [cm³]	$i_{x,net}$ [cm]	$I_{x,ef}$ [cm⁴] Portées			
															2 m	4 m	6 m	8 m
3	60	20	20	20							400	1733	578	2,08	1551	1684	1711	1721
	80	30	20	30							600	4200	1050	2,65	3595	4028	4121	4155
	90	30	30	30							600	5850	1300	3,12	4640	5487	5682	5754
	100	30	40	30							600	7800	1560	3,61	5757	7155	7499	7627
	120	40	40	40							800	13867	2311	4,16	9525	12411	13176	13469
5	100	20	20	20	20	20					600	6600	1320	3,32	5293	6214	6423	6499
	120	20	30	20	30	20					600	10200	1700	4,12	7421	9322	9790	9965
	140	40	20	20	20	40					1000	21133	3019	4,60	14350	18859	20054	20512
	160	40	20	40	20	40					1200	30400	3800	5,03	20632	27125	28846	29505
	180	40	30	40	30	40					1200	40800	4533	5,83	23749	34473	37711	39001
	200	40	40	40	40	40					1200	52800	5280	6,63	26866	42345	47558	49713
5L2	160	60	40	60							1200	33600	4200	5,29	20551	28758	31236	32223
	180	70	40	70							1400	48067	5341	5,86	28028	40301	44224	45816
	200	80	40	80							1600	66133	6613	6,43	36958	54371	60237	62661
7	180	30	30	20	20	20	30	30			1000	35933	3993	5,99	20157	30004	33027	34238
	200	20	40	20	40	20	40	20			800	36267	3627	6,73	19516	29824	33086	34405
	220	30	30	30	40	30	30	30			1200	62400	5673	7,21	29723	48757	55476	58302
	240	40	30	30	40	30	30	40			1400	88867	7406	7,97	37282	65617	76727	81593
	260	40	40	30	40	30	40	40			1400	105667	8128	8,69	40381	74809	89242	95741
	280	40	40	40	40	40	40	40			1600	130133	9295	9,02	48902	91293	109358	117551
7L2	220	60	30	40	30	60					1600	80933	7358	7,11	39776	63729	72200	75764
	240	80	20	40	20	80					2000	111467	9289	7,47	59599	90556	100984	105293
	260	80	30	40	30	80					2000	138667	10667	8,33	60097	102646	119734	127290
	280	80	40	40	40	80					2000	169067	12076	9,19	61476	114801	139349	150872
8L2	300	80	30	80	30	80					2400	206400	13760	9,27	89031	152592	178118	189405
	320	80	40	80	40	80					2400	243200	15200	10,07	88270	165058	200407	217000
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1800	162600	10840	9,50	58088	111429	134947	145773
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	2000	198667	12417	9,97	68363	133419	163045	176888
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	2000	221867	13051	10,53	71269	144077	178784	195348
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	2000	258667	14370	11,37	73018	156439	200193	222101

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction y - sens perpendiculaire aux plis extérieurs - Essence : DOUGLAS																		
réf panneau: DG1		$E_{y,mean}$ = 9000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm				
		G_{mean} = 690 N/mm²																
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{y,net}$ [cm²]	$I_{y,net}$ [cm⁴]	$W_{y,net}$ [cm³]	$i_{y,net}$ [cm]	$I_{y,ef}$ [cm⁴] Portées			
															1 m	2,75 m	2,95 m	3,50 m
3	60	20	20	20							200	67	67	0,58				
	80	30	20	30							200	67	67	0,58				
	90	30	30	30							300	225	150	0,87				
	100	30	40	30							400	533	267	1,15				
	120	40	40	40							400	533	267	1,15				
5	100	20	20	20	20	20					400	1733	578	2,08	1314	1662	1671	1688
	120	20	30	20	30	20					600	4200	1050	2,65	2896	3953	3984	4044
	140	40	20	20	20	40					400	1733	578	2,08	1314	1662	1671	1688
	160	40	20	40	20	40					400	3733	933	3,06	2238	3424	3462	3536
	180	40	30	40	30	40					600	7800	1560	3,61	4008	6892	6998	7212
	200	40	40	40	40	40					800	13867	2311	4,16	6353	11842	12070	12536
5L2	160	60	40	60							400	533	67	1,15				
	180	70	40	70							400	533	59	1,15				
	200	80	40	80							400	533	53	1,15				
7	180	30	30	20	20	20	30	30			800	12667	2111	3,98	6398	11166	11341	11694
	200	20	40	20	40	20	40	20			1200	30400	3800	5,03	13495	25844	26357	27406
	220	30	30	30	40	30	30	30			1000	26333	3292	5,13	10738	21909	22399	23407
	240	40	30	30	40	30	30	40			1000	26333	3292	5,13	10738	21909	22399	23407
	260	40	40	30	40	30	40	40			1200	40800	4533	5,83	14117	32180	33087	34989
	280	40	40	40	40	40	40	40			1200	52800	5280	6,63	14925	38813	40194	43157
7L2	220	60	30	40	30	60					600	7800	709	3,61	4008	6892	6998	7212
	240	80	20	40	20	80					400	3733	311	3,06	2238	3424	3462	3536
	260	80	30	40	30	80					600	7800	600	3,61	4008	6892	6998	7212
	280	80	40	40	40	80					800	13867	990	4,16	6353	11842	12070	12536
8L2	300	80	30	80	30	80					600	18600	1240	5,57	6245	14609	15029	15910
	320	80	40	80	40	80					800	29867	1867	6,11	8562	21999	22776	24443
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1200	62400	5673	7,21	15861	44297	46032	49793
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	1200	74400	6200	7,87	16891	50613	52811	57632
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	1400	105667	8128	8,69	20002	65950	69334	76947
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	1600	130133	9295	9,02	24246	80292	84486	93958

Tableau 3 - Caractéristiques géométriques des panneaux HEXAPLI PI1 (PIN x:C24/y:C18)

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction x - sens parallèle aux plis extérieurs - Essence : PIN																		
réf panneau: PI1		$E_{x,mean}$ = 12000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm				
		G_{mean} = 690 N/mm²																
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{x,net}$ [cm²]	$I_{x,net}$ [cm⁴]	$W_{x,net}$ [cm³]	$i_{x,net}$ [cm]	$I_{x,ef}$ [cm⁴] Portées			
															2 m	4 m	6 m	8 m
3	60	20	20	20							400	1733	578	2,08	1564	1687	1713	1722
	80	30	20	30							600	4200	1050	2,65	3634	4041	4127	4159
	90	30	30	30							600	5850	1300	3,12	4714	5513	5695	5762
	100	30	40	30							600	7800	1560	3,61	5873	7200	7521	7640
	120	40	40	40							800	13867	2311	4,16	9752	12511	13227	13499
5	100	20	20	20	20	20					600	6600	1320	3,32	5374	6242	6436	6507
	120	20	30	20	30	20					600	10200	1700	4,12	7578	9384	9820	9983
	140	40	20	20	20	40					1000	21133	3019	4,60	14704	19015	20133	20558
	160	40	20	40	20	40					1200	30400	3800	5,03	21142	27350	28960	29572
	180	40	30	40	30	40					1200	40800	4533	5,83	24516	34887	37931	39133
	200	40	40	40	40	40					1200	52800	5280	6,63	27890	42995	47923	49938
5L2	160	60	40	60							1200	33600	4200	5,29	21138	29074	31405	32324
	180	70	40	70							1400	48067	5341	5,86	28871	40796	44495	45980
	200	80	40	80							1600	66133	6613	6,43	38110	55102	60647	62913
7	180	30	30	20	20	20	30	30			1000	35933	3993	5,99	20852	30389	33234	34362
	200	20	40	20	40	20	40	20			800	36267	3627	6,73	20229	30237	33311	34542
	220	30	30	30	40	30	30	30			1200	62400	5673	7,21	30943	49586	55952	58597
	240	40	30	30	40	30	30	40			1400	88867	7406	7,97	38973	66954	77539	82109
	260	40	40	30	40	30	40	40			1400	105667	8128	8,69	42344	76517	90319	96437
	280	40	40	40	40	40	40	40			1600	130133	9295	9,02	51294	93421	110713	118430
7L2	220	60	30	40	30	60					1600	80933	7358	7,11	41308	64774	72801	76136
	240	80	20	40	20	80					2000	111467	9289	7,47	61647	91856	101713	105742
	260	80	30	40	30	80					2000	138667	10667	8,33	62593	104691	120992	128094
	280	80	40	40	40	80					2000	169067	12076	9,19	64335	117634	141238	152124
8L2	300	80	30	80	30	80					2400	206400	13760	9,27	92760	155646	179997	190606
	320	80	40	80	40	80					2400	243200	15200	10,07	92386	169137	203126	218802
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1800	162600	10840	9,50	61031	114175	136730	146941
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	2000	198667	12417	9,97	71879	136847	165316	178389
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	2000	221867	13051	10,53	75087	148042	181486	197157
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	2000	258667	14370	11,37	77141	161297	203720	224537

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction y - sens perpendiculaire aux plis extérieurs - Essence : PIN																		
réf panneau: PI1		$E_{y,mean}$ = 9000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm				
		G_{mean} = 690 N/mm²																
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{y,net}$ [cm²]	$I_{y,net}$ [cm⁴]	$W_{y,net}$ [cm³]	$i_{y,net}$ [cm]	$I_{y,ef}$ [cm⁴] Portées			
															1 m	2,75 m	2,95 m	3,50 m
3	60	20	20	20							200	67	67	0,58				
	80	30	20	30							200	67	67	0,58				
	90	30	30	30							300	225	150	0,87				
	100	30	40	30							400	533	267	1,15				
	120	40	40	40							400	533	267	1,15				
5	100	20	20	20	20	20					400	1733	578	2,08	1314	1662	1671	1688
	120	20	30	20	30	20					600	4200	1050	2,65	2896	3953	3984	4044
	140	40	20	20	20	40					400	1733	578	2,08	1314	1662	1671	1688
	160	40	20	40	20	40					400	3733	933	3,06	2238	3424	3462	3536
	180	40	30	40	30	40					600	7800	1560	3,61	4008	6892	6998	7212
	200	40	40	40	40	40					800	13867	2311	4,16	6353	11842	12070	12536
5L2	160	60	40	60							400	533	67	1,15				
	180	70	40	70							400	533	59	1,15				
	200	80	40	80							400	533	53	1,15				
7	180	30	30	20	20	20	30	30			800	12667	2111	3,98	6398	11166	11341	11694
	200	20	40	20	40	20	40	20			1200	30400	3800	5,03	13495	25844	26357	27406
	220	30	30	30	40	30	30	30			1000	26333	3292	5,13	10738	21909	22399	23407
	240	40	30	30	40	30	30	40			1000	26333	3292	5,13	10738	21909	22399	23407
	260	40	40	30	40	30	40	40			1200	40800	4533	5,83	14117	32180	33087	34989
	280	40	40	40	40	40	40	40			1200	52800	5280	6,63	14925	38813	40194	43157
7L2	220	60	30	40	30	60					600	7800	709	3,61	4008	6892	6998	7212
	240	80	20	40	20	80					400	3733	311	3,06	2238	3424	3462	3536
	260	80	30	40	30	80					600	7800	600	3,61	4008	6892	6998	7212
	280	80	40	40	40	80					800	13867	990	4,16	6353	11842	12070	12536
8L2	300	80	30	80	30	80					600	18600	1240	5,57	6245	14609	15029	15910
	320	80	40	80	40	80					800	29867	1867	6,11	8562	21999	22776	24443
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1200	62400	5673	7,21	15861	44297	46032	49793
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	1200	74400	6200	7,87	16891	50613	52811	57632
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	1400	105667	8128	8,69	20002	65950	69334	76947
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	1600	130133	9295	9,02	24246	80292	84486	93958

Tableau 4 - Caractéristiques géométriques des panneaux HEXAPLI EP1 (EPICEA x:C24/y:C18)

