

Ponts mixtes bois/béton à poutres en lamellé-collé



Guide de conception

Ponts mixtes bois/béton à poutres en lamellé-collé



L'ouvrage est une œuvre collective réalisée sous la direction du Cerema

Ont participé à la rédaction de ce guide puis à sa relecture :

- Jean-François BOCQUET (ENSTIB Épinal)
- Vincent BRUN (Cerema Est)
- Pierre CORFDIR (DIR Est/SOA puis Cerema Infrastructures de transport et matériaux)
- Cyril DOUTHE (IFSTTAR/MAST)
- Philippe JANDIN (Cerema Infrastructures de transport et matériaux)
- Thierry KRETZ (IFSTTAR/MAST)
- Robert Le ROY (IFSTTAR/ENPC/Laboratoire Navier)
- Fabien RENAUDIN (Cerema Est)

Ont également contribué au groupe de travail à l'origine de ce guide :

- Paul ALLÈGRE (ex-LRPC Nancy)
- Nadjwa BOUDALI (Cerema Est)
- Jean-Yves JOINEAU (Cerema Est)
- Noël ROBERT (ex-Cerema Infrastructures de transport et matériaux)

Réalisation des illustrations hors mention spécifique :

- Gérald PAGNEUX (Cerema Est)

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. *Ponts mixtes bois/béton à poutres en lamellé-collé*

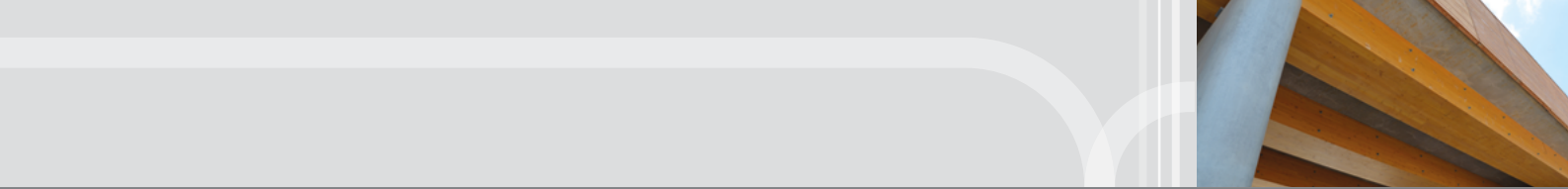
Bron : Cerema, 2019. Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-413-5

Sommaire

Avant-propos	5
Introduction	7
Partie 1 - Présentation générale de l'ouvrage et choix des essences de bois	8
1 - Description générale de la structure	8
1.1 - Géométrie globale	8
1.2 - Coupe transversale	9
1.3 - Coupe longitudinale	11
1.4 - Connexion bois/béton	12
1.5 - Gabarit sous tablier	13
1.6 - Appuis	13
1.7 - Domaine d'emploi	14
1.8 - Spécificités de la solution technique du tablier à poutres en bois	14
1.9 - Généralités sur le fonctionnement du tablier	15
2 - Choix des essences bois pour la durabilité	16
2.2 - Généralités sur le choix des essences pour les structures en bois lamellé-collé	16
2.2 - Essences courantes pour les structures en bois lamellé-collé	17
2.3 - Durabilité en service des bois mis en œuvre	18
2.4 - Proposition d'essences pour les bois des nervures du pont	25
Partie 2 - Conception et exécution de l'ouvrage	26
1 - Commande du maître d'ouvrage	26
1.1 - Durée d'utilisation de projet	26
1.2 - Classes d'exposition pour le béton	26
1.3 - Données permettant la détermination de la classe d'emploi et de la classe de service des bois mis en œuvre	27
1.4 - Exigences pour la maintenance et la gestion en fin de vie	28
1.5 - Classe de trafic	28
1.6 - Neige, vent et séisme	28
1.7 - Exigences de tenue au feu	29
2 - Adaptation de la géométrie générale du tablier aux caractéristiques du tracé	29
2.1 - Profil en long	29
2.2 - Implantation des appuis	29
2.3 - Schéma statique longitudinal	29
2.4 - Gabarits	30
2.5 - Dévers	30
2.6 - Incidences de la courbure et du biais	31
3 - Conception du tablier	32
3.1 - Matériaux	32
3.2 - Dispositions pour la protection des nervures en bois en phase transitoire de construction	42
3.3 - Conception des nervures en bois	42
3.4 - Conception de la connexion	44
3.5 - Conception du hourdis	46



4 - Conception sur appuis	53
4.1 - Conception sur culées	53
4.2 - Conception sur piles	56
4.3 - Appareils d'appui et vérinage	58
4.4 - Conception des fondations	60
5 - Équipements	61
5.1 - Dispositifs de retenue	61
5.2 - Étanchéité	61
5.3 - Assainissement	62
5.4 - Corniches	62
6 - Esthétique	63
6.1 - Silhouette générale	64
6.2 - Perception de détail	64
7 - Exécution de l'ouvrage	67
7.1 - Étapes globales de fabrication	67
7.2 - Détail de l'exécution	67
Bibliographie	75
Normes et fascicules de documentation	75
Guides	77
Autres textes	77
Glossaire	78
Sigles, acronymes et abréviations	78
Définitions	78
Annexe	81
Exemples de réalisation de ponts mixtes bois/béton	81



Avant-propos

Le succès des matériaux industriels comme l'acier et le béton a quelque temps éclipsé l'intérêt de ce matériau naturel aux caractéristiques mécaniques pourtant bien intéressantes qu'est le bois. Il convient aujourd'hui de remettre en évidence les qualités de ce matériau et surtout les bonnes dispositions constructives qui gouvernent la durabilité des ouvrages. Le matériau bois doit retrouver dans le domaine de la construction toute sa place, notamment dans le domaine des ponts routiers.

Le guide propose une association heureuse du bois et du béton. Le béton, qui a une excellente aptitude à travailler en plaque, sert de support à la couche de roulement, mais aussi de protection contre l'eau aux poutres en bois. Le bois est utilisé de manière efficace avec des nervures porteuses en lamellé-collé, technique qui permet d'adapter facilement les caractéristiques des nervures aux besoins.

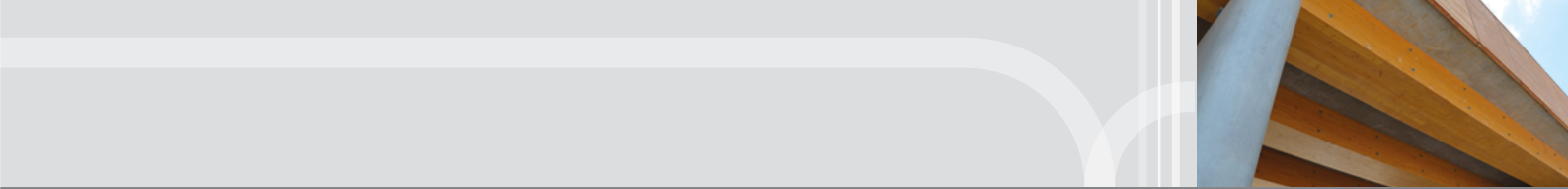
Dans la lignée des documents publiés par le Cerema, ce document a été rédigé pour guider le concepteur dans toutes les étapes du projet depuis la conception générale jusqu'à la conception détaillée. Le présent guide aborde la conception d'une structure innovante qui a fait l'objet de quelques expérimentations sur ouvrages réels.

Ce document s'applique à des ouvrages implantés en France métropolitaine. Pour des projets en départements ou collectivités d'outre-mer, des adaptations seront nécessaires, notamment pour ce qui concerne le choix des essences de bois, pour prendre en compte les spécificités du site et la disponibilité locale.

Ce type d'ouvrage peut porter des voies routières sans limitation particulière de tonnage. Toutefois, on exclura, dans l'attente d'un retour d'expérience plus exhaustif, les axes stratégiques et notamment les axes autoroutiers.

En accompagnement, le Cerema publie un guide méthodologique « Eurocode 5 – Application aux ponts-routes à tablier mixte bois/béton en poutres en lamellé-collé » [45] de justification des parties d'ouvrages en bois et de la connexion bois/béton conçu selon les recommandations du présent document.

Cet ensemble de guides vise *in fine* à proposer un corpus complet, abordant la conception, les prescriptions et les justifications, qui permet une collaboration fructueuse et sécurisée entre maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'études et entreprises.



Introduction

Les ponts en bois sont peu nombreux en France et la plupart sont des œuvres d'art uniques. Ils sont spécifiquement adaptés à leur site et ne peuvent guère être répliqués en série pour constituer le support d'un réel développement des ponts en bois en France. Une structure reproductible en grande série, économique et fiable, est nécessaire pour promouvoir l'usage du bois. C'est l'objet de ce guide qui vise à donner à tous les acteurs une approche partagée sur les choix techniques principaux à retenir.

Le bois est un matériau moderne car il est une ressource renouvelable, stocke le carbone et offre de bonnes caractéristiques mécaniques. Sur le plan esthétique, il offre un matériau naturel et chaleureux très apprécié. Le coût du bois rend son emploi compétitif, et le choix de bonnes dispositions constructives et d'essences adaptées permettent des structures durables sans entretien particulier.

Le guide reprend donc l'esprit des dossiers pilotes du Sétra concernant les ouvrages courants. Le choix de conception s'est porté sur un pont à nervures sous chaussée en vue de proposer une structure simple et classique, utilisant des matériaux aisément disponibles (poutres bois en lamellé-collé standard, béton armé coulé en place ou préfabriqué) et avec des exigences de mise en œuvre limitées afin de rendre sa construction accessible à des entreprises de taille moyenne.

La conception de l'ouvrage a été imaginée de manière à rendre l'interface entre deux professions, le monde du béton et le monde du bois, la plus simple possible. Dans cette conception, le bois est mis à l'abri en service par la présence de la dalle béton dont l'encorbellement doit être suffisamment large pour assurer une protection des bois optimale vis-à-vis des intempéries.

Afin de faire travailler au mieux le bois et le béton, la mixité de la structure est recherchée par l'intermédiaire d'une connexion partielle. La conception de cette connexion s'est nourrie des travaux réalisés dans le cadre du projet NR2C – State of the art review – A vision of new bridges [57] et d'essais spécifiques réalisés dans le cadre de l'élaboration du présent document.

Le guide traite essentiellement de la conception du tablier, il donne néanmoins des détails sur les dispositions à adopter sur les appuis de l'ouvrage (culées et piles). Le principe général retenu pour la conception des culées est celui d'une conception semi-intégrale afin de garantir un environnement sain aux abouts des poutres.

Ce guide aborde la conception générale puis de détail du pont en précisant des éléments de prédimensionnement, en orientant les choix de conception et le cas échéant en proposant des dispositions constructives. Il est composé des deux parties suivantes :

Partie 1 : Présentation générale de l'ouvrage et choix des essences de bois, qui fournit les données caractéristiques de l'ouvrage, son domaine d'emploi, ses avantages et inconvénients et précise les éléments de choix des essences de bois.

Partie 2 : Conception et exécution de l'ouvrage, qui présente les choix essentiels de la commande du maître d'ouvrage, les éléments généraux de conception conférant à l'ouvrage ses qualités fonctionnelles, économiques et esthétiques et qui détaille la conception de la dalle (hourdis et retombée de dalle), de la poutraison (nombre de nervures, élanement, disposition), de la connexion et des appuis. Le dernier chapitre est consacré à l'exécution du tablier, il présente les différentes phases et précautions à observer de la fabrication en usine jusqu'à la pose.

Partie 1

Présentation générale de l'ouvrage et choix des essences de bois

1 - Description générale de la structure

1.1 - Géométrie globale

Le tablier du pont à ossature mixte bois/béton présenté ici résulte de l'association de poutres massives porteuses en bois lamellé-collé, dénommées « nervures », connectées via une plaque métallique de transition, à une dalle en béton qui sert de hourdis et reçoit la chaussée (figure 1 et photos 1 et 2). Le fonctionnement mécanique de l'ensemble met en jeu à l'interface une connexion qui n'apporte cependant pas une connexion totale sans glissement.

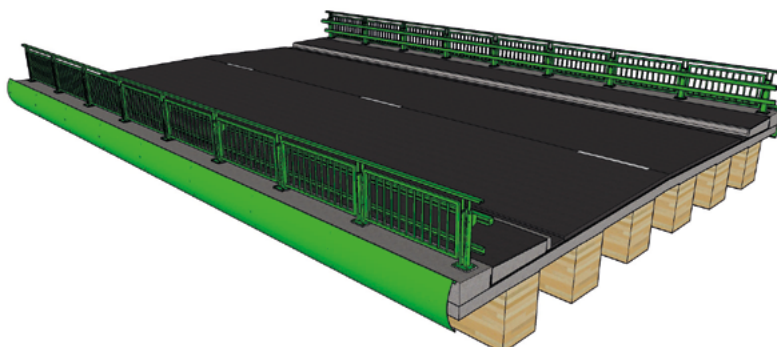


Figure 1 : Vue générale du tablier à nervures sous chaussée



Photos 1 et 2 : Exemple de pont mixte bois – béton à nervures sous chaussée – PS12 de la RN19 – Mise à 2x2 voies de la section Amblans – Lure (Sources : Cerema)

Ce pont est essentiellement destiné à des franchissements à une seule travée pour une **portée allant de 10 à 20 m maximum**. Il retient le principe d'une conception semi-intégrale des culées, ce qui signifie la présence d'appareils d'appui sous les nervures, mais la suppression des joints de chaussée.

Il est possible d'employer ce concept sur des franchissements à plusieurs travées d'une **longueur totale pouvant atteindre 35 à 40 m au maximum tout en assurant une continuité des nervures**, ce qui permet de répondre à la grande majorité des franchissements. Cette limite correspond en effet à la limite haute des possibilités de fabrication des poutres en lamellé-collé et également aux longueurs maximales facilement transportables par convois exceptionnels. Cette limitation de longueur autorise la réalisation de ponts semi-intégraux continus en maîtrisant l'importance des déplacements aux extrémités des tabliers.

L'assemblage mécanique de tronçons de nervures doit, dans la mesure du possible, être évité. La conception d'un tel assemblage est particulièrement complexe et nécessite des études approfondies qui ne sont pas abordées dans le cadre du présent guide.

La juxtaposition de travées isostatiques reliées entre elles par une continuité du hourdis (comme cela est, par exemple, pratiqué pour les PRAD¹) est possible, mais le guide n'aborde pas cette disposition disgracieuse qui nécessiterait un dédoublement des lignes d'appui sur pile et la conception d'un chevêtre en tête de pile particulièrement large.

Quelques réalisations de tabliers mixtes bois/béton connectés selon les dispositions du présent guide sont présentées en annexe.

1.2 - Coupe transversale

Le tablier est constitué d'éléments longitudinaux porteurs, les **nervures en bois**, reliés transversalement par une dalle béton armé régnant sur toute la longueur de la travée, le **hourdis**.

Les nervures en bois sont des poutres massives en **bois lamellé-collé** obtenues par recollage de poutres unitaires (photos 3 et 4). Elles présentent une largeur du même ordre de grandeur que la hauteur. La nervure massive offre une meilleure garantie de protection du bois vis-à-vis des attaques biologiques, une meilleure résistance au choc et une meilleure stabilité vis-à-vis du déversement qu'une poutre élancée. Cette solution permet de renforcer plus aisément le bois vis-à-vis de la résistance en compression perpendiculaire dans les zones d'introduction d'efforts (réactions d'appui).



Photos 3 et 4 : Exemple de nervures en bois assemblées par collage de poutres unitaires
(À gauche : Source Cerema, à droite : source Nice Côte d'Azur Métropole)

¹ PRAD = Ponts-routes à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence.