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction x - sens parallèle aux plis extérieurs - Essence : EPICEA																			
réf panneau: EP1		$E_{x,mean}$ = 11000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm					
		G_{mean} = 690 N/mm²																	
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																	
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{x,net}$ [cm²]	$I_{x,net}$ [cm⁴]	$W_{x,net}$ [cm³]	$i_{x,net}$ [cm]	$I_{x,ef}$ [cm⁴] Portées			
															2 m	4 m	6 m	8 m
3	60	20	20	20							400	1733	578	2,08	1577	1691	1714	1723
	80	30	20	30							600	4200	1050	2,65	3675	4053	4133	4162
	90	30	30	30							600	5850	1300	3,12	4790	5539	5707	5769
	100	30	40	30							600	7800	1560	3,61	5994	7247	7543	7653
	120	40	40	40							800	13867	2311	4,16	9991	12613	13277	13528
5	100	20	20	20	20	20					600	6600	1320	3,32	5458	6270	6449	6514
	120	20	30	20	30	20					600	10200	1700	4,12	7743	9447	9851	10001
	140	40	20	20	20	40					1000	21133	3019	4,60	15078	19175	20213	20605
	160	40	20	40	20	40					1200	30400	3800	5,03	21680	27580	29074	29639
	180	40	30	40	30	40					1200	40800	4533	5,83	25338	35310	38154	39267
	200	40	40	40	40	40					1200	52800	5280	6,63	29001	43666	48294	50164
5L2	160	60	40	60							1200	33600	4200	5,29	21766	29399	31575	32426
	180	70	40	70							1400	48067	5341	5,86	29780	41305	44769	46146
	200	80	40	80							1600	66133	6613	6,43	39360	55858	61064	63168
7	180	30	30	20	20	20	30	30			1000	35933	3993	5,99	21599	30784	33443	34488
	200	20	40	20	40	20	40	20			800	36267	3627	6,73	20997	30661	33538	34679
	220	30	30	30	40	30	30	30			1200	62400	5673	7,21	32272	50444	56437	58896
	240	40	30	30	40	30	30	40			1400	88867	7406	7,97	40833	68349	78369	82632
	260	40	40	30	40	30	40	40			1400	105667	8128	8,69	44517	78306	91423	97143
	280	40	40	40	40	40	40	40			1600	130133	9295	9,02	53945	95654	112102	119322
7L2	220	60	30	40	30	60					1600	80933	7358	7,11	42978	65856	73412	76513
	240	80	20	40	20	80					2000	111467	9289	7,47	63869	93199	102454	106194
	260	80	30	40	30	80					2000	138667	10667	8,33	65346	106827	122279	128909
	280	80	40	40	40	80					2000	169067	12076	9,19	67524	120622	143182	153397
8L2	300	80	30	80	30	80					2400	206400	13760	9,27	96872	158836	181919	191823
	320	80	40	80	40	80					2400	243200	15200	10,07	96978	173440	205926	220636
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1800	162600	10840	9,50	64302	117062	138562	148128
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	2000	198667	12417	9,97	75797	140461	167653	179916
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	2000	221867	13051	10,53	79357	152237	184273	199001
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	2000	258667	14370	11,37	81782	166475	207377	227027

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction y - sens perpendiculaire aux plis extérieurs - Essence : EPICEA																			
réf panneau: EP1		$E_{y,mean}$ = 9000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm					
		G_{mean} = 690 N/mm²																	
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																	
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{y,net}$ [cm²]	$I_{y,net}$ [cm⁴]	$W_{y,net}$ [cm³]	$i_{y,net}$ [cm]	$I_{y,ef}$ [cm⁴] Portées			
															1 m	2,75 m	2,95 m	3,50 m
3	60	20	20	20							200	67	67	0,58				
	80	30	20	30							200	67	67	0,58				
	90	30	30	30							300	225	150	0,87				
	100	30	40	30							400	533	267	1,15				
	120	40	40	40							400	533	267	1,15				
5	100	20	20	20	20	20					400	1733	578	2,08	1314	1662	1671	1688
	120	20	30	20	30	20					600	4200	1050	2,65	2896	3953	3984	4044
	140	40	20	20	20	40					400	1733	578	2,08	1314	1662	1671	1688
	160	40	20	40	20	40					400	3733	933	3,06	2238	3424	3462	3536
	180	40	30	40	30	40					600	7800	1560	3,61	4008	6892	6998	7212
	200	40	40	40	40	40					800	13867	2311	4,16	6353	11842	12070	12536
5L2	160	60	40	60							400	533	67	1,15				
	180	70	40	70							400	533	59	1,15				
	200	80	40	80							400	533	53	1,15				
7	180	30	30	20	20	20	30	30			800	12667	2111	3,98	6398	11166	11341	11694
	200	20	40	20	40	20	40	20			1200	30400	3800	5,03	13495	25844	26357	27406
	220	30	30	30	40	30	30	30			1000	26333	3292	5,13	10738	21909	22399	23407
	240	40	30	30	40	30	30	40			1000	26333	3292	5,13	10738	21909	22399	23407
	260	40	40	30	40	30	40	40			1200	40800	4533	5,83	14117	32180	33087	34989
	280	40	40	40	40	40	40	40			1200	52800	5280	6,63	14925	38813	40194	43157
7L2	220	60	30	40	30	60					600	7800	709	3,61	4008	6892	6998	7212
	240	80	20	40	20	80					400	3733	311	3,06	2238	3424	3462	3536
	260	80	30	40	30	80					600	7800	600	3,61	4008	6892	6998	7212
	280	80	40	40	40	80					800	13867	990	4,16	6353	11842	12070	12536
8L2	300	80	30	80	30	80					600	18600	1240	5,57	6245	14609	15029	15910
	320	80	40	80	40	80					800	29867	1867	6,11	8562	21999	22776	24443
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1200	62400	5673	7,21	15861	44297	46032	49793
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	1200	74400	6200	7,87	16891	50613	52811	57632
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	1400	105667	8128	8,69	20002	65950	69334	76947
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	1600	130133	9295	9,02	24246	80292	84486	93958

Tableau 5 - Caractéristiques géométriques des panneaux HEXAPLI DG2 (DOUGLAS x:C24/y:C24)

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction x - sens parallèle aux plis extérieurs - Essence : DOUGLAS																			
réf panneau: DG2		$E_{x,mean}$ = 13000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm					
		G_{mean} = 690 N/mm²																	
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																	
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{x,net}$ [cm²]	$I_{x,net}$ [cm⁴]	$W_{x,net}$ [cm³]	$i_{x,net}$ [cm]	$I_{x,ef}$ [cm⁴] Portées			
															2 m	4 m	6 m	8 m
3	60	20	20	20							400	1733	578	2,08	1551	1684	1711	1721
	80	30	20	30							600	4200	1050	2,65	3595	4028	4121	4155
	90	30	30	30							600	5850	1300	3,12	4640	5487	5682	5754
	100	30	40	30							600	7800	1560	3,61	5757	7155	7499	7627
	120	40	40	40							800	13867	2311	4,16	9525	12411	13176	13469
5	100	20	20	20	20	20					600	6600	1320	3,32	5293	6214	6423	6499
	120	20	30	20	30	20					600	10200	1700	4,12	7421	9322	9790	9965
	140	40	20	20	20	40					1000	21133	3019	4,60	14350	18859	20054	20512
	160	40	20	40	20	40					1200	30400	3800	5,03	20632	27125	28846	29505
	180	40	30	40	30	40					1200	40800	4533	5,83	23749	34473	37711	39001
	200	40	40	40	40	40					1200	52800	5280	6,63	26866	42345	47558	49713
5L2	160	60	40	60							1200	33600	4200	5,29	20551	28758	31236	32223
	180	70	40	70							1400	48067	5341	5,86	28028	40301	44224	45816
	200	80	40	80							1600	66133	6613	6,43	36958	54371	60237	62661
7	180	30	30	20	20	20	30	30			1000	35933	3993	5,99	20157	30004	33027	34238
	200	20	40	20	40	20	40	20			800	36267	3627	6,73	19516	29824	33086	34405
	220	30	30	30	40	30	30	30			1200	62400	5673	7,21	29723	48757	55476	58302
	240	40	30	30	40	30	30	40			1400	88867	7406	7,97	37282	65617	76727	81593
	260	40	40	30	40	30	40	40			1400	105667	8128	8,69	40381	74809	89242	95741
	280	40	40	40	40	40	40	40			1600	130133	9295	9,02	48902	91293	109358	117551
7L2	220	60	30	40	30	60					1600	80933	7358	7,11	39776	63729	72200	75764
	240	80	20	40	20	80					2000	111467	9289	7,47	59599	90556	100984	105293
	260	80	30	40	30	80					2000	138667	10667	8,33	60097	102646	119734	127290
	280	80	40	40	40	80					2000	169067	12076	9,19	61476	114801	139349	150872
8L2	300	80	30	80	30	80					2400	206400	13760	9,27	89031	152592	178118	189405
	320	80	40	80	40	80					2400	243200	15200	10,07	88270	165058	200407	217000
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1800	162600	10840	9,50	58088	111429	134947	145773
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	2000	198667	12417	9,97	68363	133419	163045	176888
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	2000	221867	13051	10,53	71269	144077	178784	195348
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	2000	258667	14370	11,37	73018	156439	200193	222101

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction y - sens perpendiculaire aux plis extérieurs - Essence : DOUGLAS																			
réf panneau: DG2		$E_{y,mean}$ = 13000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm					
		G_{mean} = 690 N/mm²																	
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																	
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{y,net}$ [cm²]	$I_{y,net}$ [cm⁴]	$W_{y,net}$ [cm³]	$i_{y,net}$ [cm]	$I_{y,ef}$ [cm⁴] Portées			
															1 m	2,75 m	2,95 m	3,50 m
3	60	20	20	20							200	67	67	0,58				
	80	30	20	30							200	67	67	0,58				
	90	30	30	30							300	225	150	0,87				
	100	30	40	30							400	533	267	1,15				
	120	40	40	40							400	533	267	1,15				
5	100	20	20	20	20	20					400	1733	578	2,08	1191	1632	1644	1669
	120	20	30	20	30	20					600	4200	1050	2,65	2569	3854	3895	3978
	140	40	20	20	20	40					400	1733	578	2,08	1191	1632	1644	1669
	160	40	20	40	20	40					400	3733	933	3,06	1910	3303	3354	3455
	180	40	30	40	30	40					600	7800	1560	3,61	3344	6557	6695	6979
	200	40	40	40	40	40					800	13867	2311	4,16	5259	11134	11424	12029
5L2	160	60	40	60							400	533	67	1,15				
	180	70	40	70							400	533	59	1,15				
	200	80	40	80							400	533	53	1,15				
7	180	30	30	20	20	20	30	30			800	12667	2111	3,98	5301	10611	10840	11310
	200	20	40	20	40	20	40	20			1200	30400	3800	5,03	11034	24251	24903	26266
	220	30	30	30	40	30	30	30			1000	26333	3292	5,13	8643	20403	21017	22312
	240	40	30	30	40	30	30	40			1000	26333	3292	5,13	8643	20403	21017	22312
	260	40	40	30	40	30	40	40			1200	40800	4533	5,83	11209	29457	30555	32926
	280	40	40	40	40	40	40	40			1200	52800	5280	6,63	11628	34784	36388	39947
7L2	220	60	30	40	30	60					600	7800	709	3,61	3344	6557	6695	6979
	240	80	20	40	20	80					400	3733	311	3,06	1910	3303	3354	3455
	260	80	30	40	30	80					600	7800	600	3,61	3344	6557	6695	6979
	280	80	40	40	40	80					800	13867	990	4,16	5259	11134	11424	12029
8L2	300	80	30	80	30	80					600	18600	1240	5,57	4899	13348	13856	14954
	320	80	40	80	40	80					800	29867	1867	6,11	6707	19733	20635	22637
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1200	62400	5673	7,21	12135	39296	41275	45721
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	1200	74400	6200	7,87	12783	44372	46826	52416
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	1400	105667	8128	8,69	15073	56627	60244	68721
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	1600	130133	9295	9,02	18327	68786	73241	83727

Tableau 6- Caractéristiques géométriques des panneaux HEXAPLI PI2 (PIN x:C24/y:C24)

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction x - sens parallèle aux plis extérieurs - Essence : PIN																		
réf panneau: PI2		$E_{x,mean}$ = 12000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm				
		G_{mean} = 690 N/mm²																
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{x,net}$ [cm²]	$I_{x,net}$ [cm⁴]	$W_{x,net}$ [cm³]	$i_{x,net}$ [cm]	$I_{x,ef}$ [cm⁴] Portées			
															2 m	4 m	6 m	8 m
3	60	20	20	20							400	1733	578	2,08	1564	1687	1713	1722
	80	30	20	30							600	4200	1050	2,65	3634	4041	4127	4159
	90	30	30	30							600	5850	1300	3,12	4714	5513	5695	5762
	100	30	40	30							600	7800	1560	3,61	5873	7200	7521	7640
	120	40	40	40							800	13867	2311	4,16	9752	12511	13227	13499
5	100	20	20	20	20	20					600	6600	1320	3,32	5374	6242	6436	6507
	120	20	30	20	30	20					600	10200	1700	4,12	7578	9384	9820	9983
	140	40	20	20	20	40					1000	21133	3019	4,60	14704	19015	20133	20558
	160	40	20	40	20	40					1200	30400	3800	5,03	21142	27350	28960	29572
	180	40	30	40	30	40					1200	40800	4533	5,83	24516	34887	37931	39133
	200	40	40	40	40	40					1200	52800	5280	6,63	27890	42995	47923	49938
5L2	160	60	40	60							1200	33600	4200	5,29	21138	29074	31405	32324
	180	70	40	70							1400	48067	5341	5,86	28871	40796	44495	45980
	200	80	40	80							1600	66133	6613	6,43	38110	55102	60647	62913
7	180	30	30	20	20	20	30	30			1000	35933	3993	5,99	20852	30389	33234	34362
	200	20	40	20	40	20	40	20			800	36267	3627	6,73	20229	30237	33311	34542
	220	30	30	30	40	30	30	30			1200	62400	5673	7,21	30943	49586	55952	58597
	240	40	30	30	40	30	30	40			1400	88867	7406	7,97	38973	66954	77539	82109
	260	40	40	30	40	30	40	40			1400	105667	8128	8,69	42344	76517	90319	96437
	280	40	40	40	40	40	40	40			1600	130133	9295	9,02	51294	93421	110713	118430
7L2	220	60	30	40	30	60					1600	80933	7358	7,11	41308	64774	72801	76136
	240	80	20	40	20	80					2000	111467	9289	7,47	61647	91856	101713	105742
	260	80	30	40	30	80					2000	138667	10667	8,33	62593	104691	120992	128094
	280	80	40	40	40	80					2000	169067	12076	9,19	64335	117634	141238	152124
8L2	300	80	30	80	30	80					2400	206400	13760	9,27	92760	155646	179997	190606
	320	80	40	80	40	80					2400	243200	15200	10,07	92386	169137	203126	218802
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1800	162600	10840	9,50	61031	114175	136730	146941
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	2000	198667	12417	9,97	71879	136847	165316	178389
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	2000	221867	13051	10,53	75087	148042	181486	197157
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	2000	258667	14370	11,37	77141	161297	203720	224537

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction y - sens perpendiculaire aux plis extérieurs - Essence : PIN																		
réf panneau: PI2		$E_{y,mean}$ = 12000 N/mm²												Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm				
		G_{mean} = 690 N/mm²																
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{y,net}$ [cm²]	$I_{y,net}$ [cm⁴]	$W_{y,net}$ [cm³]	$i_{y,net}$ [cm]	$I_{y,ef}$ [cm⁴] Portées			
															1 m	2,75 m	2,95 m	3,50 m
3	60	20	20	20							200	67	67	0,58				
	80	30	20	30							200	67	67	0,58				
	90	30	30	30							300	225	150	0,87				
	100	30	40	30							400	533	267	1,15				
	120	40	40	40							400	533	267	1,15				
5	100	20	20	20	20	20					400	1733	578	2,08	1219	1639	1651	1674
	120	20	30	20	30	20					600	4200	1050	2,65	2642	3878	3917	3994
	140	40	20	20	20	40					400	1733	578	2,08	1219	1639	1651	1674
	160	40	20	40	20	40					400	3733	933	3,06	1982	3333	3380	3475
	180	40	30	40	30	40					600	7800	1560	3,61	3486	6637	6768	7036
	200	40	40	40	40	40					800	13867	2311	4,16	5488	11302	11578	12152
5L2	160	60	40	60							400	533	67	1,15				
	180	70	40	70							400	533	59	1,15				
	200	80	40	80							400	533	53	1,15				
7	180	30	30	20	20	20	30	30			800	12667	2111	3,98	5535	10745	10961	11404
	200	20	40	20	40	20	40	20			1200	30400	3800	5,03	11548	24629	25250	26542
	220	30	30	30	40	30	30	30			1000	26333	3292	5,13	9078	20759	21345	22576
	240	40	30	30	40	30	30	40			1000	26333	3292	5,13	9078	20759	21345	22576
	260	40	40	30	40	30	40	40			1200	40800	4533	5,83	11802	30091	31149	33417
	280	40	40	40	40	40	40	40			1200	52800	5280	6,63	12289	35707	37267	40702
7L2	220	60	30	40	30	60					600	7800	709	3,61	3486	6637	6768	7036
	240	80	20	40	20	80					400	3733	311	3,06	1982	3333	3380	3475
	260	80	30	40	30	80					600	7800	600	3,61	3486	6637	6768	7036
	280	80	40	40	40	80					800	13867	990	4,16	5488	11302	11578	12152
8L2	300	80	30	80	30	80					600	18600	1240	5,57	5174	13642	14131	15182
	320	80	40	80	40	80					800	29867	1867	6,11	7079	20252	21129	23062
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1200	62400	5673	7,21	12880	40433	42367	46674
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	1200	74400	6200	7,87	13597	45780	48188	53628
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	1400	105667	8128	8,69	16040	58695	62279	70604
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	1600	130133	9295	9,02	19488	71331	75753	86064

Tableau 7 - Caractéristiques géométriques des panneaux HEXAPLI EP2 (EPICEA x:C24/y:C24)

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction x - sens parallèle aux plis extérieurs - Essence : EPICEA																				
réf panneau: EP2		$E_{x,mean}$ = 11000 N/mm²													Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm				
		G_{mean} = 690 N/mm²																		
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																		
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{x,net}$ [cm²]	$I_{x,net}$ [cm⁴]	$W_{x,net}$ [cm³]	$i_{x,net}$ [cm]	$I_{x,ef}$ [cm⁴] Portées			
															2 m	4 m	6 m	8 m
3	60	20	20	20							400	1733	578	2,08	1577	1691	1714	1723
	80	30	20	30							600	4200	1050	2,65	3675	4053	4133	4162
	90	30	30	30							600	5850	1300	3,12	4790	5539	5707	5769
	100	30	40	30							600	7800	1560	3,61	5994	7247	7543	7653
	120	40	40	40							800	13867	2311	4,16	9991	12613	13277	13528
5	100	20	20	20	20	20					600	6600	1320	3,32	5458	6270	6449	6514
	120	20	30	20	30	20					600	10200	1700	4,12	7743	9447	9851	10001
	140	40	20	20	20	40					1000	21133	3019	4,60	15078	19175	20213	20605
	160	40	20	40	20	40					1200	30400	3800	5,03	21680	27580	29074	29639
	180	40	30	40	30	40					1200	40800	4533	5,83	25338	35310	38154	39267
	200	40	40	40	40	40					1200	52800	5280	6,63	29001	43666	48294	50164
5L2	160	60	40	60							1200	33600	4200	5,29	21766	29399	31575	32426
	180	70	40	70							1400	48067	5341	5,86	29780	41305	44769	46146
	200	80	40	80							1600	66133	6613	6,43	39360	55858	61064	63168
7	180	30	30	20	20	20	30	30			1000	35933	3993	5,99	21599	30784	33443	34488
	200	20	40	20	40	20	40	20			800	36267	3627	6,73	20997	30661	33538	34679
	220	30	30	30	40	30	30	30			1200	62400	5673	7,21	32272	50444	56437	58896
	240	40	30	30	40	30	30	40			1400	88867	7406	7,97	40833	68349	78369	82632
	260	40	40	30	40	30	40	40			1400	105667	8128	8,69	44517	78306	91423	97143
	280	40	40	40	40	40	40	40			1600	130133	9295	9,02	53945	95654	112102	119322
7L2	220	60	30	40	30	60					1600	80933	7358	7,11	42978	65856	73412	76513
	240	80	20	40	20	80					2000	111467	9289	7,47	63869	93199	102454	106194
	260	80	30	40	30	80					2000	138667	10667	8,33	65346	106827	122279	128909
	280	80	40	40	40	80					2000	169067	12076	9,19	67524	120622	143182	153397
8L2	300	80	30	80	30	80					2400	206400	13760	9,27	96872	158836	181919	191823
	320	80	40	80	40	80					2400	243200	15200	10,07	96978	173440	205926	220636
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1800	162600	10840	9,50	64302	117062	138562	148128
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	2000	198667	12417	9,97	75797	140461	167653	179916
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	2000	221867	13051	10,53	79357	152237	184273	199001
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	2000	258667	14370	11,37	81782	166475	207377	227027

Caractéristiques géométriques des sections de panneaux HEXAPLI dans la direction y - sens perpendiculaire aux plis extérieurs - Essence : EPICEA																				
réf panneau: EP2		$E_{y,mean}$ = 11000 N/mm²													Valeurs calculées avec la méthode Gamma pour une largeur de panneau de 100cm				
		G_{mean} = 690 N/mm²																		
		$G_{r,mean}$ = 50 N/mm²																		
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux									$A_{y,net}$ [cm²]	$I_{y,net}$ [cm⁴]	$W_{y,net}$ [cm³]	$i_{y,net}$ [cm]	$I_{y,ef}$ [cm⁴] Portées			
															1 m	2,75 m	2,95 m	3,50 m
3	60	20	20	20							200	67	67	0,58				
	80	30	20	30							200	67	67	0,58				
	90	30	30	30							300	225	150	0,87				
	100	30	40	30							400	533	267	1,15				
	120	40	40	40							400	533	267	1,15				
5	100	20	20	20	20	20					400	1733	578	2,08	1249	1646	1657	1679
	120	20	30	20	30	20					600	4200	1050	2,65	2721	3903	3939	4011
	140	40	20	20	20	40					400	1733	578	2,08	1249	1646	1657	1679
	160	40	20	40	20	40					400	3733	933	3,06	2060	3362	3407	3495
	180	40	30	40	30	40					600	7800	1560	3,61	3642	6720	6843	7093
	200	40	40	40	40	40					800	13867	2311	4,16	5743	11476	11737	12277
5L2	160	60	40	60							400	533	67	1,15				
	180	70	40	70							400	533	59	1,15				
	200	80	40	80							400	533	53	1,15				
7	180	30	30	20	20	20	30	30			800	12667	2111	3,98	5793	10881	11085	11499
	200	20	40	20	40	20	40	20			1200	30400	3800	5,03	12122	25020	25608	26823
	220	30	30	30	40	30	30	30			1000	26333	3292	5,13	9564	21128	21685	22846
	240	40	30	30	40	30	30	40			1000	26333	3292	5,13	9564	21128	21685	22846
	260	40	40	30	40	30	40	40			1200	40800	4533	5,83	12472	30755	31768	33925
	280	40	40	40	40	40	40	40			1200	52800	5280	6,63	13044	36683	38192	41488
7L2	220	60	30	40	30	60					600	7800	709	3,61	3642	6720	6843	7093
	240	80	20	40	20	80					400	3733	311	3,06	2060	3362	3407	3495
	260	80	30	40	30	80					600	7800	600	3,61	3642	6720	6843	7093
	280	80	40	40	40	80					800	13867	990	4,16	5743	11476	11737	12277
8L2	300	80	30	80	30	80					600	18600	1240	5,57	5484	13949	14418	15417
	320	80	40	80	40	80					800	29867	1867	6,11	7504	20801	21650	23504
9	300	40	30	30	30	40	30	30	30	40	1200	62400	5673	7,21	13731	41642	43520	47668
	320	40	30	40	30	40	30	40	30	40	1200	74400	6200	7,87	14533	47283	49635	54898
	340	40	40	40	30	40	30	40	40	40	1400	105667	8128	8,69	17157	60924	64461	72596
	360	40	40	40	40	40	40	40	40	40	1600	130133	9295	9,02	20828	74080	78450	88539

Tableau 8 – Résistances caractéristiques des panneaux HEXAPLI1 (x:C24/y:C18) ramenées à des sections massives