Pour ces nervures, les options à gérer concernent principalement leur section, leur nombre et leur espacement :

- **section des nervures** : les nervures sont de hauteur constante, comprise entre 0,80 et 1,20 m environ (élancement autour du 1/15°), la largeur des nervures varie environ de 0,80 m dans les cas courant à 1,2 m de façon exceptionnelle, cette largeur proche de la hauteur permet d'assurer leur stabilité en torsion ;
- **position de la nervure de rive** : la nervure de rive doit être positionnée de manière à lui assurer un environnement hydrique sain, c'est-à-dire protégé des pluies les plus fréquentes et pour cela, un encorbellement est ménagé en rive de tablier permettant d'abriter la nervure jusqu'à des inclinaisons de pluie de 45° sur l'horizontale (figure 2). La largeur de l'encorbellement varie donc de 0,8 à 1,20 m pour des portées allant de 10 à 20 m ;

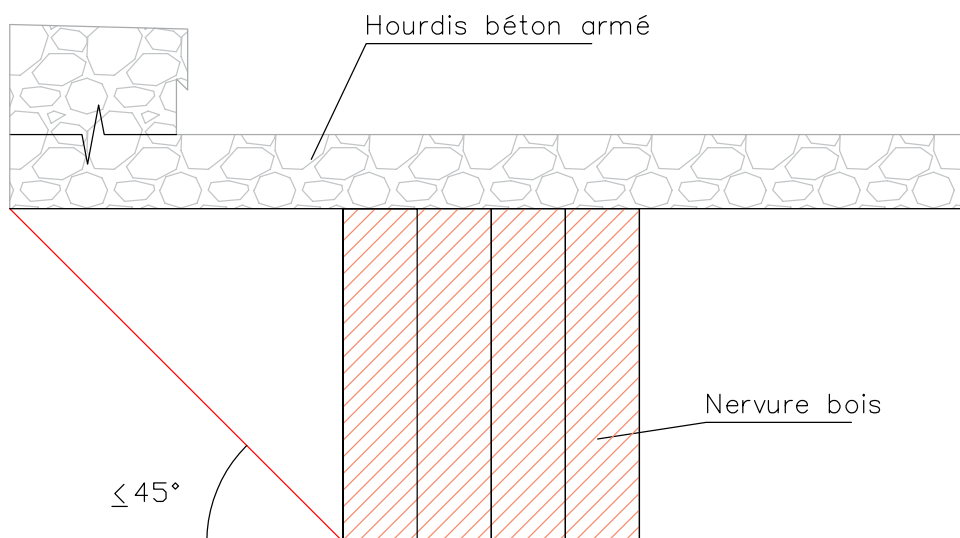


Figure 2 : Principe de protection des nervures de rive contre les pluies fréquentes

- **nombre de nervures** : ce choix est lié à la section retenue pour les nervures et à la largeur du tablier ; l'espacement entre nervures est de l'ordre de 2 mètres entre axes et le nombre de nervures varie environ de 3 pour une largeur de tablier de 6 mètres à 6 nervures pour une largeur de 12 mètres.

Pour la dalle en béton, on retient la conception d'un hourdis général en béton armé classique au-dessus des nervures. **L'épaisseur du hourdis est de l'ordre de 20 à 25 cm**, cette épaisseur peut notamment être dictée par l'intensité des efforts apportés par le dispositif de retenue ancré en rive sous l'action accidentelle de choc. Le hourdis peut être coulé en place, le vide entre les nervures étant obturé par un coffrage, ou bien faire l'objet d'une préfabrication totale ou partielle.

Dans tous les cas et plus particulièrement dans le cas du hourdis coulé en place où la durée d'exposition liée au temps de pose du ferrailage est susceptible d'être plus longue, des dispositions particulières doivent être prises pour protéger le bois des intempéries en phase transitoire de construction du tablier et pour limiter l'exposition à l'humidification lors du coulage du béton.

À noter que la largeur d'encorbellement pourra être diminuée si l'implantation et la géométrie des corniches contribuent à la protection des nervures. Dans ce cas, les dispositions retenues à l'origine devront être conservées pendant la vie de l'ouvrage et le remplacement d'éléments de corniches endommagés revêtira une importance toute particulière.

Le respect du dévers transversal de la chaussée est assuré par la différence d'altitude entre nervures (figure 3).

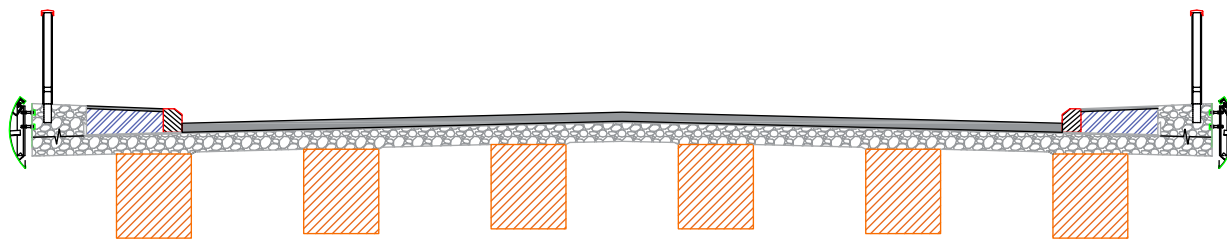


Figure 3 : Exemple de coupe transversale de tablier

Aucune entretoise entre nervures n'est envisagée ; ce choix est fait dans un souci de simplification, pour éviter des assemblages et des pièces secondaires susceptibles de nécessiter un entretien ultérieur.

Pour les ponts à poutres sous chaussée, le rôle mécanique des entretoises est de contribuer à la répartition des charges entre les poutres et d'assurer leur encastrement vis-à-vis de la torsion sur appuis. Cette hypothèse d'encastrement en torsion sur appui est celle généralement retenue par les méthodes classiques de calcul de répartition transversale.

Ici, pour garantir la stabilité en torsion des poutres sur appui, des poutres massives sont adoptées (dimension de la largeur proche de celle de la hauteur), elles disposent en outre d'une importante surface d'appui. Cette surface d'appui est offerte par deux appareils d'appui en caoutchouc fretté disposés transversalement sous chaque extrémité de nervure. La connexion des nervures au hourdis sur leur face supérieure, hourdis lui-même encastré à la torsion sur appui par une retombée de dalle, permet de compléter le dispositif.

Compte tenu de la longueur de franchissement visée, il n'apparaît pas nécessaire d'envisager un système d'entretoisement intermédiaire.

1.3 - Coupe longitudinale

Les nervures en bois lamellé-collé peuvent s'intégrer dans tout type de profil en long routier (figure 4). Elles sont fabriquées, comme c'est le cas pour les poutres en acier des ponts à ossature mixte acier/béton, avec une contre-flèche de fabrication permettant d'ajuster la géométrie sous charges permanentes de l'ouvrage.

Leur élancement dépend des sollicitations et du choix fait sur leur section et leur espacement, il est de l'ordre de 1/15°.

Longitudinalement, le monolithisme des nervures est recherché (absence d'assemblage de tronçons de nervure).

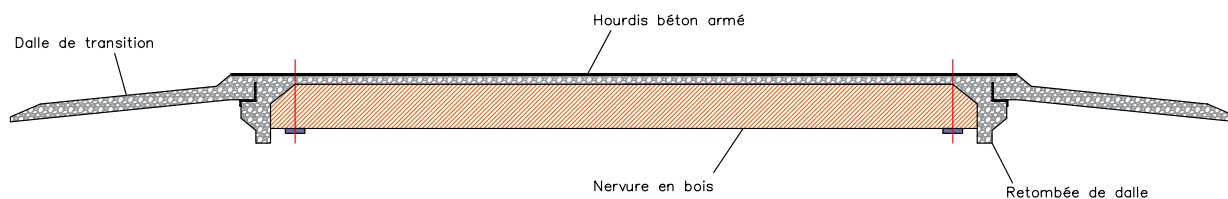


Figure 4 : Coupe longitudinale de principe du tablier



1.4 - Connexion bois/béton

La connexion envisagée pour le tablier (figure 5) est constituée d'une **plaque d'interface en acier** liaisonnée aux nervures par l'intermédiaire de **tirefonds**, qui sont des vis présentant généralement une partie lisse et une partie filetée (photo 5). Cette plaque est équipée sur sa face supérieure de **goujons**, organes de connexion classiques des tabliers mixtes acier/béton, assurant la connexion avec la dalle béton (photo 6). Les plaques peuvent être ponctuelles ou continues sur une certaine longueur, la continuité pouvant le cas échéant être prise en compte dans la résistance du pont.

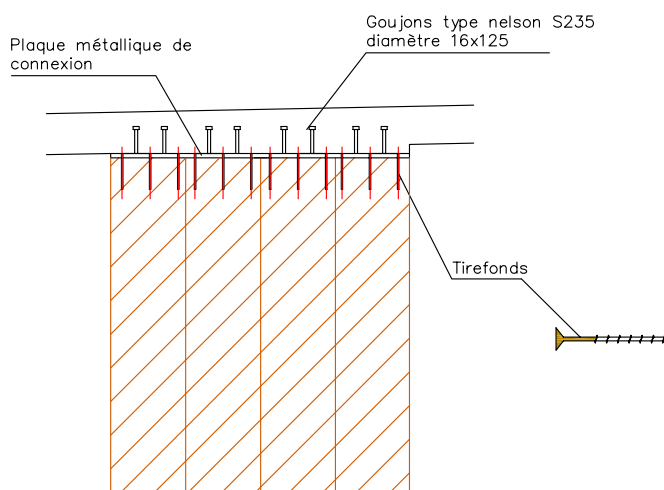


Figure 5 : Principe de la connexion bois/béton envisagée



Photo 5 : Connexion bois/béton en cours d'assemblage (Source : Arbonis)

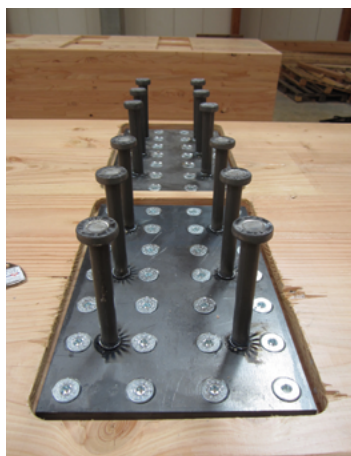


Photo 6 : Connexion bois/béton avec plaque engravée dans la nervure en bois (Source : Arbonis)

Nota : d'autres types de connexion bois/béton peuvent être envisagés pour reprendre les glissements à l'interface des deux matériaux et pour s'opposer à un certain niveau de traction s'exerçant suivant la normale au plan de connexion. Le système envisagé doit pouvoir être justifié selon les Eurocodes ou présenter des résultats d'essais probants permettant d'assurer son dimensionnement. Ce système doit offrir une durabilité suffisante au regard de la durée de vie attendue pour l'ouvrage et de son exposition et présenter un comportement satisfaisant sous sollicitations cycliques. Pour plus d'informations le lecteur pourra se reporter aux références suivantes :

- Guide pour la conception des Ouvrages d'Art en Bois – AFGC – Février 2013 [50]
- Timber-Concrete Composite Bridges : State-of-the-Art Review – J. N. Rodrigues, AMPG Dias, P. Providencia – Bioresources – Novembre 2013 [56]

1.5 - Gabarit sous tablier

Le gabarit sous l'ouvrage doit permettre de satisfaire *a minima* aux deux exigences suivantes :

- exigence de **résistance au choc** réglementaire dans le cas d'un ouvrage situé au-dessus d'une voie circulée : le gabarit conditionne l'intensité du choc réglementaire à prendre en compte pour le dimensionnement ;
- exigence de **durabilité des bois** : le gabarit influe sur le niveau d'exposition à l'humidification des nervures en bois et sur l'importance des phénomènes de condensation (ouvrage au-dessus d'un point d'eau, exposition aux embruns soulevés par les véhicules routiers et potentiellement chargés de sels de déverglaçage, etc.).

Les dispositions à prendre en compte vis-à-vis des contraintes liées au gabarit sont précisées dans la partie 2, « Conception et exécution de l'ouvrage ».

1.6 - Appuis

L'appui du tablier se fait sous les nervures en bois tant en service que pour les phases de vérinage.

Il convient de distinguer :

- les appuis intermédiaires qui reçoivent les efforts essentiellement verticaux apportés par le tablier ;
- les appuis d'extrémité qui assurent en plus la jonction entre l'ouvrage et ses accès.

1.6.1 - Appuis d'extrémité

Compte tenu des longueurs d'ouvrages envisagées, le recours à une **culée semi-intégrale** (suppression des joints de chaussée) est privilégié (photo 7). Cette disposition offre une protection optimale pour l'about des poutres en évitant toute venue d'eau. Une retombée de dalle encastrée dans le hourdis est ainsi réalisée en semi-indépendance avec la face verticale de l'about des nervures de façon à éviter le bridage vis-à-vis des déformations hydriques. Un gousset vient renforcer la jonction hourdis/retombée de dalle qui est sollicitée par la réaction des terres à son contact. Cette retombée reçoit également le cas échéant l'appui d'une dalle de transition. Pour des ponts supportant un faible trafic et pour des portées inférieures à une quinzaine de mètres, il peut être envisagé de supprimer la dalle de transition.



Photo 7 : Culée semi-intégrale avec retombée de dalle reliée par un gousset au hourdis (Source : Cerema)

L'appui est essentiellement constitué d'un chevêtre surmontant le système de fondation et de murs assurant le soutènement latéral des terres. Pour favoriser la ventilation des zones d'appui, les extrémités du chevêtre ne sont pas équipées de murs masques.



1.6.2 - Appuis intermédiaires

La typologie du tablier impose soit la présence d'un chevêtre soit le recours à des piles à voiles multiples offrant chacun un appui à une nervure (photo 8).



Photo 8 : Exemple de pile intermédiaire (Source : Cerema)

La tête de pile doit ainsi pouvoir recevoir les appareils d'appui et les bossages de vérinage positionnés sous les nervures de part et d'autre des appareils d'appui dans le sens longitudinal du tablier.

1.7 - Domaine d'emploi

Le type d'ouvrage développé dans le présent guide doit permettre indifféremment la réalisation de franchissements :

- en passage inférieur, quand l'ouvrage doit porter la voie nouvelle ;
- en passage supérieur, quand l'ouvrage doit permettre un rétablissement de communications.

Ce type d'ouvrage peut porter des voies routières sans limitation particulière de tonnage. Toutefois, on exclura, dans l'attente d'un retour d'expérience plus complet, les axes stratégiques et notamment les axes autoroutiers.

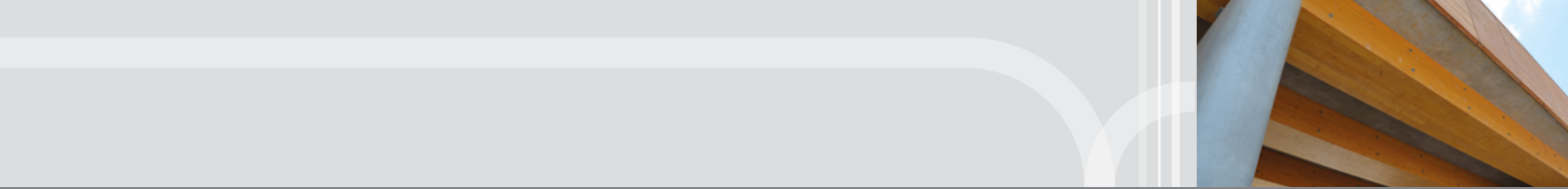
Son **domaine d'utilisation privilégié** se situe dans une **gamme de portée principale** comprise entre **10 et 20 m** et sa largeur est typiquement comprise entre 6 et 12 m environ.

La largeur du tablier n'est pas un problème puisqu'il suffit de juxtaposer le nombre de nervures suffisant pour parvenir à la largeur souhaitée. Il convient cependant d'éviter la réalisation de tabliers trop larges, car les effets du retrait transversal commencent à devenir sensibles pour des largeurs de l'ordre de 15 à 20 m.

1.8 - Spécificités de la solution technique du tablier à poutres en bois

Le recours à des structures porteuses en **bois** s'inscrit pleinement dans la politique de développement durable puisque cette **ressource est renouvelable**. Cette solution assure le **stockage du carbone** pendant la durée de service de l'ouvrage et offre des **solutions variées** pour le **traitement des bois en fin de vie** de l'ouvrage (production d'énergie, réutilisation dans la construction, etc.). Suivant le site d'implantation, le choix d'un tablier à poutres en bois peut contribuer à la **mise en valeur d'essences de bois locales**.

La conception retenue présente l'avantage classique des ponts à **poutres préfabriquées** qui est notamment la **rapidité de pose** au-dessus de la brèche. Le mode de construction permet en effet de s'affranchir de la plupart des contraintes liées à cette brèche. Une grande partie de la structure peut être préfabriquée en usine et sa relative **légèreté** rend son **transport plus aisé**.



Ce type d'ouvrage est bien adapté aux franchissements d'importance moyenne, notamment lorsque le gabarit à respecter n'est pas une forte contrainte, qu'une recherche **esthétique particulière** est souhaitée ou que les contraintes de la brèche sont fortes en terme de mise en œuvre. Il peut par exemple s'agir :

- du franchissement de cours d'eau si la hauteur libre sous tablier reste importante (au moins 3 mètres au-dessus du niveau moyen) ;
- d'ouvrages en site rural ou en entrée de ville, lorsqu'ils sont vus de près.

Le poids du tablier est comparativement plus léger que celui des solutions classiques ce qui peut permettre des gains sur les fondations dans des sites géotechniques délicats ou dans des zones d'aléa sismique et ce qui favorise la réutilisation d'appuis existants.

En contrepartie, l'élancement des nervures en bois lamellé-collé conduit à des épaisseurs de tablier plus importantes que la plupart des solutions classiques. Cela contribue à donner une impression de masse au tablier qui doit être prise en compte dans la conception architecturale, mais qui permet aussi de mettre en valeur le bois.

Les choix de conception confèrent au tablier une structure épurée dépourvue d'assemblages complexes et de points singuliers.

Le choix des essences de bois et l'adoption de dispositions constructives visant à offrir au matériau bois mis en œuvre une protection optimale vis-à-vis des attaques biologiques sont les paramètres essentiels pour l'obtention de la durabilité requise.

Il convient d'insister sur les déformations différées des matériaux et la variation de raideur de la connexion dans le temps qu'il faut compenser par la prise en compte d'une contre-flèche appropriée à l'origine.

1.9 - Généralités sur le fonctionnement du tablier

1.9.1 - Mode de fonctionnement des composants du tablier

Le mode de fonctionnement principal du tablier (flexion longitudinale) fait intervenir le bois et le béton. Dans le cas d'un tablier à une travée isostatique, les nervures en bois travaillent sous cumul de sollicitations de traction et de flexion et le béton travaille en compression.

L'effort tranchant est essentiellement repris par les nervures en bois alors que le fonctionnement transversal fait principalement intervenir le hourdis béton armé assimilé à une plaque.

Les sollicitations horizontales en service (vent, freinage) restent dans le cas général modérées et on considère de manière simplifiée qu'elles sont transférées aux appuis via les nervures en bois et leurs appareils d'appui. Si nécessaire, la participation de la retombée de dalle et de la dalle de transition éventuellement associée peut être évoquée pour justifier l'équilibre du tablier sous sollicitations horizontales accidentelles (chocs sur les nervures, chocs sur les dispositifs de retenue, séisme).

1.9.2 - Optimisation du fonctionnement mixte du tablier

La connexion entre le bois et le béton est nécessaire pour assurer le monolithisme du tablier garant de sa durabilité notamment vis-à-vis des sollicitations dynamiques. Outre l'optimisation des quantités de matériaux, la connexion permet également une redistribution des efforts entre poutres améliorant la robustesse du tablier.

Dans le cas du recours à une connexion partielle, qui ne permet pas d'assurer la continuité des déformations à l'interface des matériaux assemblés (c'est le cas des connexions par tirefonds), une optimisation du fonctionnement mixte est à rechercher.

S'agissant d'un procédé industriel, le coût des poutres en bois apparaît compétitif alors que les opérations de fabrication et de mise en œuvre du système de connexion peuvent représenter un poste de dépense non négligeable. Dans ce contexte, on ne cherchera pas à optimiser à l'extrême les sections des poutres en bois, mais plutôt à minimiser l'importance de la connexion, notamment aux extrémités des poutres, en tenant compte de la capacité de déformation des organes d'assemblage.



Aux extrémités, les efforts liés aux déformations imposées (déformations de retrait, déformations thermiques et hydriques) sont à ancrer sur une longueur de transfert raisonnable en s'assurant de la maîtrise des déplacements à l'interface (le déplacement relatif entre le bois et le béton est généralement de quelques millimètres aux extrémités des poutres pour les longueurs de tablier envisagées). Les efforts dans la connexion peuvent être évalués sur la base d'un modèle d'analyse globale intégrant la souplesse de connexion, les justifications étant complétées par une vérification en fatigue pour les tabliers supportant un trafic poids lourds élevé.

Une répartition optimisée de la connexion par tirefonds permet classiquement d'obtenir une rigidité représentant 60 à 70 % de la rigidité parfaite (rigidité que l'on obtiendrait en assurant la continuité des déformations à l'interface). Ce niveau de connexion permet d'améliorer significativement le fonctionnement des matériaux assemblés.

Comme cela a déjà été précisé, d'autres types de connexion peuvent être envisagés. Les justifications sont alors adaptées aux caractéristiques du système retenu.

2 - Choix des essences bois pour la durabilité

2.1 - Généralités sur le choix des essences pour les structures en bois lamellé-collé

Les essences retenues pour le bois des nervures doivent répondre à un certain nombre d'exigences dont nous rappelons les principales :

- elles doivent être suffisamment disponibles sur le territoire métropolitain pour favoriser le développement de ce pont type ; outre le choix de l'essence, cette exigence induit une contrainte sur la classe de résistance du bois, cette résistance doit être suffisamment élevée, mais rester de fourniture courante ;
- elles doivent permettre d'assurer la durabilité requise soit par la durabilité naturelle du bois, soit par la mise en œuvre d'un traitement de préservation (durabilité conférée), le choix d'une essence naturellement durable est dans toute la mesure du possible à privilégier.

Afin d'obtenir la durabilité requise et de choisir les essences de bois pertinentes, il est nécessaire de caractériser la situation d'exposition du bois en service. Pour cela le concepteur doit se baser sur les classes d'emploi de la norme NF EN 335 – « Durabilité du bois et des matériaux à base de bois – Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois » [1].

Cette norme définit 5 classes d'emploi (tableau 1) essentiellement sur la base de l'exposition aux intempéries du bois en service. Pour chaque classe, elle donne des informations sur les agents biologiques susceptibles d'attaquer le bois. Le fascicule de documentation FD P 20-651 – « Durabilité des éléments et ouvrages en bois » [5] apporte en outre quelques compléments d'informations utiles au concepteur pour l'affectation des éléments en bois dans une classe d'emploi.

Classe d'emploi	Usage général	Occurrence des agents biologiques				
		Champignons de discoloration	Champignons lignivores	Coléoptères	Termites	Térébrants marins
1	À l'abri à l'intérieur	-	-	U	L	-
2	À l'intérieur ou sous abri non exposé aux intempéries ; Possibilités de condensation de l'eau	U	U	U	L	-
3	À l'extérieur au-dessus du sol exposé aux intempéries	U	U	U	L	-
4	À l'extérieur en contact avec le sol et/ou l'eau douce	U	U	U	L	-
5	Immergé dans l'eau salée de manière régulière ou permanente	U	U	U	L	U

U = omniprésent en Europe ou au sein de l'UE

L = présent localement en Europe et au sein de l'UE

Tableau 1 : Récapitulatif des classes d'emploi et des agents biologiques attaquant le bois et les matériaux à base de bois (sur la base du tableau 1 de l'EN 335)

À partir de la classe d'emploi et de la durée d'utilisation de projet envisagées, le concepteur peut faire le choix d'une essence en s'appuyant sur les normes NF EN 460² « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Durabilité naturelle du bois massif – Guide d'exigences de durabilité du bois pour son utilisation selon les classes de risque » [4] et NF EN 350 « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Méthodes d'essai et de classification vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois » [2] et sur le fascicule FD P 20-651 « Durabilité des éléments et ouvrages en bois ».

Deux grandes options sont alors envisageables :

- **option 1** : choix d'une essence naturellement durable ;
- **option 2** : choix d'une essence traitée par un traitement de préservation pour obtenir une durabilité conférée.

L'organigramme ci-dessous (figure 6) donne le principe général de choix d'une essence :

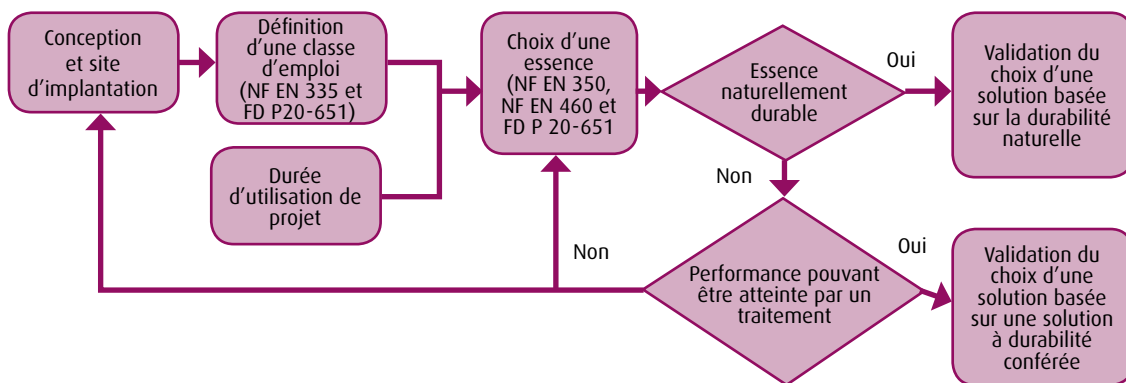


Figure 6 : Organigramme de choix d'une essence de bois

2.2 - Essences courantes pour les structures en bois lamellé-collé

Les exigences de performance des produits en bois lamellé-collé sont définies dans la norme NF EN 14080 – « Structures en bois – bois lamellé-collé et bois massif reconstitué – Exigences » [10]. Le domaine d'application de cette norme couvre le bois lamellé-collé en bloc de sections rectangulaires massives ce qui correspond à la constitution des nervures du pont : les nervures sont obtenues par l'assemblage par collage « en bloc » de poutres unitaires en lamellé-collé.

Cette norme est applicable à plusieurs essences de bois de résineux ou de peuplier, mais précise qu'il peut aussi être possible de fabriquer du bois lamellé-collé à partir d'essences de bois de feuillus.

Les essences de résineux citées dans la norme qui sont couramment disponibles sur le territoire français métropolitain pour réaliser des éléments en bois lamellé-collé sont principalement :

- le sapin (*Abies alba*, ABAL) ;
- l'épicéa (*Picea abies*, PCAB) ;
- le douglas (*Pseudotsuga menziesii*, PSMN) ;
- le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*, PNSY) ;
- le pin maritime (*Pinus pinaster*, PNPN).

Entre parenthèses sont indiqués le nom de l'espèce botanique suivi du code à quatre lettres désignant chaque espèce, conformément à la norme NF EN 13556 [12].

L'aptitude de ces essences à assurer la durabilité requise pour le pont est évaluée au §2.4 ci-après.

On soulignera que la norme NF EN 14080 (§ 5.5.2) précise que le bois lamellé-collé ne doit comporter qu'une seule essence de bois.

² Cette norme ancienne (1994) considère des classes de risque que l'on peut assimiler aux classes d'emploi de la norme NF EN 335. Elle est en cours de révision au moment de la rédaction du présent guide.



2.3 - Durabilité en service des bois mis en œuvre

Le guide technique « Les ponts en bois – Comment assurer leur durabilité » publié par le Setra en novembre 2006 [43] traite largement du sujet de la durabilité des bois mis en œuvre dans les ponts. Nous présentons ici uniquement les éléments essentiels au choix des solutions pertinentes pour la confection des nervures du pont et nous renvoyons le lecteur à ce guide pour plus de précisions sur la conception durable des ponts en bois.

2.3.1 - Détermination de la classe d'emploi en lien avec les risques biologiques encourus.

Compte tenu des choix de conception faits et en particulier de la protection apportée par la retombée de dalle et par l'encorbement, le bois des nervures pourra être affecté en **classe d'emploi 2** dans la majorité des cas d'implantation en France métropolitaine.

La définition de la classe d'emploi 2 selon la norme NF EN 335 est en effet la suivante :

« Situations dans lesquelles le bois ou le matériau à base de bois est sous abri et non exposé aux intempéries (en particulier la pluie et la pluie battante), mais où il peut être soumis à une humidification occasionnelle, mais non persistante. Dans cette classe d'emploi, il peut se former de la condensation à la surface en bois et des produits à base de bois. Une attaque par des champignons de discoloration et des champignons lignivores peut se produire. Une attaque par des insectes xylophages, y compris les termites, est possible, mais la fréquence et l'importance du risque « insecte » encouru sont fonction de la situation géographique. »

Le tableau 1 de la norme NF EN 335 donne également des indications sur les agents biologiques à considérer pour évaluer la durabilité des bois selon la classe d'emploi. Pour la classe d'emploi 2, il précise que :

- les champignons et les insectes « coléoptères » sont omniprésents en Europe et donc à considérer de façon systématique ;
- les termites sont à considérer selon le site d'implantation géographique ;
- les térébrants marins ne sont pas à considérer.

Cette affectation en classe d'emploi 2 est envisagée quelle que soit :

- la zone climatique d'implantation de l'ouvrage : sèche, modérée ou humide selon le FD P 20-651 (figure 7) ;
- l'exposition des bois vis-à-vis des vents de pluie dominants, car les dispositions constructives adoptées garantissent la non-exposition directe aux intempéries.