			Valeurs de résistance caractéristiques [MPa]													Valeurs de rigidité moyenne [MPa]							Masses volumiques [kg/m³]	
			A plat						A chant			Dans le plan du panneau				A plat			A chant					
			flexion longitudinale	flexion transversale	compression perpendiculaire au panneau	traction perpendiculaire au panneau	cisaillementlongitudinal	cisaillement transversal	flexion longitudinale	flexion transversale	cisaillement relatif à la flexion longitudinale	traction longitudinale	traction transversale	compression longitudinale	compression transversale	module d'élasticité longitudinal moyen	module d'élasticité transversal moyen	module de cisaillement moyen	module d'élasticité longitudinal moyen	module d'élasticité transversal moyen	module de cisaillement longitudinal	module de cisaillement transversal	masse volumique caractéristique à considérer pour le calcul des connecteurs en résistance	masse volumique moyenne à considérer pour le calcul des charges permanentes
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux	$f_{m,0,k}$	$f_{m,90,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{v,0,k}$	$f_{v,90,k}$	$f_{m,0,k}$	$f_{m,90,k}$	$f_{v,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$E_{0,mean}$	$E_{90,mean}$	G_{mean}	$E_{0,mean}$	$E_{90,mean}$	$G_{0,mean}$	$G_{90,mean}$	ρ_k	ρ_{mean}
3	60	20 20 20	23,1	2,00	2,50	0,40	1,08	0,83	16,0	8,00	0,67	9,33	4,67	14,0	7,0	10590	333	50	7330	3660	460	187	350	420
	80	30 20 30	23,6	1,13	2,50	0,40	1,05	0,63	18,0	6,00	0,50	10,50	3,50	15,8	5,3	10820	141	50	8250	2750	518	140	350	420
	90	30 30 30	23,1	2,00	2,50	0,40	1,08	0,83	16,0	8,00	0,67	9,33	4,67	14,0	7,0	10590	333	50	7330	3660	460	187	350	420
	100	30 40 30	22,5	2,88	2,50	0,40	1,11	1,00	14,4	9,60	0,80	8,40	5,60	12,6	8,4	10290	576	50	6600	4400	414	224	350	420
	120	40 40 40	23,1	2,00	2,50	0,40	1,08	0,83	16,0	8,00	0,67	9,33	4,67	14,0	7,0	10590	333	50	7330	3660	460	187	350	420
5	100	20 20 20 20 20	19,0	6,24	2,50	0,40	1,24	0,65	14,4	9,60	0,80	8,40	5,60	12,6	8,4	8710	1872	50	6600	4400	414	224	350	420
	120	20 30 20 30 20	17,0	7,88	2,50	0,40	1,28	0,70	12,0	12,00	1,00	7,00	7,00	10,5	10,5	7790	2625	50	5500	5500	345	280	350	420
	140	40 20 20 20 40	22,2	3,18	2,50	0,40	1,13	0,46	17,1	6,86	0,57	10,00	4,00	15,0	6,0	10160	682	50	7850	3140	493	160	350	420
	160	40 20 40 20 40	21,4	3,94	2,50	0,40	1,19	0,58	18,0	6,00	0,50	10,50	3,50	15,8	5,3	9790	984	50	8250	2750	518	140	350	420
	180	40 30 40 30 40	20,1	5,20	2,50	0,40	1,21	0,62	16,0	8,00	0,67	9,33	4,67	14,0	7,0	9230	1444	50	7330	3660	460	187	350	420
	200	40 40 40 40 40	19,0	6,24	2,50	0,40	1,24	0,65	14,4	9,60	0,80	8,40	5,60	12,6	8,4	8710	1872	50	6600	4400	414	224	350	420
5L2	160	60 40 60	23,6	1,13	2,50	0,40	1,05	0,63	18,0	6,00	0,50	10,50	3,50	15,8	5,3	10820	141	50	8250	2750	518	140	350	420
	180	70 40 70	23,7	0,89	2,50	0,40	1,04	0,56	18,7	5,33	0,44	10,89	3,11	16,3	4,7	10870	99	50	8550	2440	537	124	350	420
	200	80 40 80	23,8	0,72	2,50	0,40	1,03	0,50	19,2	4,80	0,40	11,20	2,80	16,8	4,2	10910	72	50	8800	2200	552	112	350	420
7	180	30 30 20 20 20 30 30	17,7	7,04	2,50	0,40	1,13	0,78	13,3	10,67	0,89	7,78	6,22	11,7	9,3	8130	2346	50	6110	4880	383	249	350	420
	200	20 40 20 40 20 40 20	13,1	10,26	2,50	0,40	1,13	0,95	9,6	14,40	0,80	5,60	8,40	8,4	12,6	5980	4104	50	4400	6600	276	336	350	420
	220	30 30 30 40 30 30 30	16,9	7,35	2,50	0,40	1,09	0,92	13,1	10,91	0,91	7,64	6,36	11,5	9,5	7730	2671	50	6000	5000	376	255	350	420
	240	40 30 30 40 30 30 40	18,5	6,17	2,50	0,40	1,10	0,84	14,0	10,00	0,83	8,17	5,83	12,3	8,8	8480	2057	50	6410	4580	403	233	350	420
	260	40 40 30 40 30 40 40	17,3	7,24	2,50	0,40	1,12	0,84	12,9	11,08	0,92	7,54	6,46	11,3	9,7	7930	2507	50	5920	5070	372	258	350	420
	280	40 40 40 40 40 40 40	17,1	7,27	2,50	0,40	1,09	0,88	13,7	10,29	0,86	8,00	6,00	12,0	9,0	7820	2598	50	6280	4710	394	240	350	420
7L2	220	60 30 40 30 60	21,9	3,48	2,50	0,40	1,15	0,51	17,5	6,55	0,55	10,18	3,82	15,3	5,7	10030	791	50	8000	3000	502	153	350	420
	240	80 20 40 20 80	23,2	1,75	2,50	0,40	1,09	0,39	20,0	4,00	0,33	11,67	2,33	17,5	3,5	10640	292	50	9160	1830	575	93	350	420
	260	80 30 40 30 80	22,7	2,49	2,50	0,40	1,11	0,43	18,5	5,54	0,46	10,77	3,23	16,2	4,8	10410	479	50	8460	2530	531	129	350	420
	280	80 40 40 40 80	22,2	3,18	2,50	0,40	1,13	0,46	17,1	6,86	0,57	10,00	4,00	15,0	6,0	10160	682	50	7850	3140	493	160	350	420
8L2	300	80 30 80 30 80	22,0	3,19	2,50	0,40	1,17	0,56	19,2	4,80	0,40	11,20	2,80	16,8	4,2	10090	744	50	8800	2200	552	112	350	420
	320	80 40 80 40 80	21,4	3,94	2,50	0,40	1,19	0,58	18,0	6,00	0,50	10,50	3,50	15,8	5,3	9790	984	50	8250	2750	518	140	350	420
9	300	40 30 30 30 40 30 30 30 40	17,3	6,87	2,50	0,40	1,14	1,10	14,4	9,60	0,80	8,40	5,60	12,6	8,4	7940	2517	50	6600	4400	414	224	350	420
	320	40 30 40 30 40 30 40 30 40	17,5	6,59	2,50	0,40	1,11	1,12	15,0	9,00	0,75	8,75	5,25	13,1	7,9	8000	2470	50	6870	4120	431	210	350	420
	340	40 40 40 30 40 30 40 40 40	16,3	7,63	2,50	0,40	1,11	1,06	14,1	9,88	0,82	8,24	5,76	12,4	8,6	7450	2918	50	6470	4520	406	231	350	420
	360	40 40 40 40 40 40 40 40 40	16,0	7,78	2,50	0,40	1,12	1,13	13,3	10,67	0,89	7,78	6,22	11,7	9,3	7310	3025	50	6110	4880	383	249	350	420

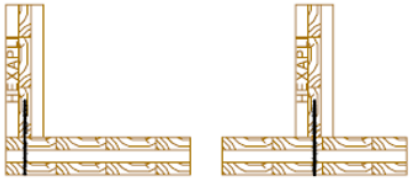
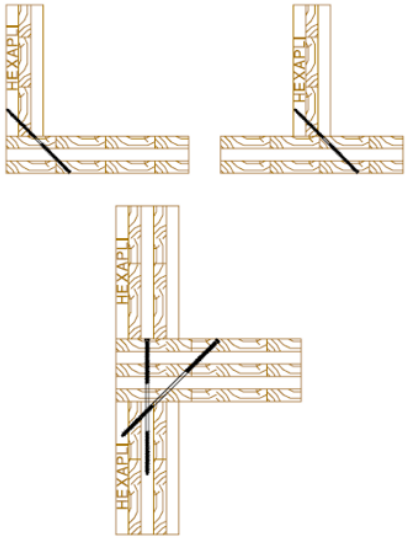
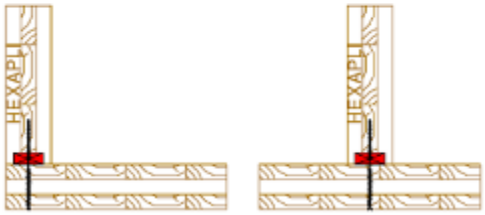
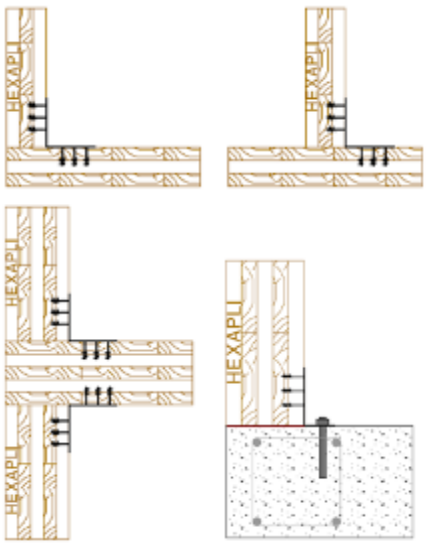
Note: Les propriétés sont calculées sur la base des propriétés mécaniques de l'Epicéa avec Exmean = 11000 N/mm² et Eymean = 9000 N/mm²

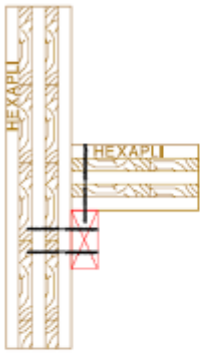
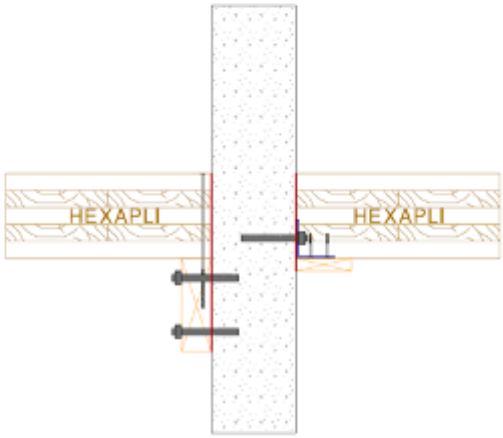
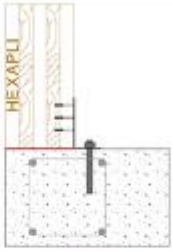
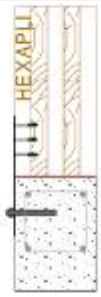
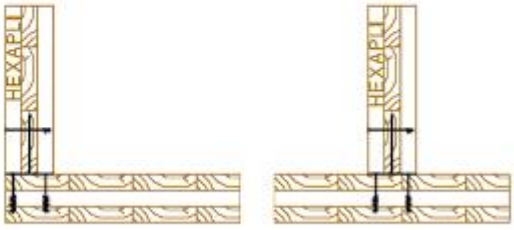
Tableau 9 – Résistances caractéristiques des panneaux HEXAPLI2 (x:C24/y:C24) ramenées à des sections massives