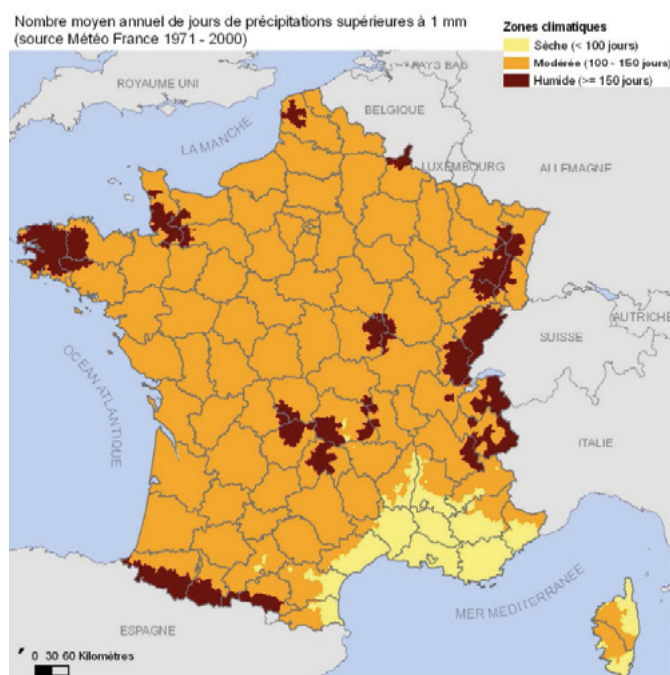


Figure 7 : Répartition géographique des conditions climatiques d'humidification basée sur le nombre moyen annuel de jours où les précipitations sont supérieures à 1 mm
(Source : Météo France, période 1971-2000 – FD P 20-651)

Le fascicule FD P 20-651 donne ainsi une règle simplifiée, valable quelle que soit l'exposition aux vents de pluie dominants, permettant de déterminer les parties d'ouvrages abritées par un débord de toiture qui peuvent être généralement affectées en classe d'emploi 2. La règle proposée par le fascicule FD P 20-651 est la suivante :

$$H \text{ (hauteur abritée)} \leq 2,5 D \text{ (largeur de débord de toiture)}$$

Pour le pont du guide, cette règle est largement vérifiée puisque l'on vise (figure 2) :

$$H = \text{hauteur des nervures} \leq D = \text{largeur d'encorbellement}$$

On insistera sur le fait que la massivité des nervures bois permet de garantir une protection très importante des bois au cœur de la nervure. Dans ces conditions, une surveillance adaptée de l'ouvrage doit permettre de détecter suffisamment tôt d'éventuelles attaques fongiques et de déclencher les actions correctives *ad hoc*.

À noter que les conditions climatiques locales peuvent modifier l'exposition des bois par exemple en cas de zone côtière, de situation en fond de vallée, ou à proximité d'une source d'humidité (cours d'eau). Si ces conditions locales amènent à classer les éléments en bois en **classe d'emploi 3**, il conviendra de s'interroger sur la pertinence de la solution bois et *a minima* des choix plus contraignants que ceux présentés ici seront à opérer.

Le fascicule de documentation FD P 20-651 précise qu'en général, dans la classe d'emploi 2, les bois ont une humidité d'équilibre moyenne comprise entre 12 % et 20 %. Cette information est à rapprocher de la définition de la classe de service 2 donnée par l'EN 1995-1-1 [37] qui est la suivante :

« Classe de service 2 : caractérisée par une humidité dans les matériaux correspondant à une température de 20 °C et une humidité relative de l'air environnant ne dépassant pas 85 % que quelques semaines par an. Dans cette classe de service, l'humidité moyenne dans la plupart des bois résineux n'excède pas 20 % ».

L'annexe nationale NF EN 1995-1-1-NA apporte la précision suivante pour l'affectation des structures :

« Classe de service 2 : Charpente abritée soumise à des variations hygrométriques, murs à ossature bois, etc. : l'humidité moyenne est stabilisée de 13 à 20 % d'humidité ».

Compte tenu de ces définitions, il apparaît que l'affectation en **classe d'emploi 2** selon la norme NF EN 335 d'un élément de bois, est cohérente avec l'affectation en **classe de service 2** selon l'EN 1995-1-1 ; cette correspondance est du reste envisagée par le tableau de l'annexe A de la norme NF EN 335 reproduit ci-après (tableau 2).

Classe de service selon l'EN 1995-1-1	Classe d'emploi correspondante possible selon l'EN 335 : 2012
Classe de service 1	Classe d'emploi 1
Classe de service 2	Classe d'emploi 1 Classe d'emploi 2 si l'élément est dans une situation où il est susceptible d'être soumis à une humification occasionnelle par exemple condensation
Classe de service 3	Classe d'emploi 2 Classe d'emploi 3 ou plus en cas d'usage extérieur

Tableau 2 : Tableau A.1 de l'EN335 – Classes de service et classes d'emploi correspondantes possibles

Nota : les scénarios d'évolution du climat futur peuvent faire craindre une évolution défavorable vis-à-vis des risques biologiques. Les prescriptions en matière de durabilité pourraient le cas échéant être amenées à évoluer dans les décennies à venir.



2.3.2 - Processus de choix des essences pour atteindre la durabilité requise

La durée d'utilisation de projet du pont (**une durée de vie 100 ans** est visée) et la classe d'emploi des bois du tablier (**classe d'emploi 2**) étant fixées, il faut choisir une essence qui assure une durabilité naturelle suffisante (cf. NF EN 350) ou alors prévoir un traitement complémentaire pour obtenir une « durabilité conférée » (cf. NF EN 351-1 – « Durabilité du bois et des produits à base de bois – bois massif traité avec produit de préservation – Partie 1 : Classification des pénétrations et rétentions des produits de préservation » [3]).

En France métropolitaine, la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores est la qualité principale recherchée pour les essences de bois des ouvrages d'art. En effet, l'expérience montre que le risque lié aux insectes à larves xylophages est plus faible. Le risque lié aux termites est directement lié aux sites géographiques d'implantation de l'ouvrage.

2.3.2.1 - Solution basée sur la durabilité naturelle des essences

Dans la démarche de choix d'une essence, la première étape consiste à rechercher une solution basée sur la durabilité naturelle de l'essence. Pour cela, le concepteur peut s'appuyer soit sur les normes NF EN 460 et NF EN 350, soit sur le fascicule FD P 20-651. Les approches des différents textes étant différentes, nous allons les présenter successivement et l'on gardera à l'esprit que ces documents ne donnent pas de réponses tranchées garantissant l'atteinte de la durabilité requise.

2.3.2.1.1 - Application des normes NF EN 460 et NF EN 350

La norme NF EN 460 de juillet 1994 donne la classe de durabilité minimale³ vis-à-vis des champignons lignivores pour assurer un vieillissement acceptable des bois mis en œuvre en fonction de la classe d'emploi (dénommée classe de risque dans la norme). En revanche, elle ne donne pas d'évaluation de la durée de service qui en découle.

Elle préconise ainsi de retenir une essence ayant une classe de durabilité minimale 3 pour une classe d'emploi 2 (tableau 3). Elle précise qu'une classe de durabilité 4 est normalement suffisante pour une classe d'emploi 2, mais que des traitements de préservation peuvent être recommandés pour certains emplois sans apporter plus de précisions.

Classe d'emploi	Classe de durabilité				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	(0)	(0)
3	0	0	(0)	(0) – (x)	(0) – (x)
4	0	(0)	(x)	x	x
5	0	(x)	(x)	x	x

Légendes :

0 Durabilité naturelle suffisante.

(0) Durabilité naturelle normalement suffisante, mais pour certains emplois un traitement de préservation peut être recommandé.

(0) – (x) La durabilité naturelle peut être suffisante, mais en fonction de l'essence de bois, de sa perméabilité et de son emploi final, un traitement de préservation peut s'avérer nécessaire.

(x) Le traitement de préservation est normalement recommandé, mais pour certains emplois la durabilité naturelle peut être suffisante.

x Traitement de préservation nécessaire.

Tableau 3 : Tableau 1 de la NF EN 460 – Champignons lignivores – Guide des classes de durabilité d'essences de bois appropriées pour l'emploi dans les classes de risque

Les classes de durabilité des essences vis-à-vis des différents agresseurs sont données dans le 5.2 de la norme NF EN 350 et sont rappelées ci-après.

³ La norme NF EN 460 de juillet 1994 se base sur les classes de durabilité de la norme NF EN 350-2 de juillet 1994 désormais remplacée par la norme NF EN 350 d'octobre 2016. La norme NF EN 460 est en cours de révision au moment de la rédaction du présent guide.

Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores

Cinq classes de durabilité sont définies allant de très durable à non durable (tableau 4). À noter que, quelle que soit l'essence, l'aubier est considéré comme ayant une classe de durabilité de niveau 5 vis-à-vis du risque fongique.

Classe de durabilité	Description
DC1<?>	Très durable
DC2	Durable
DC3	Moyennement durable
DC4	Faiblement durable
DC5	Non durable

Tableau 4 : Classes de durabilité vis-à-vis des champignons lignivores selon NF EN 350

Durabilité naturelle vis-à-vis des attaques de coléoptères xylophages

Deux classes de durabilité naturelle vis-à-vis des attaques des coléoptères xylophages sont définies : durable ou sensible (tableau 5).

Classe de durabilité	Description
DC D	Durable
DC S	Sensible

Tableau 5 : Classes de durabilité vis-à-vis des attaques des coléoptères xylophages selon NF EN 350

Durabilité naturelle vis-à-vis des termites

Trois classes de durabilité sont définies. La durabilité ne concerne que le bois parfait, l'aubier de toutes les essences est sensible (tableau 6). La classification « durable » n'implique pas une résistance totale.

Classe de durabilité	Description
DC D	Durable
DC M	Moyennement durable
DC S	Sensible

Tableau 6 : Classes de durabilité vis-à-vis des termites selon NF EN 350

Le risque d'attaque par les colonies de termites n'est à considérer que pour certaines régions de France. La carte ci-dessous indique les départements à risque (figure 8).

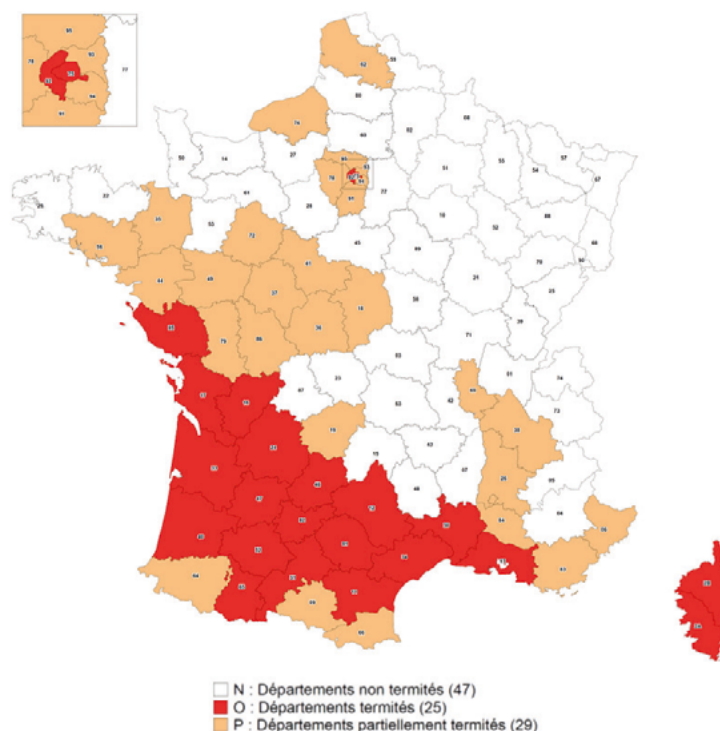


Figure 8 : Départements de la France métropolitaine couverts par un arrêté préfectoral délimitant les zones infestées par les termites au 1^{er} janvier 2016 (Source : ministère de la Transition écologique et solidaire)

Classe d'imprégnabilité des essences de bois

La durabilité vis-à-vis du risque fongique est le facteur combiné de la durabilité naturelle et du facteur d'imprégnabilité. En effet, à durabilité naturelle équivalente, une essence très réfractaire à l'absorption à l'eau va être plus pérenne qu'une essence à moyenne ou forte imprégnabilité. Il convient donc de connaître le niveau d'imprégnabilité des essences susceptibles d'être utilisées.

Les classes d'imprégnabilité des essences sont données par le tableau C.1 de la norme NF EN 350 (tableau 7) :

Classe d'imprégnabilité	Description	Explication
1	Imprégnable	Le bois scié peut être pénétré complètement avec un traitement sous pression.
2	Moyennement imprégnable	La pénétration totale est généralement impossible, mais après 3 ou 4 heures de traitement sous pression, une pénétration latérale de plus de 6 mm peut être atteinte dans les bois résineux et, dans les bois feuillus, le traitement pénètre dans une grande partie des vaisseaux.
3	Peu imprégnable	3 à 4 heures de traitement sous pression peuvent permettre d'atteindre, tout au plus, une pénétration latérale de 3 à 6 mm.
4	Non imprégnable	Le bois est pratiquement imperméable au traitement ; la quantité de produit de préservation absorbée est minime, y compris après 3 ou 4 heures de traitement sous pression ; la pénétration est minime, tant sur le plan latéral que longitudinal.

Tableau 7 : Classification de l'imprégnabilité du bois (Source : NF EN 350)

Le tableau B.1 de l'annexe B de la norme NF EN 350, dont nous donnons ci-dessous un extrait pour ce qui concerne les essences envisagées (tableau 8), donne les classements des essences vis-à-vis de la durabilité naturelle.

Essences	Masse volumique/ Fourchette de masse volumique à 12 % d'humidité (kg/m³)	Durabilité du bois parfait				Imprégnabilité	
		Champignons	Hylotrupes	Anobium	Termite	Bois parfait<?>	Aubier<?>
Sapin (Abies alba)	440 – 460 – 480	4	S	S	S	2-3	2v
Épicéa (Picea abies)	440 – 460 – 470	4	S	S	S	3-4	3v
Douglas (Pseudotsuga menziesii) – Cultivé en Europe	470 – 510 – 520	3-4	D	D	S	4	2-3
Pin sylvestre (Pinus sylvestris)	500 – 520 – 540	3-4	D	D	S	3-4	1
Pin maritime (Pinus pinaster)	530 – 540 – 550	3-4	D	D	S	4	1

Légendes :

Classe de durabilité « champignons »

3 : moyennement durable

4 : faiblement durable

Classe de durabilité « insectes »

D : Durable

S : Sensible

Classe d'imprégnabilité

2 : moyennement imprégnable

3 : peu imprégnable

4 : non imprégnable

v : l'essence présente un niveau de variabilité inhabituellement élevé

Tableau 8 : Classement vis-à-vis de la durabilité naturelle des essences selon tableau B.1 de la NF EN 350

Compte tenu des éléments présentés, il apparaît que le **douglas purgé d'aubier, le pin sylvestre et le pin maritime peuvent être retenus pour leur durabilité naturelle en classe d'emploi 2 et en l'absence du risque « termite »** avec une classe de durabilité vis-à-vis des champignons lignivores allant de 3 à 4 suivant les essais réalisés pour établir le tableau B.1 de la norme.

L'emploi du sapin et de l'épicéa ne peut pas être envisagé sur la base de leur durabilité naturelle du fait d'une durabilité insuffisante vis-à-vis du risque « insectes xylophages ».

2.3.2.1.2 - Application du fascicule FD P 20-651

Le fascicule FD P 20-651 a l'intérêt de proposer des appréciations en matière de longévité vis-à-vis de la durabilité fongique, exprimées au travers de quatre classes :

- L3 : longévité supérieure à 100 ans ;
- L2 : longévité comprise environ entre 50 ans et 100 ans dans l'utilisation initiale prévue ;
- L1 : longévité comprise environ entre 10 ans et 50 ans dans l'utilisation initiale prévue ;
- N : longévité incertaine et, dans tous les cas, inférieure à 10 ans, ces solutions ne sont pas à prescrire.

Le tableau 4 du fascicule propose des solutions basées sur la durabilité naturelle d'essences de bois européen (hors aubiers). Nous donnons ci-après un extrait de ce tableau pour les essences envisagées (tableau 9) :

Essences de bois purgées d'aubier	Durabilité fongique par classe d'emploi					Résistance aux insectes à larves xylophages	Résistance aux termes
	1	2	3a<?>	3b	4		
Sapin (Abies alba)	L3	L2	L1	N	N	Non	Non
Épicéa (Picea abies)	L3	L2	L1	N	N	Non	Non
Douglas (Pseudotsuga menziesii)	L3	L3	L2	L1	N	Oui	Non
Pin sylvestre (Pinus sylvestris)	L3	L3	L1	L1	N	Oui	Non
Pin maritime (Pinus pinaster)	L3	L3	L2	L1	N	Oui	Non

Tableau 9 : Classement vis-à-vis de la durabilité naturelle des essences selon tableau 4 de FD P 20-651



De ces éléments, il ressort que **le douglas purgé d'aubier, le pin sylvestre et le pin maritime présentent une durabilité naturelle suffisante** pour envisager **une longévité en œuvre supérieure à 100 ans en classe d'emploi 2** lorsque le risque « termite » peut être exclu. Un traitement de ces essences n'est dès lors à considérer que vis-à-vis d'un éventuel risque « termites ».

Le sapin et l'épicéa présentent une durabilité naturelle insuffisante pour une durée d'utilisation de projet visée de 100 ans en classe d'emploi 2.

2.3.2.2 - Solution basée sur la durabilité conférée

Nous avons vu précédemment qu'il était possible de trouver des solutions pour le choix des essences des nervures, basées sur une durabilité naturelle. Nous développons néanmoins ci-après le cas d'une solution mettant en œuvre des bois traités dans le but de leur conférer la durabilité requise.

L'efficacité du traitement de préservation dépend de l'imprégnabilité de l'essence (cf. NF EN 350) ainsi que de la pénétration et de la rétention des produits (cf. NF EN 351-1) et du pouvoir biocide de ces produits.

Les spécifications concernant les performances des produits préventifs de préservation du bois sont données par la norme NF EN 599-1 +A1 – « Durabilité des bois et des matériaux dérivés du bois – Efficacité des produits préventifs de préservation du bois établie par des essais biologiques » [6]. La norme NF B 50-105-3 – « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Bois et matériaux à base de bois traités avec un produit de préservation préventif - Partie 3 : spécifications de préservation des bois et matériaux à base de bois et attestation de traitement - Adaptation à la France Métropolitaine et aux DOM » [7] précise les performances de préservation des bois en France métropolitaine et dans les départements d'outre-mer. La norme NF EN 15228 « Bois de structure – Bois de structure traité avec un produit de préservation contre les attaques biologiques » [9] spécifie les exigences générales relatives au bois de structure qui a été traité par des produits de préservation contre les attaques biologiques. Les traitements incluant un produit biocide sont couverts par la présente norme.

Il convient de rappeler que le rabotage des lamelles après encollage dégrade la durabilité conférée obtenue d'une classe. Ainsi, des planches constituées de bois imprégnable et traitées pour une utilisation en classe d'emploi 3 donneront un élément en bois lamellé-collé de durabilité conférée pour une utilisation en classe d'emploi 2.

En France, le FCBA (Institut technologique forêt cellulose bois-construction ameublement) délivre deux marques (figure 9), à savoir :

- CTB P + pour la qualification du produit de traitement ;
- CTB B + pour la certification de la station de traitement.



Figure 9 : Marques de qualité CTB-P + et CTB-B +

Les produits fongicides couramment utilisés sont généralement composés d'acide borique, de carbonate de cuivre, de tebuconazole, de propiconazole, etc.

D'une manière générale, de nombreux produits sont acceptables et il convient de se référer à la liste des produits de traitement certifiés CTB-P + disponible sur le site ctbplus.fr.

Les essences classées sensibles vis-à-vis des insectes xylophages selon la norme NF EN 350 doivent être traitées avec un produit de préservation.

De même, si le risque « termite » est à considérer et que l'essence retenue n'est pas classée comme « durable » (D), un traitement de préservation est à mettre en œuvre pour assurer la pérennité de la structure sauf à pouvoir garantir la mise hors d'atteinte des bois par les termites.

L'attention du maître d'ouvrage est attirée sur le fait que les déchets de bois traités sont actuellement considérés comme des déchets industriels spéciaux et que le maître d'ouvrage doit assurer la prise en charge de ces déchets par un centre d'élimination adapté en fin de vie de l'ouvrage. La réglementation concernant les déchets est en outre une réglementation évolutive probablement de plus en plus exigeante.

Le fascicule FD P 20-651 propose dans son tableau 6 des solutions pour des essences tempérées basées sur la durabilité conférée. Nous donnons ci-après un extrait de ce tableau permettant de traiter les essences envisagées qui n'ont pas une durabilité naturelle suffisante à savoir le sapin et l'épicéa (tableau 10).

Essences de bois purgées d'aubier	Durabilité fongique par classe d'emploi					Résistance aux insectes à larves xylophages	Résistance aux termites
	1	2	3a	3b	4		
Essences traitées pour utilisation en classe 2		L1				Oui	Oui

Tableau 10 : Classement vis-à-vis de la durabilité conférée selon tableau 6 du FD P20-651 (extrait)

L'examen de ce tableau montre que **la longévité estimée vis-à-vis de la durabilité fongique reste limitée à L1 (longévité comprise environ entre 10 et 50 ans dans l'utilisation initiale prévue) malgré l'application d'un traitement de préservation.**

2.4 - Proposition d'essences pour les bois des nervures du pont

Compte tenu des éléments présentés ci-avant, les bois mis en œuvre seront en classe d'emploi 2. Dans ces conditions, la solution la plus pertinente consiste à opter pour une solution basée sur la durabilité naturelle des essences retenues.

On pourra alors retenir le douglas purgé d'aubier non traité. D'autres essences non traitées sont également envisageables, selon leur disponibilité : le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et le pin maritime (*Pinus pinaster*).

Le sapin et l'épicéa même traités présentent une longévité inférieure et leur utilisation est soumise à une maîtrise particulière de l'humidité dans la zone d'implantation de l'ouvrage. Le recours à ces essences est déconseillé.

D'autres solutions basées sur des essences plus rares en lamellé-collé comme le robinier (*Robinia pseudo acacia* L), le chêne (*Quercus petraea*, *Quercus robur*) ou le châtaignier (*Castanea sativa*) peuvent aussi répondre aux exigences de durabilité. Il conviendra alors d'étudier la faisabilité, la disponibilité de ces essences et la maîtrise des coûts liées à ce choix dans le cadre du projet individuel.

Pour toutes les solutions, si un risque vis-à-vis des termites est clairement établi, il convient de mettre en œuvre un traitement de préservation pour conférer aux essences la durabilité requise.

Enfin, il convient de rappeler l'importance d'une surveillance régulière des ouvrages afin de détecter au plus tôt l'apparition de dégradations des bois. Lors des opérations de surveillance, il est vivement recommandé de mesurer l'humidité des bois pour confirmer la classe d'emploi 2 retenue au projet.

Le tableau ci-dessous (tableau 11) résume les propositions d'essences pour une utilisation en classe d'emploi 2 dans le cadre d'une solution basée sur la durabilité naturelle.

Essences	Classe d'emploi 2 en durabilité naturelle	
	Longévité estimée selon FD P 20-651	Disponibilité
Douglas	L3	Grande
Pin maritime	L3	Courante
Pin sylvestre	L3	Courante
Châtaignier	L3	Faible
Chêne	L3	Faible
Robinier	L3	Faible

Légende : Solution privilégiée

Solution possible selon disponibilité

Solution généralement non pertinente d'un point de vue économique

Tableau 11 : Grille de choix des essences pour le pont du présent guide selon la classe d'emploi



Partie 2

Conception et exécution de l'ouvrage

1 - Commande du maître d'ouvrage

Le maître d'ouvrage responsable d'un projet d'ouvrage d'art précise les données qui s'imposent et ses exigences pour la conception et l'exécution de l'ouvrage dans « le programme » de l'ouvrage. Il définit en premier lieu les données fonctionnelles attendues pour le franchissement et notamment le profil en travers fonctionnel. Il fixe les performances attendues des dispositifs de retenue des véhicules qui résultent de l'étude de danger qu'il aura réalisée et s'attache également à identifier les contraintes du franchissement en veillant à définir les gabarits à respecter.

Le maître d'ouvrage doit aussi s'assurer que ses choix techniques sont en cohérence avec les exigences européennes en matière de fiabilité. Ainsi, le maître d'ouvrage a la responsabilité (cf. NF EN 1990 [34]) de définir :

- les exigences de base relatives à la robustesse, la fiabilité et à la gestion de la qualité lors des études et de la réalisation ;
- la durée de vie spécifiée de l'ouvrage qui est la durée d'utilisation de projet ;
- les actions à envisager : les charges d'exploitation (trafic), les charges du vent, les actions accidentelles comme les chocs, l'aléa sismique, etc.
- la nature et l'agressivité du site vis-à-vis des matériaux. Ceci est tout particulièrement important vis-à-vis de la durabilité des bois mis en œuvre.

Le maître d'ouvrage peut aussi utilement préciser dans son programme ses exigences en termes de développement durable, de maintenance au cours de la vie de l'ouvrage et de gestion de fin de vie de l'ouvrage.

Pour plus d'information sur ce sujet, le lecteur pourra se référer au guide « Application des Eurocodes par le maître d'ouvrage – Le programme d'un ouvrage d'art aux Eurocodes » publié par le Sétra en février 2009 [42].

1.1 - Durée d'utilisation de projet

La durée de vie de service de l'ouvrage doit être définie en accord avec les recommandations des Eurocodes (annexe A2 de la norme NF EN 1990). On retient comme pour tout pont routier, une durée de 100 ans.

1.2 - Classes d'exposition pour le béton

Les classes d'exposition des différentes parois en béton permettent de définir les exigences vis-à-vis des bétons à employer. Elles gouvernent notamment la résistance et les enrobages. La norme NF EN 206/CN [32] prévoit cinq grandes classes d'exposition :

- XC : exposition à la carbonatation ;
- XD : exposition aux chlorures autres que ceux de l'eau de mer ;
- XS : exposition aux chlorures de l'eau de mer ;
- XF : exposition au gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage ;
- XA : exposition aux attaques chimiques.

Les deux dernières classes (XF ou XA) caractérisent les risques supplémentaires et spécifiques liés aux conditions de gel et dégel (classes XF1 à XF4) ou d'attaques chimiques (classes XA1 à XA3) et se juxtaposent aux autres classes quand ces risques existent.

1.3 - Données permettant la détermination de la classe d'emploi et de la classe de service des bois mis en œuvre

Le maître d'ouvrage doit déterminer les conditions climatiques (température et humidité de l'air), dans lesquelles l'ouvrage doit être réalisé. Ces conditions sont liées à l'implantation géographique de l'ouvrage (cf. carte présentée en figure 10 donnant l'équilibre hygroscopique du bois en France métropolitaine).

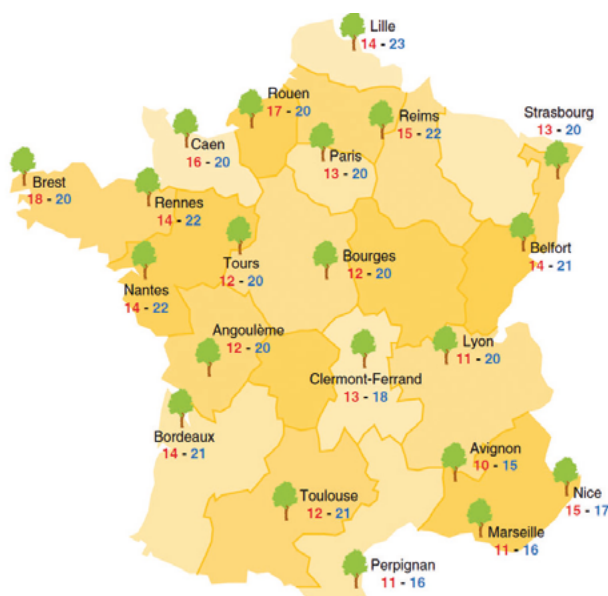


Figure 10 : Carte donnant l'équilibre hygroscopique du bois en France en extérieur abrité (Source : CTBA repris dans le guide LCPC cité en référence [49] – La première valeur est l'humidité d'équilibre en été, la seconde en hiver)

Ces données climatiques doivent permettre d'évaluer la plage d'humidité dans le bois pendant la durée de service de l'ouvrage. L'EN1995-1-1/NA (clause 2.3.1.3 (1)) fournit à titre indicatif un abaque permettant de déterminer cette humidité d'équilibre dans le bois en fonction de la température de l'air et de l'humidité relative extérieure. L'utilisation de cet abaque est illustrée ci-dessous (figure 11).

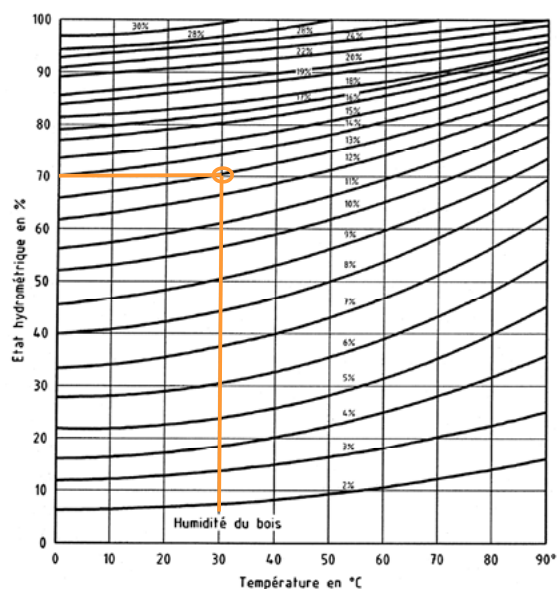


Figure 11 : Exemple d'utilisation de l'abaque de l'EN1995-1-1/NA donnant l'humidité d'équilibre dans le bois en fonction de la température de l'air et de l'humidité relative extérieure – À une température de l'air de 30 °C et une humidité relative de 70 %, l'équilibre hygroscopique du bois se situe à environ 13 %.



Il convient également de caractériser les conditions locales d'implantation (fond de vallée, exposition aux embruns routiers, proximité d'un point d'eau).

Le recueil de ces données doit permettre au projeteur de confirmer la classe d'emploi et la classe de service des bois puis de choisir la solution permettant d'obtenir la durabilité requise et de justifier les exigences de résistance. L'humidité attendue en service permet également de définir l'humidité de fabrication que le bois doit respecter (l'humidité de fabrication doit être inférieure à l'humidité attendue en service).

Pour le pont mixte bois/béton décrit par le présent guide et compte tenu de la conception adoptée, la classe d'emploi visée est la classe 2 et la classe de service visée est la classe 2. Si des conditions locales conduisent à supposer que cette classe d'emploi est trop favorable, il conviendra de reconsidérer la pertinence de la solution mixte bois/béton comme solution de franchissement.

1.4 - Exigences pour la maintenance et la gestion en fin de vie

Le maître d'ouvrage peut exiger des bois en provenance d'une forêt gérée durablement sans surexploitation. Il existe notamment le label PEFC : Program for the Endorsement of Forest Certification (anciennement Pan European Forest Certification) (<http://www.pefc-france.org>) et le label FSC : Forest Stewardship Council (<http://fr.fsc.org>) qui attestent de cette provenance.

Dans son programme, le maître d'ouvrage peut aussi fixer des exigences pour limiter les opérations de maintenance pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Des exigences particulières liées à l'environnement et à la fin de vie de l'ouvrage peuvent également être stipulées.

Pour l'aider dans la gestion des ouvrages d'art en bois, le maître d'ouvrage gestionnaire pourra s'appuyer sur :

- le guide technique LCPC « Recommandations pour l'inspection détaillée des ouvrages en bois » d'avril 2008 [49] : ce guide rappelle les principales propriétés et pathologie du bois, il fournit des recommandations en matière d'inspection détaillées et présente quelques préconisations en termes d'entretien, maintenance et réparation ;
- le cahier interactif de l'Ifsttar – Auscultation des ouvrages d'art [<http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CI11/>], notamment pour ce qui concerne les méthodes d'auscultation et les méthodes de diagnostic du matériau « bois ».