			Valeurs de résistance caractéristiques [MPa]													Valeurs de rigidité moyenne [MPa]							Masses volumiques [kg/m^3]	
			A plat						A chant			Dans le plan du panneau				A plat			A chant					
nb de plis	épaisseur totale (mm)	composition des panneaux	flexion longitudinale	flexion transversale	compression perpendiculaire au panneau	traction perpendiculaire au panneau	cisaillementlongitudinal	cisaillement transversal	flexion longitudinale	flexion transversale	cisaillement relatif à la flexion longitudinale	traction longitudinale	traction transversale	compression longitudinale	compression transversale	module d'élasticité longitudinal moyen	module d'élasticité transversal moyen	module de cisaillement moyen	module d'élasticité longitudinal moyen	module d'élasticité transversal moyen	module de cisaillement longitudinal	module de cisaillement transversal	masse volumique caractéristique à considérer pour le calcul des connecteurs en résistance	masse volumique moyenne à considérer pour le calcul des charges permanentes
			$f_{m,0,k}$	$f_{m,90,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{v,0,k}$	$f_{v,90,k}$	$f_{m,0,k}$	$f_{m,90,k}$	$f_{v,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$E_{0,mean}$	$E_{90,mean}$	G_{mean}	$E_{0,mean}$	$E_{90,mean}$	$G_{0,mean}$	$G_{90,mean}$	ρ_k	ρ_{mean}
3	60	20 20 20	23,1	2,67	2,50	0,40	1,08	0,83	16,0	8,00	0,67	9,33	4,67	14,0	7,0	10590	407	50	7330	3660	460	230	350	420
	80	30 20 30	23,6	1,50	2,50	0,40	1,05	0,63	18,0	6,00	0,50	10,50	3,50	15,8	5,3	10820	172	50	8250	2750	518	173	350	420
	90	30 30 30	23,1	2,67	2,50	0,40	1,08	0,83	16,0	8,00	0,67	9,33	4,67	14,0	7,0	10590	407	50	7330	3660	460	230	350	420
	100	30 40 30	22,5	3,84	2,50	0,40	1,11	1,00	14,4	9,60	0,80	8,40	5,60	12,6	8,4	10290	704	50	6600	4400	414	276	350	420
	120	40 40 40	23,1	2,67	2,50	0,40	1,08	0,83	16,0	8,00	0,67	9,33	4,67	14,0	7,0	10590	407	50	7330	3660	460	230	350	420
5	100	20 20 20 20 20	19,0	8,32	2,50	0,40	1,24	0,65	14,4	9,60	0,80	8,40	5,60	12,6	8,4	8710	2288	50	6600	4400	414	276	350	420
	120	20 30 20 30 20	17,0	10,50	2,50	0,40	1,28	0,70	12,0	12,00	1,00	7,00	7,00	10,5	10,5	7790	3208	50	5500	5500	345	345	350	420
	140	40 20 20 20 40	22,2	4,24	2,50	0,40	1,13	0,46	17,1	6,86	0,57	10,00	4,00	15,0	6,0	10160	834	50	7850	3140	493	197	350	420
	160	40 20 40 20 40	21,4	5,25	2,50	0,40	1,19	0,58	18,0	6,00	0,50	10,50	3,50	15,8	5,3	9790	1203	50	8250	2750	518	173	350	420
	180	40 30 40 30 40	20,1	6,93	2,50	0,40	1,21	0,62	16,0	8,00	0,67	9,33	4,67	14,0	7,0	9230	1765	50	7330	3660	460	230	350	420
	200	40 40 40 40 40	19,0	8,32	2,50	0,40	1,24	0,65	14,4	9,60	0,80	8,40	5,60	12,6	8,4	8710	2288	50	6600	4400	414	276	350	420
5L2	160	60 40 60	23,6	1,50	2,50	0,40	1,05	0,63	18,0	6,00	0,50	10,50	3,50	15,8	5,3	10820	172	50	8250	2750	518	173	350	420
	180	70 40 70	23,7	1,19	2,50	0,40	1,04	0,56	18,7	5,33	0,44	10,89	3,11	16,3	4,7	10870	121	50	8550	2440	537	153	350	420
	200	80 40 80	23,8	0,96	2,50	0,40	1,03	0,50	19,2	4,80	0,40	11,20	2,80	16,8	4,2	10910	88	50	8800	2200	552	138	350	420
7	180	30 30 20 20 20 30 30	17,7	9,38	2,50	0,40	1,13	0,78	13,3	10,67	0,89	7,78	6,22	11,7	9,3	8130	2867	50	6110	4880	383	307	350	420
	200	20 40 20 40 20 40 20	13,1	13,68	2,50	0,40	1,13	0,95	9,6	14,40	0,80	5,60	8,40	8,4	12,6	5980	5016	50	4400	6600	276	414	350	420
	220	30 30 30 40 30 30 30	16,9	9,79	2,50	0,40	1,09	0,92	13,1	10,91	0,91	7,64	6,36	11,5	9,5	7730	3264	50	6000	5000	376	314	350	420
	240	40 30 30 40 30 30 40	18,5	8,23	2,50	0,40	1,10	0,84	14,0	10,00	0,83	8,17	5,83	12,3	8,8	8480	2514	50	6410	4580	403	288	350	420
	260	40 40 30 40 30 40 40	17,3	9,66	2,50	0,40	1,12	0,84	12,9	11,08	0,92	7,54	6,46	11,3	9,7	7930	3064	50	5920	5070	372	318	350	420
	280	40 40 40 40 40 40 40	17,1	9,70	2,50	0,40	1,09	0,88	13,7	10,29	0,86	8,00	6,00	12,0	9,0	7820	3175	50	6280	4710	394	296	350	420
7L2	220	60 30 40 30 60	21,9	4,64	2,50	0,40	1,15	0,51	17,5	6,55	0,55	10,18	3,82	15,3	5,7	10030	967	50	8000	3000	502	188	350	420
	240	80 20 40 20 80	23,2	2,33	2,50	0,40	1,09	0,39	20,0	4,00	0,33	11,67	2,33	17,5	3,5	10640	356	50	9160	1830	575	115	350	420
	260	80 30 40 30 80	22,7	3,32	2,50	0,40	1,11	0,43	18,5	5,54	0,46	10,77	3,23	16,2	4,8	10410	586	50	8460	2530	531	159	350	420
	280	80 40 40 40 80	22,2	4,24	2,50	0,40	1,13	0,46	17,1	6,86	0,57	10,00	4,00	15,0	6,0	10160	834	50	7850	3140	493	197	350	420
8L2	300	80 30 80 30 80	22,0	4,25	2,50	0,40	1,17	0,56	19,2	4,80	0,40	11,20	2,80	16,8	4,2	10090	909	50	8800	2200	552	138	350	420
	320	80 40 80 40 80	21,4	5,25	2,50	0,40	1,19	0,58	18,0	6,00	0,50	10,50	3,50	15,8	5,3	9790	1203	50	8250	2750	518	173	350	420
9	300	40 30 30 30 40 30 30 30 40	17,3	9,15	2,50	0,40	1,14	1,10	14,4	9,60	0,80	8,40	5,60	12,6	8,4	7940	3077	50	6600	4400	414	276	350	420
	320	40 30 40 30 40 30 40 30 40	17,5	8,78	2,50	0,40	1,11	1,12	15,0	9,00	0,75	8,75	5,25	13,1	7,9	8000	3019	50	6870	4120	431	259	350	420
	340	40 40 40 30 40 30 40 40 40	16,3	10,18	2,50	0,40	1,11	1,06	14,1	9,88	0,82	8,24	5,76	12,4	8,6	7450	3567	50	6470	4520	406	284	350	420
	360	40 40 40 40 40 40 40 40 40	16,0	10,37	2,50	0,40	1,12	1,13	13,3	10,67	0,89	7,78	6,22	11,7	9,3	7310	3697	50	6110	4880	383	307	350	420

Note: Les propriétés sont calculées sur la base des propriétés mécaniques de l'Epicéa avec Exmean = 11000 N/mm² et Eymean = 11000 N/mm²

Tableau 10 – Exemples d'assemblages en angles

Assemblage	Détails	Utilisation	Exigences	Exemples
Vissage direct à chant	La vis pénètre le panneau cible à chant dans l'épaisseur du panneau	Assemblage d'éléments de murs entre eux ; Assemblage d'élément de plancher sur un élément de mur Assemblage d'élément de mur sur un élément de plancher	Vis sous ATE OU ETE visant la fixation en bois de bout dans du CLT	
Vissage direct lardé (le vissage à 90° n'est pas possible ou une augmentation de résistance de l'assemblage est recherchée).	Angle de vissage différent de 90°		Vis sous ATE OU ETE visant la fixation dans du CLT. NOTE : La résistance de la vis étant sensible à la variation de l'angle de mise en œuvre, l'utilisation d'un gabarit de vissage est recommandée. A défaut, le calcul de la résistance devra prendre en compte cette variation.	
Clé et vis	Languette en panneau à base de bois préalablement vissée sur le panneau transversal avant le vissage direct à chant dans l'épaisseur du panneau Les panneaux à base de bois utilisés sont en contreplaqué, lamibois (LVL) ou « trois-plis », tels que définis au §5.3.	Assemblage d'éléments de murs entre eux ; Assemblage d'élément de plancher sur un élément de mur Assemblage d'élément de mur sur un élément de plancher	Vis sous ATE OU ETE visant la fixation en bois de bout dans du CLT	
Connecteurs tridimensionnels	Eléments du commerce ou de ferrures mécano-soudées qui satisfont aux dispositions du §5.22. Un usinage peut être réalisé afin d'éviter une sur épaisseur et protéger la ferrure par un élément bois rapporté.		Choix de l'organe selon les dispositions du §5.21 selon le nombre de plis traversés par l'organe de fixation incluant le plan de cisaillement métal-bois. Dans le cas d'un assemblage sur un support béton, le panneau doit être isolé de tout contact direct avec le support béton par une barrière de protection conforme aux prescriptions du NF DTU 31.2 partie 1-2 (CGM) visant les barrières d'étanchéité vis-à-vis des remontées capillaires (bande d'arase).	

Assemblage	Détails	Utilisation	Exigences	Exemples
Muralière bois ou dérivée du bois ou cornière métallique vissée	Vissée au préalable sur le panneau de mur transversal, avant le vissage du panneau de plancher sur cette même pièce d'appui.	Elément de plancher sur un élément de mur	Vis sous ATE OU ETE visant la fixation dans du CLT	
	Assemblage sur support béton.		Vis sous ATE OU ETE visant la fixation dans du CLT ; La muralière (ou cornière métallique) est ancrée dans le support béton aux moyen de chevilles de fixation ; La murallère bois comme le panneau doivent être isolés de tout contact direct avec le support béton par une barrière de protection conforme aux prescriptions du paragraphe 6.1 du NF DTU 31.2 partie 1-2 (CGM) visant les barrières d'étanchéité vis-à-vis des remontées capillaires (bande d'arase).	
Métal/bois par plats métalliques	Eléments du commerce ou ferrures mécano-soudées qui satisfont aux dispositions du §5.22. Un usinage peut être réalisé afin d'éviter une sur épaisseur et protéger la ferrure par un élément bois rapporté.	Ancrage d'éléments de murs sur support béton ;	Le choix de l'organe de fixation est fait conformément aux dispositions du §5.21 selon le nombre de plis traversés par l'organe de fixation, incluant le plan de cisaillement métal-bois.	
	Assemblage sur support béton.		Le plat métallique est ancrée dans le support béton aux moyen de chevilles de fixation ; le panneau doit être isolé de tout contact direct avec le support béton par une barrière de protection conforme aux prescriptions du NF DTU 31.2 partie 1-2 (CGM) visant les barrières d'étanchéité vis-à-vis des remontées capillaires (bande d'arase).	
Bois/métal par plaques métalliques en âmes	Cet assemblage est réalisé au moyen d'un connecteur métallique à plaque en âme préalablement vissé sur le panneau transversal (ou support), inséré dans une feuillure préalablement réalisée en atelier dans le panneau à fixer, avant le vissage transversal au panneau cible.	Assemblage d'éléments de murs entre eux ; Assemblage d'élément de plancher sur un élément de mur Assemblage d'élément de mur sur un élément de plancher	Cet assemblage peut être réalisé au moyen d'éléments du commerce ou de ferrures mécano-soudées qui satisfont aux dispositions du §5.22. Le choix de l'organe de fixation est fait conformément aux dispositions du §5.21 selon le nombre de plis traversés par l'organe de fixation, incluant le plan de cisaillement métal-bois.	

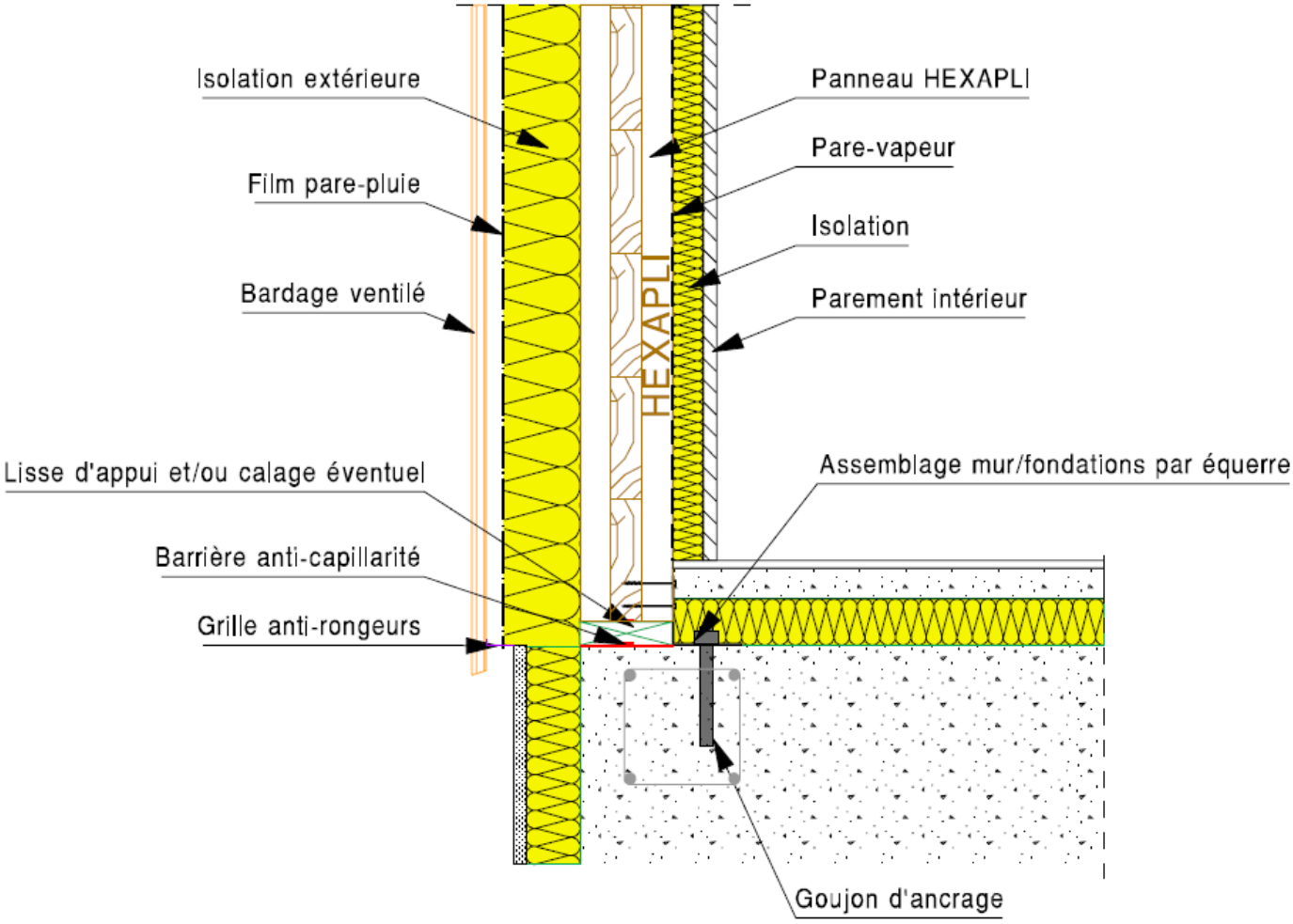


Figure 29 : Coupe verticale appui de mur isolé sur support béton avec bardage ventilé