1.5 - Classe de trafic

Le maître d'ouvrage doit choisir la classe de trafic routier en tenant compte du développement probable du trafic pendant la durée de vie de l'ouvrage. La 2^e classe de trafic est adaptée aux compositions de trafic les plus courantes sur les réseaux routiers et autoroutiers français.

Ce choix influe sur les coefficients de pondération des charges routières (tableau 12) :

Classe de trafic	α_{q1}	$\alpha_{qi} (i \geq 2)$	α_{q1}	$\alpha_{qi} (i \geq 2)$	α_{qr}
2	0,9	0,8	0,7	1,0	1,0

Tableau 12 : Coefficients de pondération pour une classe 2 de trafic selon EN1991-2/NA 4.3.2(3) NOTES 1 et 2

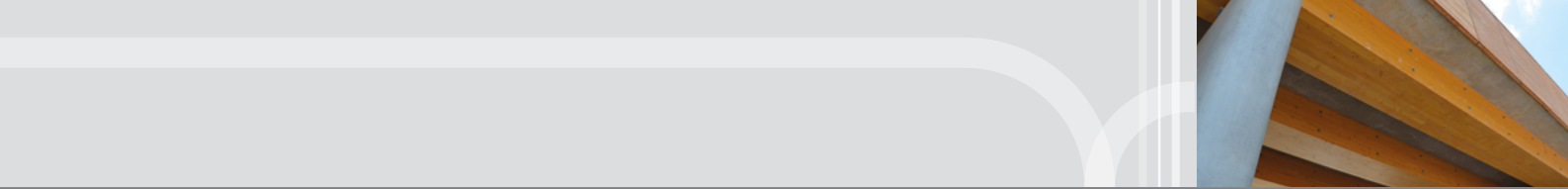
Le maître d'ouvrage doit également définir les charges exceptionnelles que l'ouvrage peut avoir à supporter.

1.6 - Neige, vent et séisme

Les effets de la neige ne sont généralement pas considérés pour le calcul des ouvrages routiers, car non dimensionnants.

Les effets du vent sont évalués à partir de la localisation en France (région de vent) et de la rugosité du sol (catégorie de rugosité). L'annexe nationale de l'Eurocode NF EN 1991-1-4 [35] donne la valeur de la vitesse du vent à prendre en compte en fonction de ces deux informations. Pour le pont mixte bois/béton à poutres sous chaussée le vent est essentiellement dimensionnant lors de la construction pour ce qui concerne la stabilité des poutres et leur condition d'appui.

L'intensité de l'aléa sismique est définie par un zonage sismique réglementaire (décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français [51]) et le maître d'ouvrage doit définir la destination de l'ouvrage, c'est-à-dire sa catégorie d'importance (arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification



et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la classe dite « à risque normal » [52]). Les ponts situés sur les autoroutes et les routes principales, ainsi que les ponts-rails, sont considérés comme appartenant à la catégorie d'importance II (importance moyenne). La catégorie d'importance III, la plus élevée, est réservée aux ponts dont l'importance est critique pour le maintien des communications (les ponts des pistes d'aviation par exemple). La catégorie d'importance I comprend les autres ponts. Les justifications sont conduites selon l'Eurocode 8 [39] et [40].

1.7 - Exigences de tenue au feu

Pour un pont routier, il n'y a en général pas d'exigences réglementaires particulières de tenue au feu.

Le bois est un matériau qui résiste relativement bien à l'exposition au feu. L'EN1995-1-2 [38] tableau 3.1 donne une profondeur de carbonisation fictive de 0,7 mm/min pour du bois lamellé-collé résineux en situation d'exposition au feu normal avec une profondeur variant linéairement avec le temps. En 1 heure, la profondeur de carbonisation est alors de 42 mm sur les trois faces exposées des nervures. Pour une nervure de 1 m x 1 m protégée sur sa face supérieure, cela représente environ 12 % de la section initiale, ce qui reste très limité. Le caractère massif des nervures en bois doit permettre de respecter les justifications à produire en situation accidentelle de feu pour des exigences standard (par exemple tenue de l'ouvrage pendant une heure sous feu normal).

Les choix de conception opérés pour le pont du guide assurent ainsi une relativement bonne résistance au feu du fait du caractère massif des nervures et de la non-exposition des organes d'assemblage assurant la connexion. Ces choix sont de nature à garantir la stabilité de l'ouvrage en situation accidentelle d'incendie, le temps de permettre l'intervention des sapeurs-pompiers et des forces de l'ordre. Un diagnostic complet de l'ouvrage est nécessaire après incendie.

2 - Adaptation de la géométrie générale du tablier aux caractéristiques du tracé

2.1 - Profil en long

Le profil en long doit faire l'objet d'une concertation avec les acteurs du projet routier d'ensemble et une bonne coordination doit être assurée entre les études géométriques de tracé et les études d'ouvrage d'art. Un principe général à observer pour obtenir une ligne harmonieuse consiste à ne pas associer sur un même ouvrage un profil rectiligne puis curviligne. En tout état de cause, un profil rectiligne est préférable lorsque la voie portée présente une pente longitudinale.

Si un profil circulaire est nécessaire, par exemple pour faciliter l'évacuation des eaux de ruissellement des passages supérieurs, ce profil peut être appliqué aux nervures en bois lamellé-collé, par contrefléchage ou variation de la hauteur.

2.2 - Implantation des appuis

L'implantation des appuis constitue une étape importante dans la conception de l'ouvrage. Cette implantation doit respecter les contraintes géométriques et topographiques liées à la brèche (gabarits, obstacles divers, visibilité, etc.), et tenir compte des données géotechniques (portance et tassements éventuels du sol de fondation, etc.) ainsi que des données hydrauliques dans le cas de franchissements de cours d'eau.

Le respect de ces contraintes et de ces données permet d'aboutir à une ou à plusieurs solutions de répartition des travées. Le choix d'une solution de type pont mixte bois/béton à nervures sous chaussée conçue selon les principes du présent guide est pertinent lorsque la longueur des travées est comprise entre une dizaine et une vingtaine de mètres.

2.3 - Schéma statique longitudinal

Le tablier mixte bois/béton peut être envisagé pour des longueurs de franchissement allant jusqu'à 35 – 40 m. Il s'agira alors généralement de ponts :

- à une seule travée isostatique de 20 m de portée maximum environ ;
- à deux travées de longueurs sensiblement égales de l'ordre de 15 m à 20 m au maximum ;
- à trois travées avec une travée principale d'une douzaine de mètres et un balancement des travées de rive de l'ordre de 0,7 à 0,8.



2.4 - Gabarits

2.4.1 - Gabarit et choc de véhicule

Les caractéristiques du bois lui offrent une faible résistance aux actions agissant de manière perpendiculaire aux fibres. En particulier, le choc d'un véhicule hors gabarit en sous-face d'une poutre engendre un arrachement de fibres et peut affaiblir la poutre heurtée. Le choix de poutres massives confère à l'ouvrage une bien meilleure robustesse que celle d'une poutre en lamellé-collé classique.

Néanmoins, pour limiter le risque de choc, il est recommandé d'adopter les dispositions habituellement retenues pour les passerelles piétonnes (revanche de 60 cm, existence d'ouvrages robustes vis-à-vis du choc, blocage transversal du tablier, etc.).

Si de telles dispositions ne peuvent être mises en œuvre, il conviendra de justifier le tablier de l'ouvrage sous l'action du choc réglementaire. Les Eurocodes imposent de prendre en compte un choc pour une hauteur libre sous ouvrage inférieure ou égale à 6 m. Pour la justification du tablier, il est recommandé pour la détermination de l'intensité de choc de diminuer la hauteur libre réelle d'origine de 15 cm pour tenir compte des rechargements ultérieurs de la chaussée franchie, des tolérances d'exécution et des déformations de fluage de l'ouvrage.

2.4.2 - Gabarit et humidité

Il n'existe pas de règles permettant de déterminer la classe d'emploi des bois en fonction de leur hauteur au-dessus d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau. Les conditions locales d'exposition à l'humidification ou à la condensation peuvent en outre être très variables suivant les sites.

Dans le cadre de la conception du présent guide, nous proposons la règle simplifiée suivante :

Les bois sont considérés en classe d'emploi 2 si le tirant d'air dégagé au-dessus du niveau moyen du plan d'eau est d'au moins 3 m, le tablier devant en outre respecter un tirant d'air minimal de 1 m au-dessus de la crue centennale.

Dans le cas d'implantation d'ouvrages en bois au-dessus d'un plan d'eau, il conviendra de prévoir des mesures de l'humidité des bois afin de valider le choix initial de la classe d'emploi et le cas échéant d'apporter des mesures correctives (application de lasures).

Au-dessus des voies circulées, le respect du gabarit vis-à-vis du risque de choc permet de limiter l'exposition des poutres aux embruns soulevés par le passage des véhicules.

2.5 - Dévers

Pour faciliter l'écoulement des eaux pluviales, il est nécessaire de donner un dévers transversal au tablier. La pente de ce dévers est en général de 2,5 % quand l'ouvrage est situé en alignement droit ; elle varie en fonction de la courbure et peut atteindre 6 % pour les rayons les plus faibles.

Lorsque le tablier présente une pente transversale unique, le hourdis est parallèle au profil de la chaussée. Lorsque l'ouvrage supporte une circulation à double sens, le profil en travers du tablier présente une double pente ; ce profil est également appelé « profil en toit ».

L'épaisseur du hourdis est soit légèrement variable lorsque la face supérieure des nervures est horizontale soit constante lorsqu'un rabotage de la face supérieure est réalisé pour donner la pente transversale recherchée (figure 12).

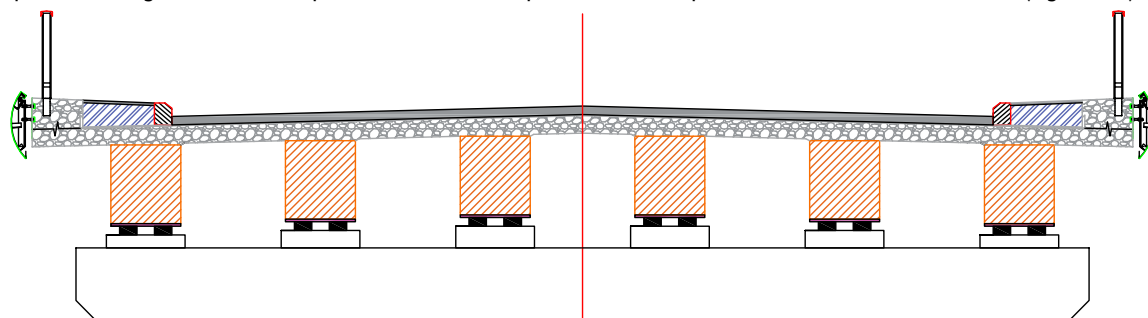


Figure 12 : Profil en toit avec nervure à face supérieure horizontale

Les nervures ayant toutes la même hauteur, l'adaptation au dévers se fait par un décalage en altitude des appuis. Naturellement, le plan médian des nervures doit rester vertical et les surfaces d'appui horizontales. Il en résulte que (figure 13) :

- soit le chevêtre est horizontal et les dés d'appui sont de hauteur variable ;
- soit le sommier d'appui est parallèle au dévers et les dés d'appui sont tous identiques.

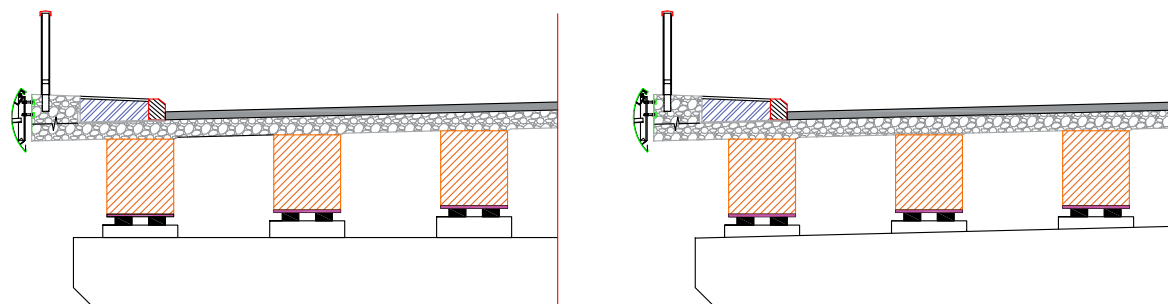


Figure 13 : À gauche : sommier horizontal, bossages de hauteur variable ; à droite : sommier déversé, bossages identiques

Plus rarement, et seulement pour des ouvrages particulièrement étroits, on peut envisager de réaliser le profil en travers en faisant varier l'épaisseur du hourdis. La surépaisseur non fonctionnelle qui en résulte présente toutefois l'inconvénient d'alourdir la charge permanente de l'ouvrage. Il est en revanche déconseillé de réaliser un renformis ou de jouer sur l'épaisseur du revêtement de chaussée pour parvenir à ce résultat, en raison du risque d'orniérage.

2.6 - Incidences de la courbure et du biais

2.6.1 - Courbure

L'utilisation naturelle des ponts à poutres sous chaussée, constitués d'éléments rectilignes, concerne en premier lieu les franchissements rectilignes ; on évitera donc les tracés courbes en plan. Il est toutefois possible d'adapter la structure pour réaliser des ouvrages présentant une courbure en plan limitée.

2.6.2 - Biais

Le type de pont du présent guide est adapté à des biais qui doivent rester très modérés, c'est-à-dire pour des angles de biais compris entre 80 et 100 grades. En effet, les nervures prennent appui dans le sens transversal sur deux appareils d'appui distincts et il est conseillé de positionner ces deux appareils d'appui selon une direction perpendiculaire à l'axe longitudinal des poutres de façon à limiter les efforts parasites au sein des nervures. Cette disposition nécessite un élargissement des têtes d'appui des ouvrages biais (figure 14). Une adaptation de l'extrémité des poutres est également à prévoir, dans le cas d'un tablier biais, pour conserver un gousset d'encastrement de la retombée de dalle de largeur constante.

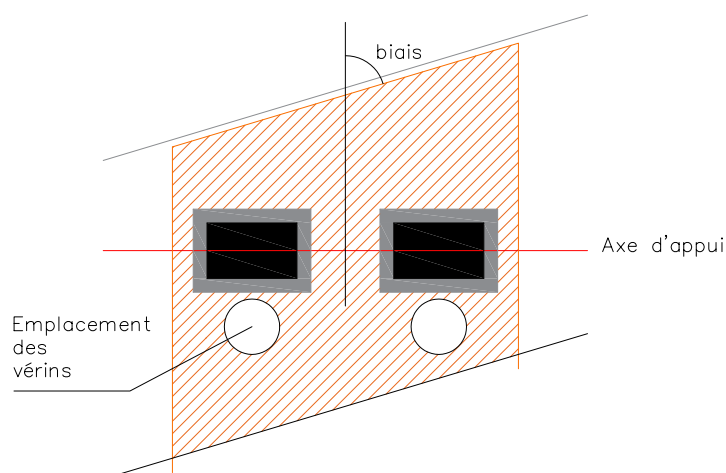


Figure 14 : Vue de dessus de l'about d'une nervure d'un ouvrage biais



3 - Conception du tablier

Après avoir fixé le schéma statique longitudinal de l'ouvrage, la démarche de conception du projeteur consiste à dimensionner les éléments constitutifs du tablier en tenant compte des contraintes du projet, notamment celles relatives au gabarit. L'élancement des nervures est de l'ordre du 1/15^e pour une dalle de 20 à 25 cm en béton armé avec un entraxe situé entre 1,50 et 2 m. Pour des considérations d'aspect général de l'ouvrage, on choisira généralement de donner une épaisseur constante au tablier.