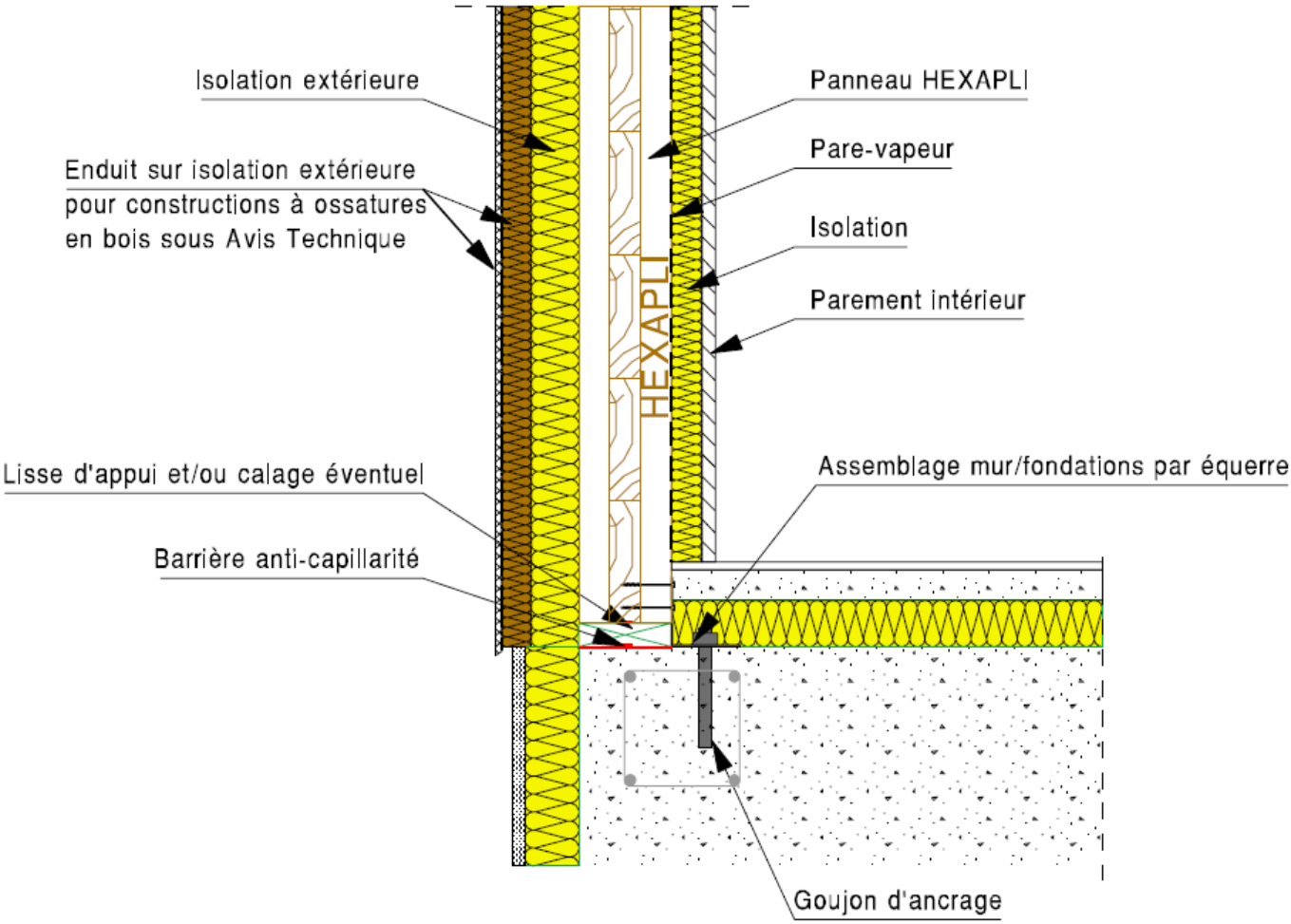


Figure 30 : Coupe verticale appui de mur isolé sur support béton avec enduit sur ITE

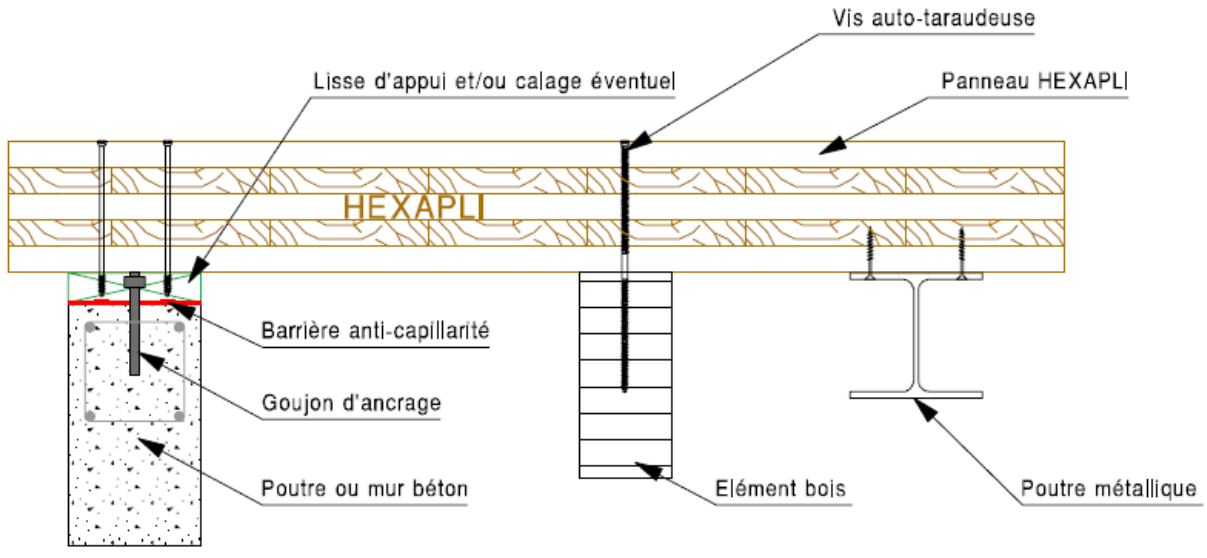


Figure 31 : Appuis usuels sur support béton, bois ou métallique

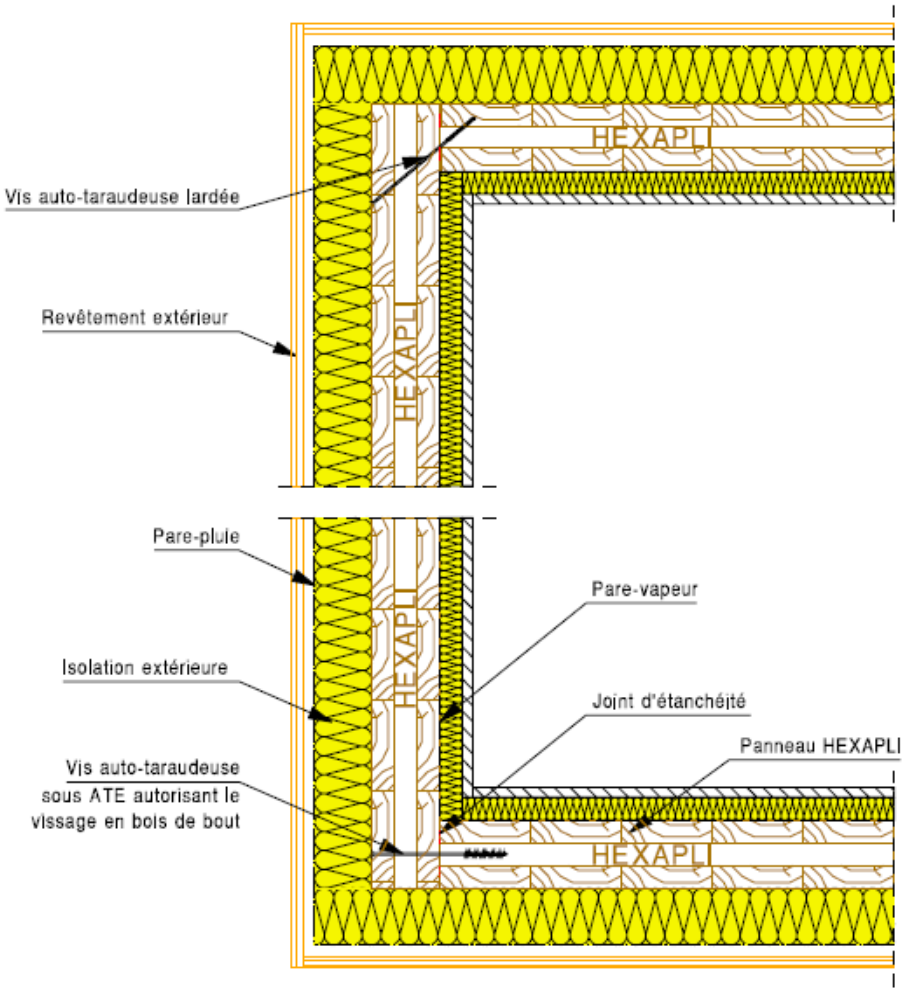


Figure 32 : Coupe horizontale sur angle de murs extérieurs

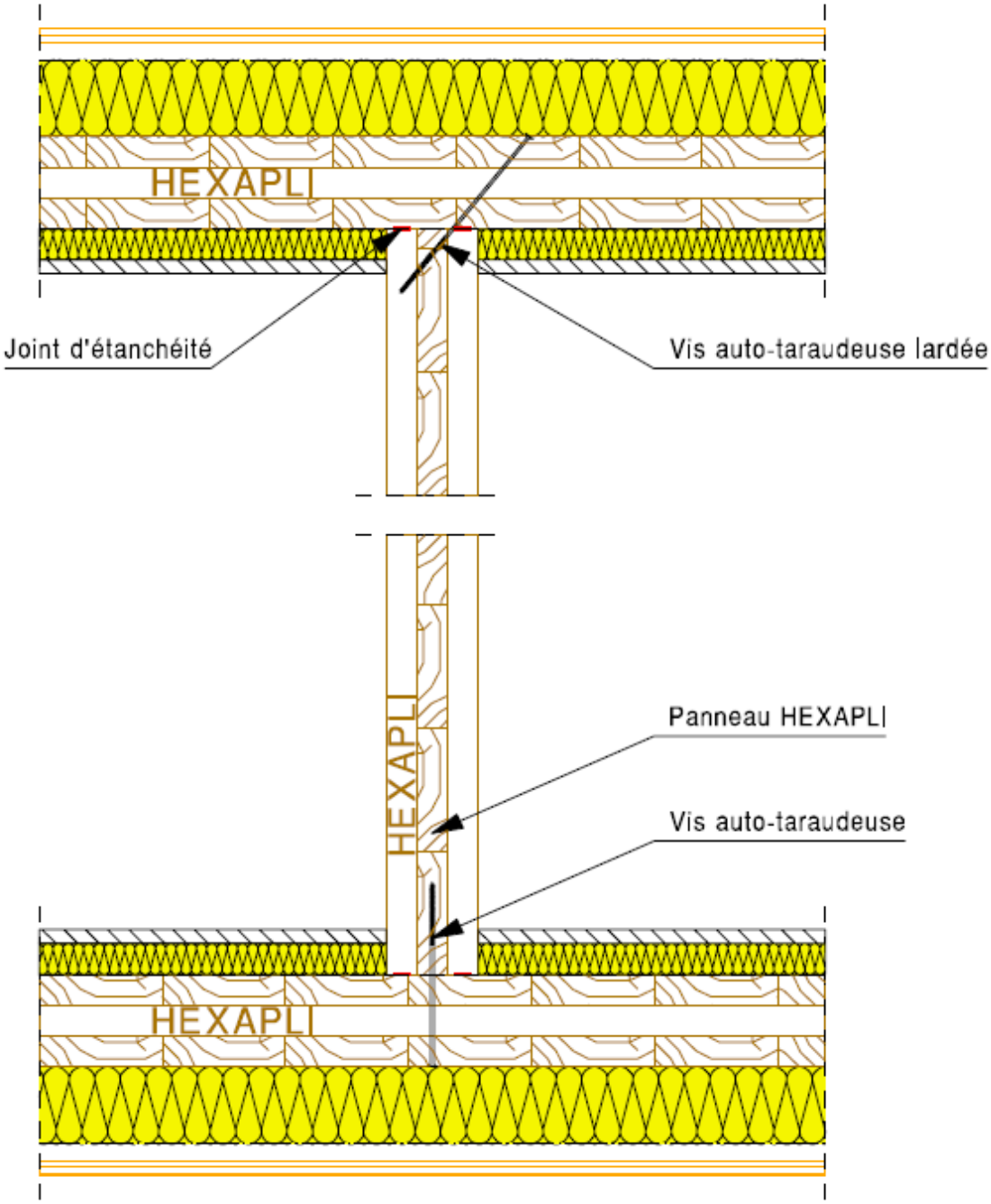


Figure 33 : Coupe horizontale sur liaison mur extérieur/mur de refend

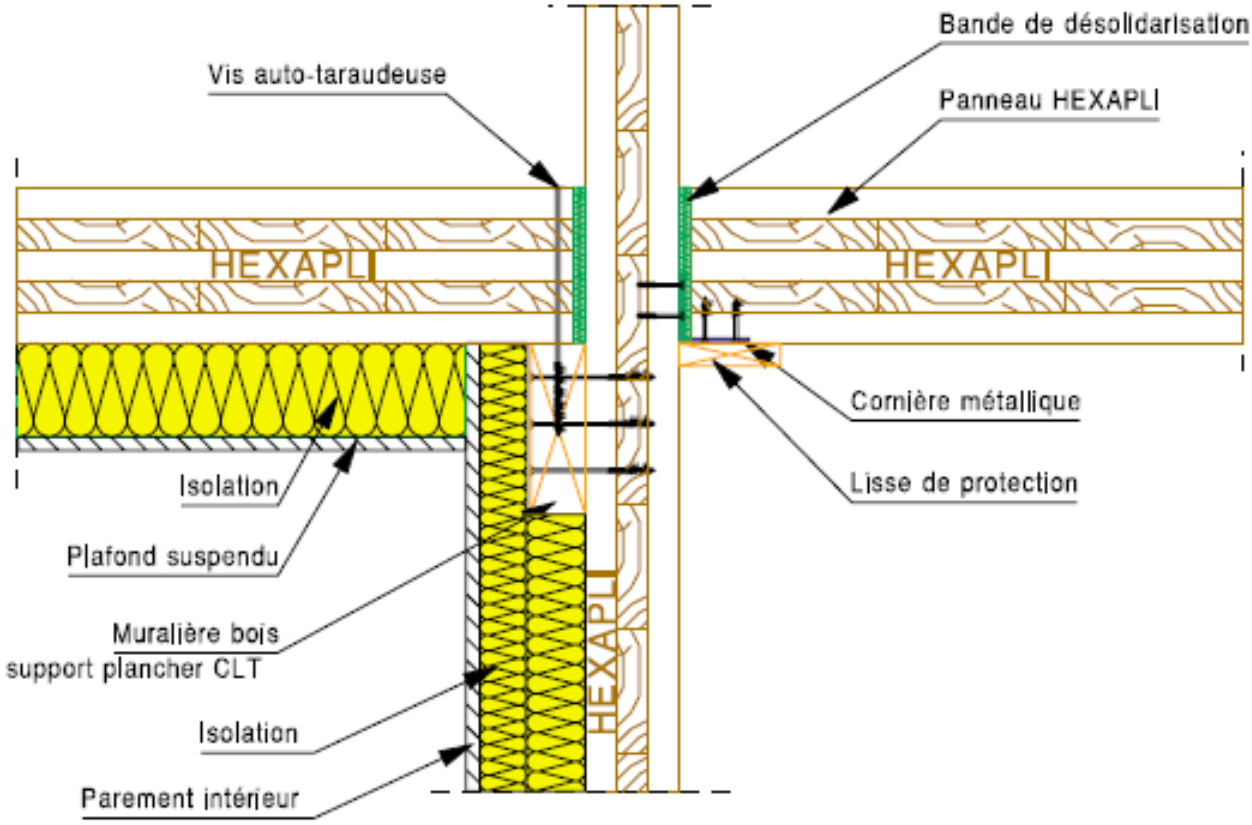


Figure 34 : Coupe verticale appuis de plancher sur mur filant

(appui sur cornière métallique à droite et sur muraillère à gauche)

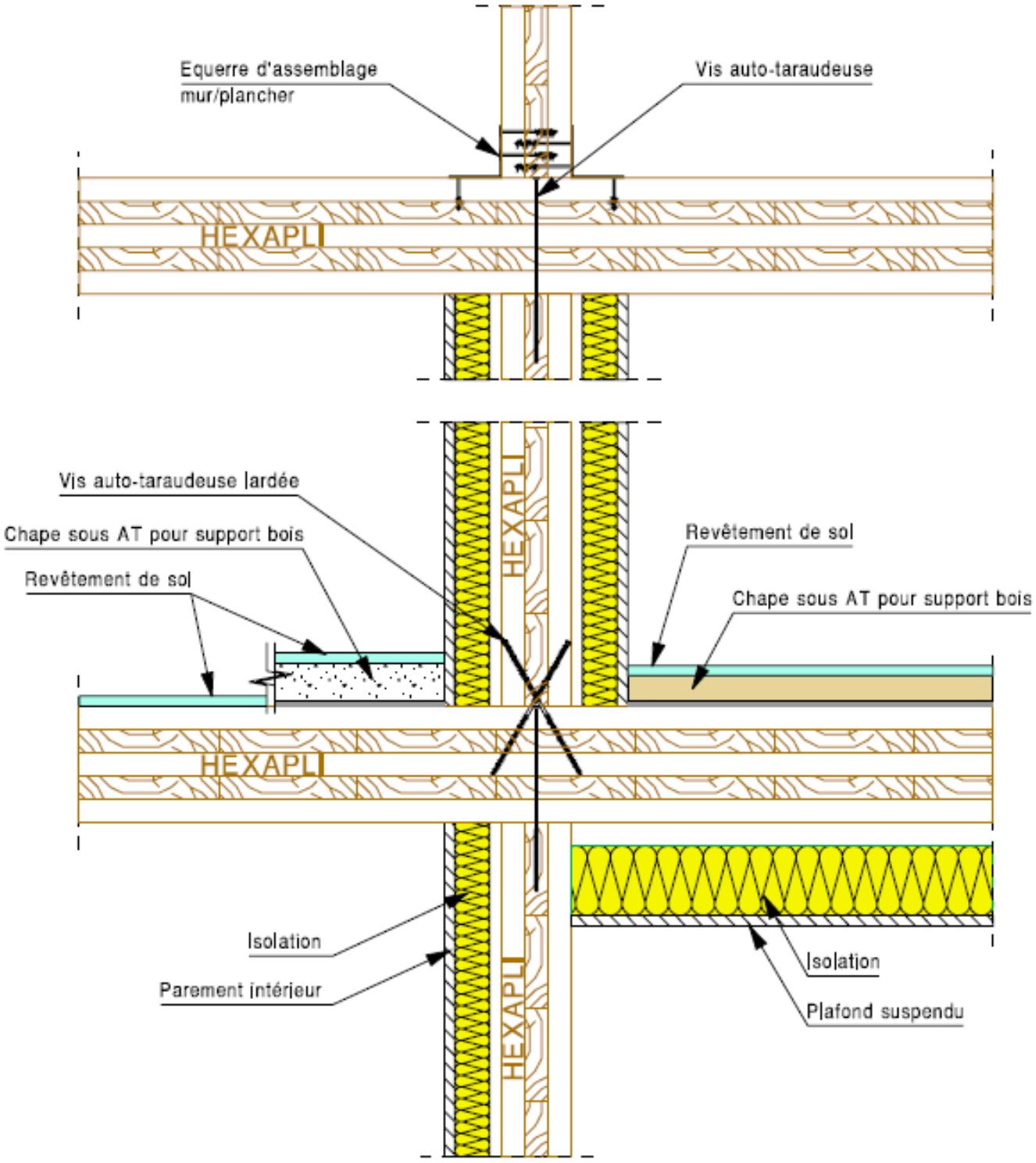
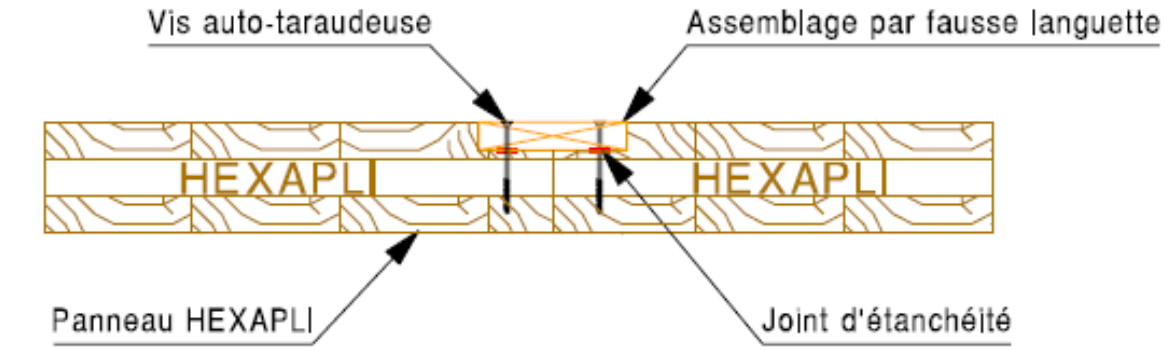


Figure 35 : Coupe verticale appui de plancher filant sur mur CLT



NB: La fausse-languette peut également être mise en oeuvre sur les panneaux sans feuillure

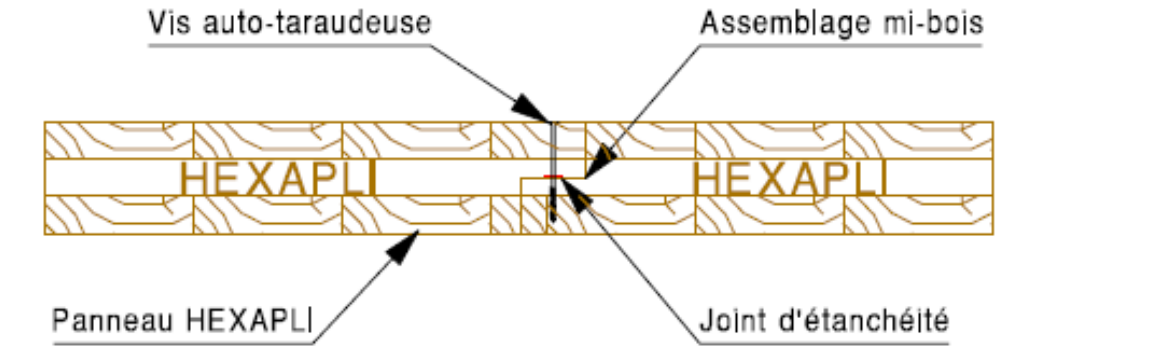
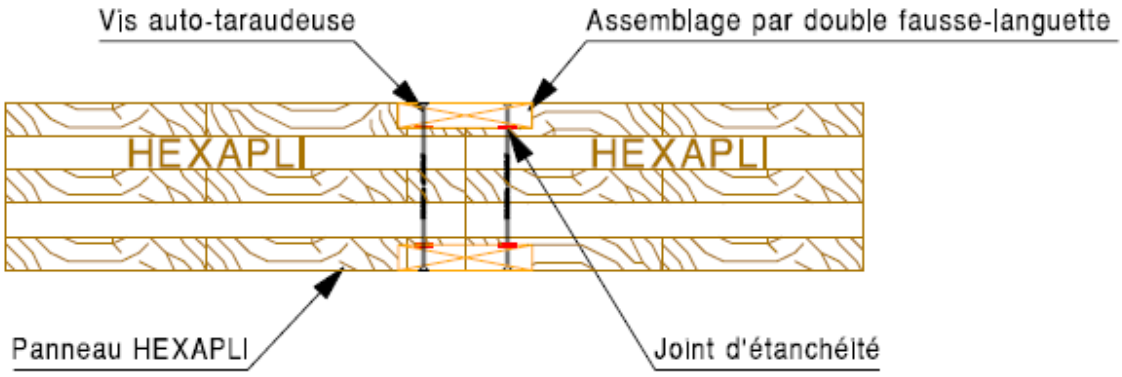
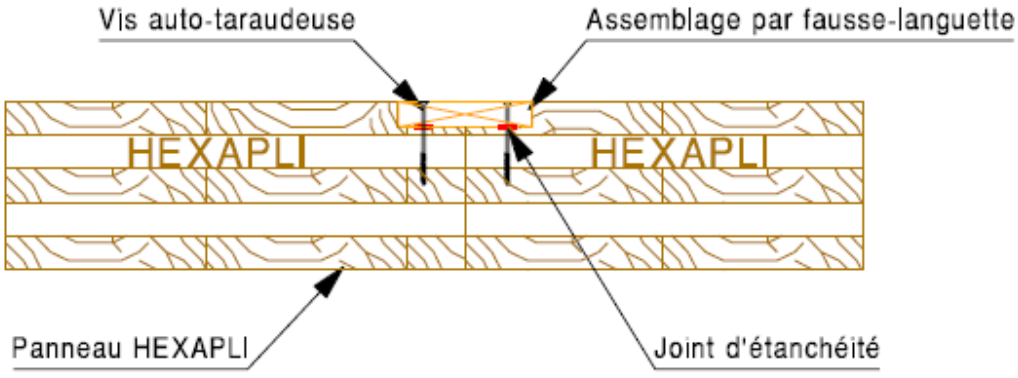