3.1 - Matériaux

3.1.1 - Bois lamellé-collé

3.1.1.1 - Bois de structure

Le terme bois de structure désigne le matériau bois entrant dans la constitution des éléments en lamellé-collé. Les exigences applicables à ce bois de structure de section rectangulaire classé visuellement et par machine, profilé par sciage, rabotage ou d'autres méthodes sont prescrites par la norme NF EN 14081-1 – « Structures en bois – Bois des structures à section rectangulaire classé pour sa résistance – Partie 1 : Exigences générales » [11]. Cette norme couvre le bois non traité ou traité contre les attaques biologiques, mais pas le bois traité par des produits contre le feu. Elle fixe en particulier les exigences sur l'évaluation de la conformité et le marquage.

Les écarts admissibles sur les dimensions des bois de structure sont fixés par la norme NF EN 336 – « Bois de structure – Dimensions, écarts admissibles » [8].

3.1.1.2 - Bois lamellé-collé et bois lamellé-collé en bloc

3.1.1.2.1 - Constitution du bois lamellé-collé en bloc

Les nervures du pont s'apparentent à du « bois lamellé-collé en bloc ». Au sens du paragraphe 3.3 de la norme NF EN 14080, il s'agit d'éléments de structure ayant une section transversale rectangulaire massive, fabriqués à partir d'au moins deux composants en bois lamellé-collé assemblés par collage à l'aide d'un adhésif (la colle est dénommée « adhésif ») pour joint épais (figure 15).

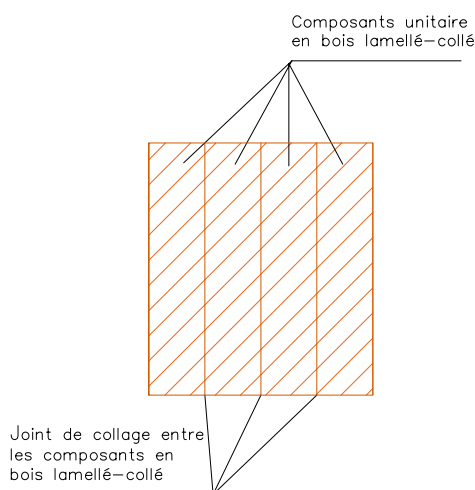


Figure 15 : Définition du bois lamellé-collé en bloc – Selon figure 2 de la norme NF EN 14080

La norme NF EN 14080 spécifie les exigences de performance des produits en bois lamellé-collé destinés à être utilisés pour les bâtiments et les ponts ainsi que les exigences minimales de fabrication et les dispositions relatives à l'évaluation et à l'attestation de la conformité au marquage de ces produits.

Le bois entrant dans la constitution des éléments doit être classé selon sa résistance conformément à la norme NF EN14081-1.

La figure 16 ci-après schématise les relations entre les normes européennes pour les produits en bois de structure.

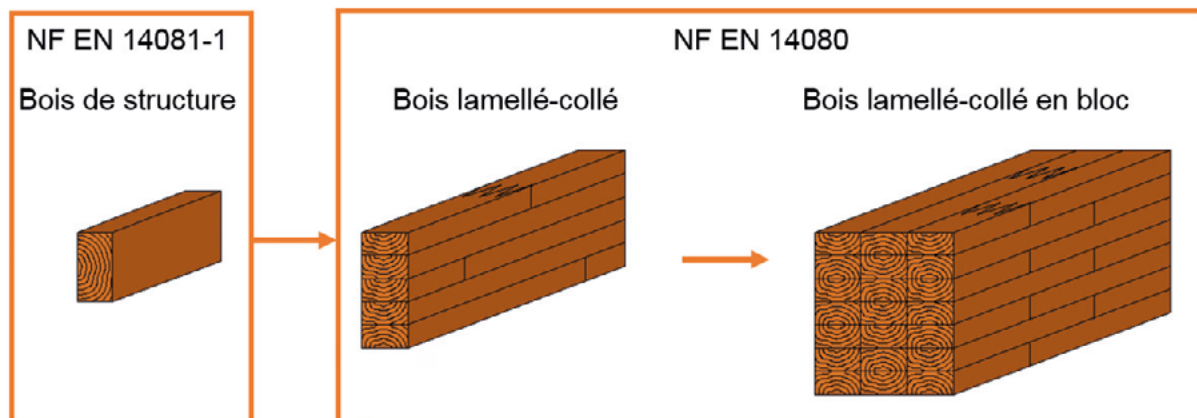


Figure 16 : Constitution du bois lamellé-collé en bloc (NF EN 14080 à partir de bois massif (NF EN 14081-1))

3.1.1.2.2 - Caractéristiques physiques et mécaniques (5.1.4.3 de la NF EN 14080)

La norme NF EN 14080 définit les propriétés caractéristiques de résistance et de rigidité et les masses volumiques du bois lamellé-collé en fonction de la classe de résistance.

La désignation de la classe de résistance est la suivante :

GLXX (exemple GL24)

Avec :

- GL : « glue lam » c'est-à-dire « lames collées » ;
- XX : résistance caractéristique en flexion en MPa.

Des indices complémentaires sont ajoutés suivant la nature et la disposition des lamelles (h : homogène ; c : panaché ; ca : panaché antisymétrique) ou dans le cas de bois refendu (s).

Pour les nervures du pont, des poutres en bois lamellé-collé homogène sont retenues : toutes les lamelles de la poutre ont la même classe de résistance. Pour assurer une disponibilité suffisante tout en bénéficiant d'une résistance satisfaisante du bois, on retient la **classe de résistance GL24h**.

Dans le cadre d'un projet, il est bien sûr tout à fait possible d'exiger des classes de résistance supérieure en s'assurant de leur disponibilité. Des classes de résistance plus élevées imposent une sélection plus stricte des bois qui doivent présenter des classes de résistances élevées. La sélection de ces bois et les rebuts qui en découlent sont de nature à augmenter le coût de la fourniture en bois. De ce fait le choix d'une classe de résistance supérieure n'apparaît pas pertinent dans le cas général.



Les propriétés caractéristiques qui découlent du choix de la classe de résistance sont données par le tableau 5 de la norme NF EN 14080 (tableau 13).

Propriétés	Symbole	Classe de résistance du bois lamellé-collé						
		GL20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL32h
Résistance à la flexion	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Résistance à la traction parallèle au fil	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
Résistance à la traction perpendiculaire au fil	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Résistance à la compression parallèle au fil	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Résistance à la compression perpendiculaire au fil	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Résistance au cisaillement (cisaillement et torsion)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Résistance au cisaillement roulant	$f_{r,g,k}$	1,2						
Module d'élasticité moyen parallèle au fil	$E_{0,g,moyen}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
Module d'élasticité parallèle au fil – Fractile à 5 % d'exclusion inférieure	$E_{0,g,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
Module d'élasticité moyen perpendiculaire au fil	$E_{90,g,moyen}$	300						
Module d'élasticité perpendiculaire au fil – Fractile à 5 % d'exclusion inférieure	$E_{90,g,05}$	250						
Module de cisaillement moyen	$G_{g,moyen}$	650						
Module de cisaillement – Fractile à 5 % d'exclusion inférieure	$G_{g,05}$	540						
Module de cisaillement roulant moyen	$G_{r,g,moyen}$	65						
Module de cisaillement roulant – Fractile à 5 % d'exclusion inférieure	$G_{r,g,05}$	54						
Masse volumique caractéristique	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
Masse volumique moyenne	$\rho_{g,moyen}$	370	410	420	445	460	480	490

Tableau 13 : Propriétés caractéristiques de résistance et de rigidité en N/mm^2 et masses volumiques en kg/m^3 pour le bois lamellé-collé homogène – Tableau 5 de la NF EN 14080 – Les cases entourées en gras concernent les caractéristiques la classe de résistance GL24h

La résistance mécanique du bois lamellé-collé en bloc correspond à la résistance mécanique de ses composants en bois lamellé-collé.

3.1.1.2.3 - Résistance et réaction au feu (5.7 et 5.8 de la NF EN 14080)

La résistance au feu des produits en lamellé-collé (cf. 5.7 de NF EN 14080) est déduite indirectement en utilisant les caractéristiques géométriques (dimensions des éléments, section, combinaison) et les propriétés des matériaux (résistance, rigidité et masse volumique).

Dans le cas d'un pont routier, il n'y a en général pas de prescriptions relatives à la classe de performance de réaction au feu des produits en lamellé-collé. En cas de besoin, cette classe de performance est à déterminer selon les éléments donnés par le paragraphe 5.8 de la norme NF EN 14080.

3.1.1.3 - Les adhésifs pour la production de bois lamellé-collé

3.1.1.3.1 - Généralités (NF EN 14080 § 5.5.3.1)

Les adhésifs (la colle) doivent produire des liaisons durables dans les produits en lamellé-collé pendant la durée de vie de la structure pour la classe de service requise conformément à l'EN 1995-1-1.

Le site d'implantation du pont type doit permettre de positionner les bois en classe de service 2, les adhésifs doivent alors être de type I selon la norme NF EN 301 – « Adhésifs de nature phénolique et aminoplaste, pour structures portantes en bois – Classification et exigences de performances » [17] ou selon la norme NF EN 15425 – « Adhésifs – Adhésifs polyuréthane mono composants pour charpentes en bois portantes – Classification et exigences relatives à la performance » [24].

3.1.1.3.2 - Exigences particulières pour les joints de collage d'un bois lamellé-collé en bloc

Les adhésifs pour les joints de collage entre les composants en bois lamellé-collé d'un bois lamellé-collé en bloc doivent être de nature phénolique et aminoplaste (tableau 7 de l'EN14080) et donc satisfaire aux exigences de la norme NF EN 301. Ces adhésifs doivent être aptes à être utilisés pour des joints de colle épais (adhésif classifié GF dans la NF EN 301).

Selon le paragraphe 4 de la norme NF EN 301, la désignation des adhésifs se fait de la façon suivante :

- le type : **I** (pour les classes de service 1, 2 ou 3 de la NF EN 1995-1-1) ou **II** (classe de service 1 uniquement) ;
- l'application (**GP** : usage général ; **FJ** : aboutage par entures multiples ; **GF** : joint épais) ;
- la température maximale d'essai en degrés Celsius (**70** ou **90** pour le type I) ;
- l'épaisseur maximale d'utilisation (**0,1** ; **0,3** ; **0,6** ; **1,5**) ;
- l'utilisation : **M** pour application en mélange et **S** pour application séparée de l'adhésif et du durcisseur.

Ainsi la désignation de l'adhésif requis pour le collage en bloc est la suivante :

EN301 I 90 GF 1,5 M

La norme NF EN 14080 précise également que les exigences de fiabilité et de durabilité des liaisons par collage des composants en bois lamellé-collé du bois lamellé-collé en bloc sont considérées comme satisfaites pour les bois lamellé-collé en bloc destinés à être utilisés en classe de service 2, si les exigences minimales de fabrication spécifiées à l'annexe I « Exigences minimales de fabrication », article I.7 de la norme sont satisfaites.

La norme NF EN 301 définit le niveau des exigences de performance pour les essais de caractérisation qui est fonction du type d'adhésif (exigences plus élevées pour les adhésifs de type I). Les essais de caractérisation sont les suivants :

- essai de cisaillement en traction selon NF EN 302-1 [18] ;
- essai de délamination selon NF EN 302-2 [19] ;
- essai d'endommagement des fibres selon NF EN 302-3 [20] ;
- essai de retrait selon NF EN 302-4 [21] ;
- essai de charge statique selon NF EN 302-8 [23] ;
- essai de type de l'adhésif pour aboutage par entures multiples en application séparée.

La résistance des joints de collage entre composants en bois lamellé-collé (paragraphe 5.5.7.2 de la NF EN 14080) doit être vérifiée par des essais de cisaillement (réalisés conformément à l'annexe D de NF EN 14080) et des essais de délamination (réalisés conformément à l'annexe C de NF EN 14080). Les niveaux d'exigence spécifiés pour ces joints destinés au collage en bloc sont les mêmes que ceux exigés pour le collage des lamelles des composants en lamellé-collé.

En particulier, la résistance au cisaillement de chaque joint de collage doit être au moins égale à 6 N/mm² (selon tableau 10 de NF EN 14080) dans les conditions de l'essai.

La durée minimale de pressage du joint de colle épais entre composants doit être déterminée selon la norme NF EN 302-6 [22] (paragraphe 5.5.3.2.3 de la NF EN 14080).

3.1.1.4 - Les traitements de préservation

La solution standard proposée pour le pont type constitué de bois en classe d'emploi 2 est basée sur la durabilité naturelle des essences de bois sélectionnées et aucun traitement de préservation n'est envisagé.

Pour mémoire, nous rappelons qu'en cas de recours à des traitements de préservation, il sera exigé une attestation de traitement conformément au modèle de la norme NF B 50-105-3 et que pour les produits de préservation, il sera exigé les certifications CTBP + et CTBB + gérées par le CTBA.

3.1.1.5 - Les finitions

Si le maître d'ouvrage le souhaite, il est possible d'avoir recours à des lasures (NF EN 927 « Peintures et vernis — « Produits de peinture et systèmes de peinture pour le bois en extérieur » cf. références [26] et [27]). Ces lasures peuvent être teintées ou non et peuvent contenir des biocides contre le bléuissement en service. La protection qu'elles confèrent contre les reprises d'humidité permet de lutter indirectement contre les attaques fongiques. Les lasures de finition ont une durée de vie variable selon l'exposition, entre 4 et 6 ans, et il faut être conscient qu'elles exigent un entretien régulier.



3.1.1.6 - L'évaluation de la conformité et le marquage des bois en lamellé-collé

Le marquage CE des bois lamellé-collé mis en œuvre est exigé. Il existe également une certification Acerbois-Glulam pour garantir une fabrication selon les règles de l'art qu'il est recommandé d'exiger au marché.

La conformité des produits en lamellé-collé aux exigences de la norme NF EN 14080 ainsi qu'aux valeurs déclarées (y compris les classes) doit être démontrée par :

- un essai de type initial ;
- un contrôle de la production en usine par le fabricant, y compris l'évaluation du produit.

Le fabricant doit toujours conserver la maîtrise globale du processus de fabrication et disposer des moyens nécessaires pour assumer la responsabilité du produit.

Chaque produit lamellé-collé conforme à cette norme doit porter un marquage clair sur sa surface ou sur une étiquette permanente fixée sur cette surface, comportant notamment, en ce qui concerne le bois lamellé-collé homogène en bloc, les informations indiquées ci-après :

- l'identité du fabricant, logo ou nom ;
- les valeurs de résistance, de rigidité et de masse volumique du bois lamellé-collé ;
- la semaine et l'année de fabrication ou un code de traçabilité ;
- le type d'adhésif conformément à la norme NF EN 301 et la famille d'adhésifs ;
- la méthode d'essai de la résistance du collage déclarée selon « A », « B », « C », si les essais sont réalisés par les méthodes de délamination A, B ou C ou par « S », si l'essai est réalisé selon la méthode du cisaillement de bloc ;
- « PT » pour un bois lamellé-collé traité contre les attaques biologiques.

3.1.2 - Bétons

Cette partie n'aborde que le béton du hourdis et de la retombée de dalle. Les choix relatifs aux bétons des appuis et fondations devront faire l'objet d'une analyse spécifique au site d'implantation de l'ouvrage.

3.1.2.1 - Choix des bétons

3.1.2.1.1 - Caractéristiques générales

Les caractéristiques attendues du béton de la dalle sont les mêmes que celles que l'on peut exiger pour un pont mixte acier/béton (cf. guide Sétra « Ponts mixtes acier/béton » Guide de conception durable, de septembre 2010 [44]) :

- présenter une fluidité compatible avec une mise en œuvre avec un ferraillage dense ;
- avoir un retrait limité ;
- présenter une excellente durabilité.