Figure 36 : Coupe horizontale sur jonction de murs





NB: La fausse-languette peut également être mise en oeuvre sur les panneaux sans feuillure

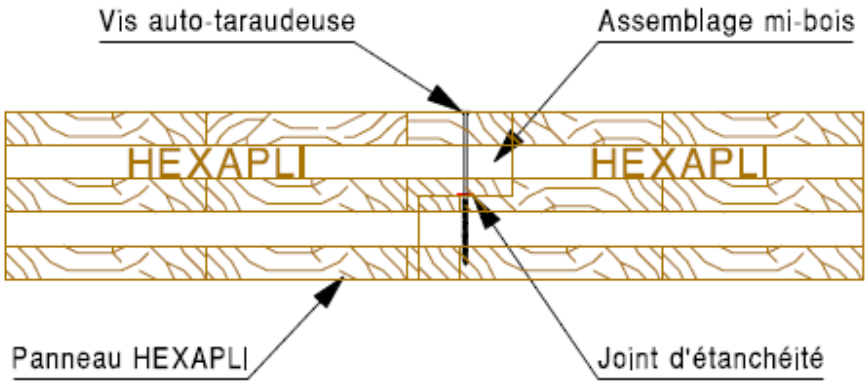


Figure 37 : Coupe verticale sur jonction de planchers

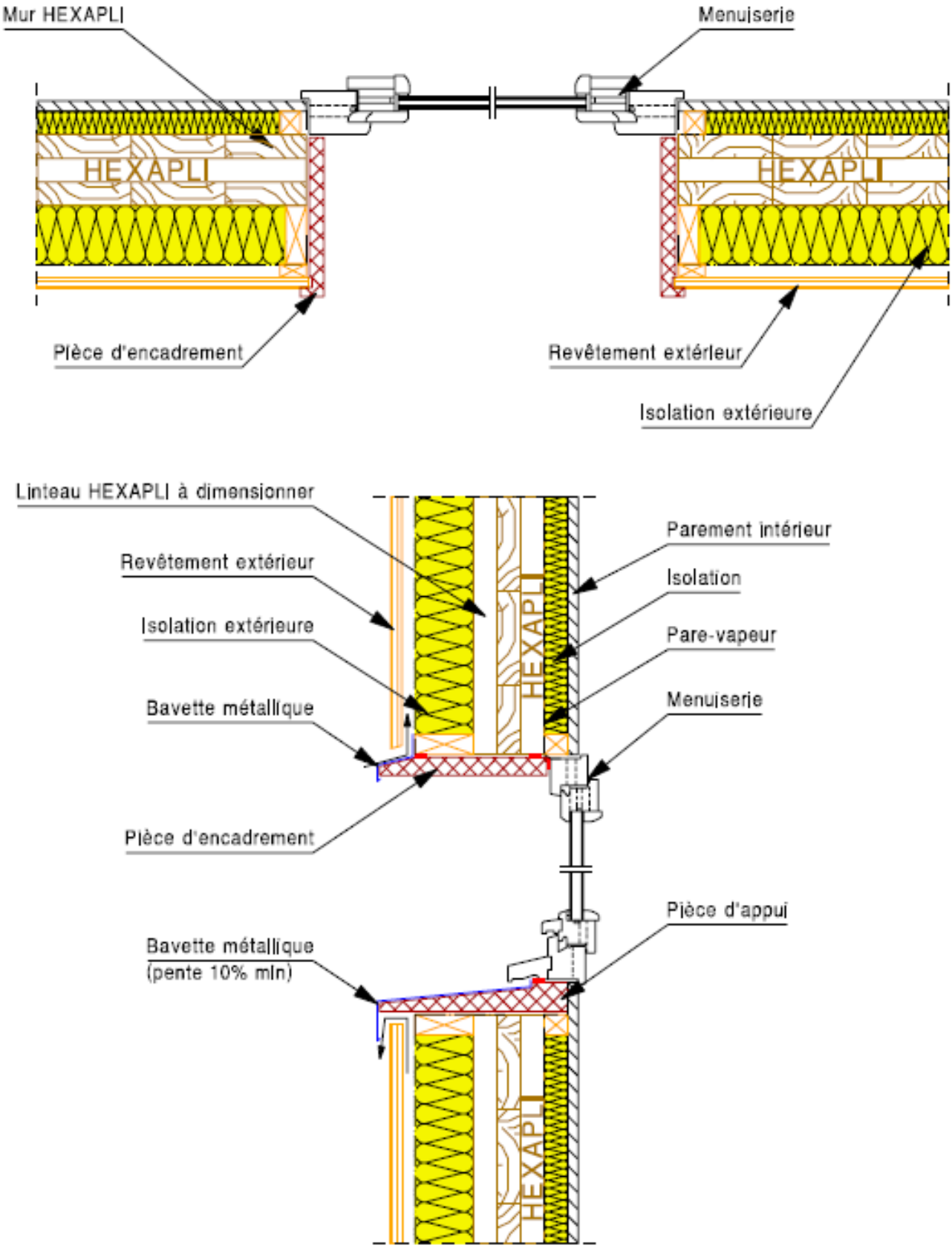
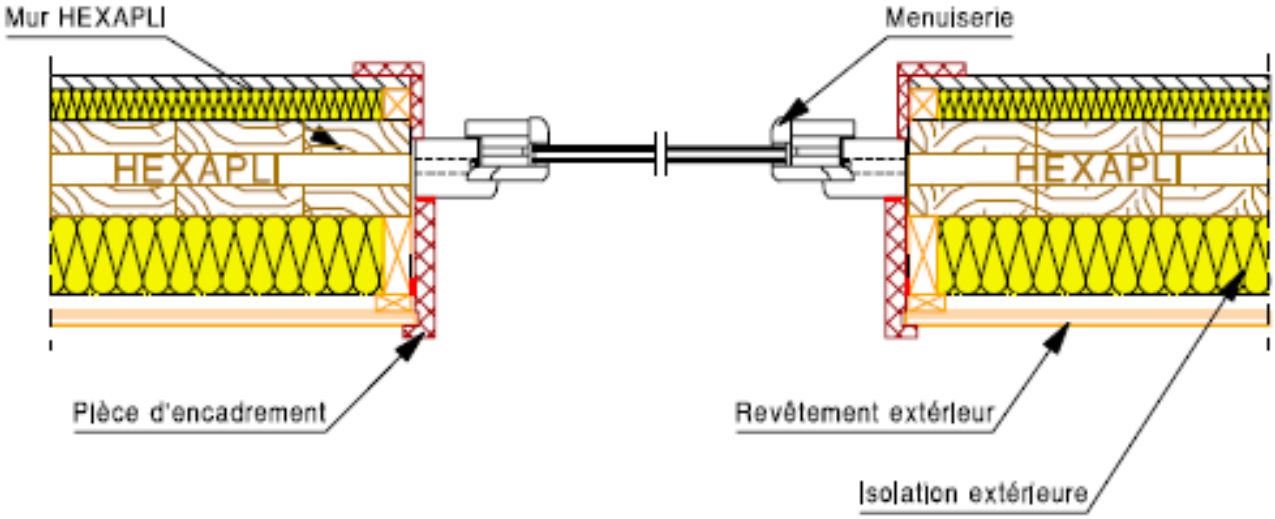


Figure 38 : Détail d'intégration des menuiseries extérieures – Pose en applique intérieure



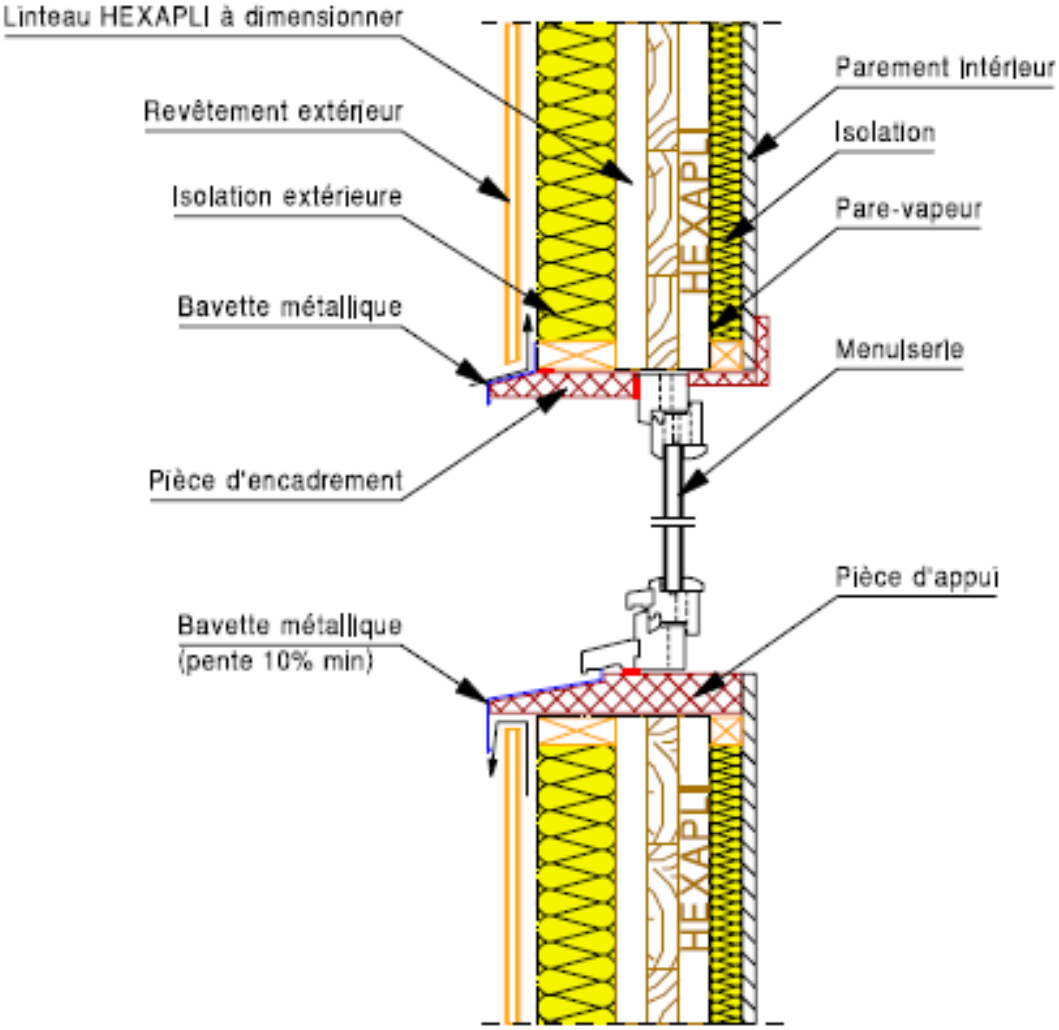


Figure 39 : Détail d'intégration des menuiseries extérieures – Pose en tunnel