3.1.2.1.2 - Classe de résistance

Le **béton** est dans le cas général de **classe de résistance C35/45** au sens de la norme NF EN 206/CN [32], ce qui assure **un bon compromis entre retrait et durabilité**.

3.1.2.1.3 - Classes d'exposition de la dalle

(cf. EN 1992 – 1-1 4.2 complété par EN 1992 – 1-1 AN4.2(2) [36] et fascicule 65 du cahier des clauses techniques générales « Exécution des ouvrages de génie civil en béton » [53])

L'exposition à la carbonatation (classe d'exposition XC) est variable selon les parties d'ouvrage, les classes d'exposition suivantes peuvent être retenues :

- XC4 pour les parties aériennes des ouvrages d'art, ce qui correspond aux faces latérales et à la sous-face du hourdis et à la partie vue de la retombée de dalle ;
- XC3 pour les bétons abrités de la pluie, ce qui correspond aux surfaces sous étanchéité ; c'est le cas de l'extrados et le cas échéant de la retombée de dalle côté terre si elle est protégée par une étanchéité ;
- XC2 pour les bétons en contact avec les remblais, ce qui correspond aux faces de la dalle de transition et de la retombée de dalle en contact avec les remblais.

L'exposition aux chlorures (classe d'exposition XD) dépend du site d'implantation de l'ouvrage. Les parties d'ouvrage soumises à des projections fréquentes ou très fréquentes et contenant des chlorures sont classées XD3, ce qui correspond généralement à la face supérieure des longrines. Les faces du hourdis dans le cas de salages fréquents ou très fréquents sont essentiellement exposées à des chlorures transportés par voie aérienne et sont classées XD1.

L'exposition au gel/dégel (classe d'exposition XF) dépend également du site d'implantation de l'ouvrage. Les surfaces de béton directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel (dessus des longrines d'ancrage des dispositifs de retenue, corniches) sont classées :

- XF2 avec un dosage en liant équivalent d'au moins 370 kg/m^3 en cas de gel faible ou modéré et de salage fréquent ;
- XF4 G + S en cas de gel faible ou modéré et de salage très fréquent (voie portée) ou en cas de gel sévère.

La classification « G + S » désigne des bétons devant résister au gel sévère en présence de sels de déverglaçage, avec un salage fréquent ou salage très fréquent (cf. Guide technique LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » – Décembre 2003 [48] et les spécifications associées).

Compte tenu du gabarit dégagé par le pont au-dessus des voies circulées, lorsque le béton de la dalle est situé à au moins 6 m des chaussées franchies, la classe XF4 n'est pas à considérer quel que soit le site d'implantation de l'ouvrage. La classe d'exposition est donc XF1 en cas de gel faible ou modéré et XF3 G en cas de gel sévère.

La classification « G » désigne des bétons devant résister au gel sévère sans sels de déverglaçage ou avec un salage peu fréquent (cf. Guide technique LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » – Décembre 2003 et les spécifications associées).

L'exposition aux chlorures présents dans l'eau de mer n'est pas abordée (classe d'exposition XS), ceci est à examiner le cas échéant dans le cadre d'un projet individuel. Le béton de la dalle n'est en général pas concerné par les attaques chimiques (classe d'exposition XA).

En résumé, dans les cas les plus courants, les **classes d'exposition** à considérer pour le **béton de la dalle** seront **XC4 et XF1**.

3.1.2.1.4 - Formulation des bétons

Dans le cadre d'une approche classique, certaines hypothèses importantes sont fixées comme :

- le niveau de prévention des risques liés à l'alcali-réaction et à la réaction sulfatique interne ;
- l'intensité du gel et du salage des voies portées et franchies ;
- la classe de résistance du béton.

Afin de garantir la durabilité du béton, le cahier des charges fixe également plusieurs paramètres importants comme la teneur, la nature et certaines caractéristiques du ciment et le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$ (eau efficace sur liant équivalent).

Le tableau 14 donne les caractéristiques que l'on pourra généralement exiger pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans pour un béton en classes d'exposition XC4, XF1.



Classe d'exposition	Classe de résistance	Teneur minimale en liant équivalent vis-à-vis de la durabilité	Eff/Leq vis-à-vis de la durabilité	Caractéristiques complémentaires
XF1 XC4	C35/45	330 kg	0,50	RAG, RSI

Tableau 14 : Caractéristiques usuelles du béton de la dalle du pont type

Avec :

RAG : spécifications complémentaires visant à prévenir les désordres liés à l'alcali-réaction (cf. FD P 18-464 – Béton – Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction – Avril 2014 [33]).

RSI : spécifications complémentaires visant à prévenir les désordres liés à la réaction sulfatique interne (cf. guide technique LCPC « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne » – Ifsttar – Août 2007 [47]).

En cas de gel sévère, la désignation du béton est la suivante XF3, XC4/C35/45/385 kg/0,50/AO > 4 % – G – RAG – RSI.

3.1.2.2 - Enrobage

3.1.2.2.1 - Généralités

Afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage, l'Eurocode exige un enrobage nominal c_{nom} pour protéger les aciers du béton armé contre la corrosion. Cet enrobage se calcule par la formule suivante :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad [EC2-1-1, 4.4.1.1 (4.1)]$$

La valeur Δc_{dev} représente une marge de tolérance d'exécution. La valeur recommandée est de 10 mm. Dans le cas d'une utilisation d'un système d'assurance qualité, elle peut être réduite à :

$$5 \text{ mm} \leq \Delta c_{dev} \leq 10 \text{ mm} \quad [EC2-1-1 + AN, 4.4.1.3 (4.3N)]$$

La maîtrise de la qualité étant habituelle sur les chantiers d'ouvrages d'art où un Plan Assurance Qualité (PAQ) est de rigueur, nous retiendrons une valeur de :

$$\Delta c_{dev} = 5 \text{ mm}$$

La valeur c_{min} représente l'enrobage minimal. Il doit garantir la bonne transmission des forces d'adhérence et la protection de l'acier contre la corrosion. Il permet également d'obtenir une résistance au feu convenable.

L'enrobage minimal c_{min} doit satisfaire aux exigences suivantes :

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\} \quad [EC2-1-1, 4.4.1.2 (4.2)]$$

Avec :

$c_{min,b}$: enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence.

Il est donné selon le tableau 15 ci-dessous :

Exigences vis-à-vis de l'adhérence	
Disposition des armatures	Enrobage minimal $c_{min,b}$
Armature individuelle	Diamètre de la barre
Paquet	Diamètre équivalent (Φ_n)
Si la dimension nominale du plus gros granulat est supérieure à 32 mm, il convient de majorer $c_{min,b}$ de 5 mm	

Tableau 15 : Enrobage minimal $c_{min,b}$ requis

- $\Delta c_{dur,\gamma}$: marge de sécurité. La valeur recommandée est de 0 mm ;
- $\Delta c_{dur,st}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'aciers inoxydables.

Cette réduction est définie par les pièces du marché. La valeur recommandée par l'Eurocode est de 0 mm (EN 1992-1-1 4.1.1.2 Tab 4.3NF) ;

- $\Delta c_{dur,add}$: réduction d'enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire. La valeur à utiliser est $\Delta c_{dur,add} = 0$ mm, sauf pour les revêtements adhérents justifiés vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs pendant la durée d'utilisation de projet (EN 1992-1-1 4.2 Tab 4.1) ;
- $c_{min,dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement. Il est défini selon la classe structurale et la classe d'exposition.

La classe structurale à utiliser pour les bâtiments et ouvrages de génie civil courants est S4 cela correspond à une durée de vie de 50 ans et il est nécessaire de porter cette classe à S6 pour les ponts compte tenu d'une durée de vie visée de 100 ans. Des modifications de classe structurale sont possibles et sont définies dans l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1 4.2 Tab 4.1).

3.1.2.3 - Détermination des enrobages

La détermination des enrobages s'établit selon la classe d'exposition des faces. La figure 17 ci-dessous résume les principales classes à considérer.

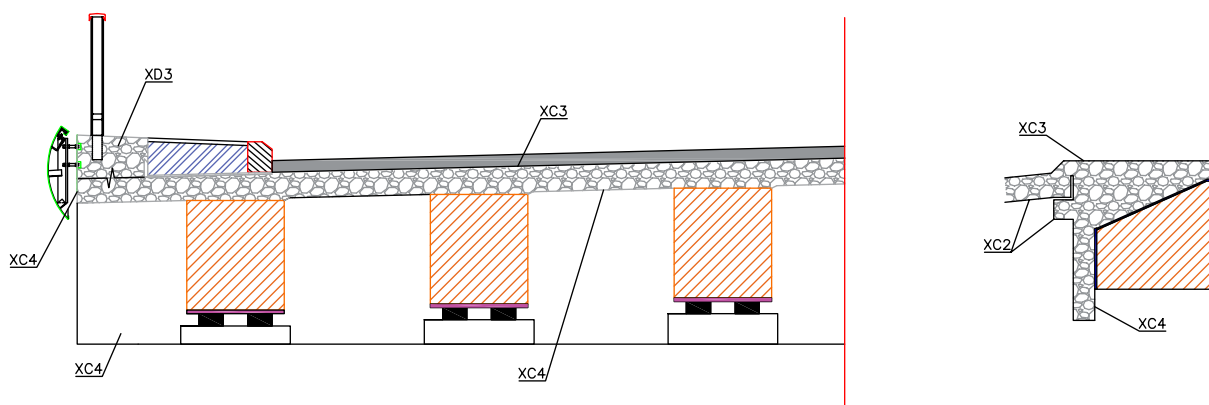


Figure 17 : Classe d'exposition des surfaces de béton pour la détermination des enrobages

3.1.2.3.1 - Pour les surfaces protégées par une étanchéité (XC3)

La classe structurale devient : $4 + 2 - 1 - 1 = 4$

La classe S4 (+4) est modifiée par la durée d'utilisation supérieure à 100 ans (+2), la classe du béton supérieure ou égale à C30/37 (-1) et la nature du ciment (-1) si le ciment est un CEM I et si le béton ne contient pas de cendres volantes.

$c_{min,dur} = 25$ mm ; $c_{min} = 25$ mm ; $c_{nom} = 30$ mm

3.1.2.3.2 - Pour les faces latérales et la sous-face du hourdis et pour la face vue de la retombée de dalle (XC4)

Classe structurale : $4 + 2 - 1 = 5$

+2 : durée d'utilisation supérieure à 100 ans ; -1 : classe du béton supérieure ou égale à C35/45.

$c_{min,dur} = 35$ mm ; $c_{min} = 35$ mm ; $c_{nom} = 40$ mm

3.1.2.3.3 - Pour la face supérieure de longrine (XD3)

Classe structurale : $4 + 2 = 6$

+2 : durée d'utilisation supérieure à 100 ans.

$c_{min,dur} = 55$ mm ; $c_{min} = 55$ mm ; $c_{nom} = 60$ mm

Il convient d'attirer l'attention sur les problèmes de fissuration auxquels risque de conduire un enrobage c_{nom} supérieur à 50 mm. Il est donc recommandé, en cas d'environnement agressif, d'utiliser les dispositions du Tableau 4.3 NF et les clauses 4.4.1.2 (7) et (8) et 4.4.1.3 (3).



3.1.2.3.4 - Pour les faces en contact avec le remblai (XC2)

La classe structurale devient : $4 + 2 - 1 - 1 = 4$

La classe S4 (+4) est modifiée par la durée d'utilisation supérieure à 100 ans (+2), la classe du béton supérieure ou égale à C30/37 (-1) et la nature du ciment (-1) si le ciment est un CEM I et si le béton ne contient pas de cendres volantes.

$$c_{\min, \text{dur}} = 25 \text{ mm} ; c_{\min} = 25 \text{ mm} ; c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$$

3.1.3 - Plaque acier et éléments de connexion

3.1.3.1 - Plaque acier

La **plaque de connexion** est en **acier** conforme à la norme NF EN 10025-2 [30], de nuance **S355 de qualité K2** compte tenu de sa faible épaisseur ($\leq 30 \text{ mm}$).

3.1.3.2 - Goujons de connexion dans la dalle béton

Les **goujons** sont en **acier** de nuance **S235J2G3** conforme à la norme EN 13918 [31], présentant une résistance caractéristique à la rupture **$f_u = 450 \text{ MPa}$** .

3.1.3.3 - Éléments de fixations dans le bois

Les éléments de fixation susceptibles d'être utilisés dans des structures portantes en bois sont les vis (ou tirefonds), les broches et les boulons. Ils sont dénommés éléments de fixation de type tige. La norme NF EN 14592 +A1 – « Structures en bois – Éléments de fixation de type tige – Exigences » [13] spécifie les exigences et méthodes d'essais des matériaux concernant les aspects géométriques, la résistance, la rigidité et la durabilité de ces éléments de fixation. Elle précise les principes de l'évaluation de la conformité de ces éléments.

Le matériau constitutif de ces éléments est l'acier.

3.1.3.3.1 - Les tirefonds

Les **tirefonds** sont des vis en **acier à haute limite d'élasticité** (limite élastique aux environs de 900 MPa). Ils présentent **une partie filetée**.

Les principales caractéristiques géométriques des tirefonds sont :

- le diamètre nominal d (d doit être compris entre 2,4 et 24 mm) ;
- la longueur l ;
- la longueur filetée l_g (l_g doit être supérieure ou égale à $4d$) ;
- le diamètre intérieur de la partie filetée d_1 (d_1 doit être compris entre $0,6d$ et $0,9d$).

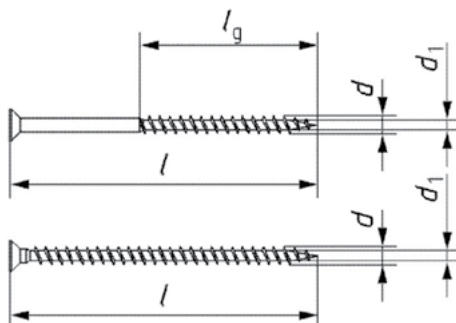


Figure 18 : Principales caractéristiques géométriques des tirefonds – Extrait figure 1 de la NF EN 14592 +A1

Les principales caractéristiques de résistance et de rigidité des tirefonds sont :

- le moment d'écoulement plastique caractéristique $M_{y,k}$;
- le paramètre d'arrachement caractéristique $f_{ax,k}$;
- le paramètre de traversée de la tête caractéristique $f_{head,k}$;
- la capacité de traction caractéristique $f_{tens,k}$;
- le taux de torsion caractéristique $f_{tor,k}$.

Ces caractéristiques doivent être déclarées soit directement à partir d'essais soit par calcul à partir des équations indiquées dans l'EN1995-1-1. En cas de détermination des caractéristiques par essais, les normes à utiliser sont précisées au tableau 16.

Exigences vis-à-vis de l'adhérence	Norme d'essai correspondante	Article correspondant de la NF EN 14592 +A1
Moment d'écoulement plastique $M_{y,k}$	NF EN 409 [14]	6.3.4.2
Paramètre d'arrachement $f_{ax,k}$	NF EN 1382 [15]	6.3.4.3
Paramètre de traversée de la tête $f_{head,k}$	NF EN 1383 [16]	6.3.4.4
Capacité de traction $f_{tens,k}$	NF EN 1383	6.3.4.5
Taux de torsion $f_{tor,k}$	NF EN ISO 10666 [25]	6.3.4.6

Tableau 16 : Caractéristiques de résistance des tirefonds et normes d'essais associées

Le tableau 4.1 de la norme NF EN 1995-1-1 n'envisage pas de protection particulière pour les tirefonds de diamètre supérieur à 4 mm en classe de service 2. Compte tenu de l'acidité des essences de bois envisagées (douglas notamment) et de la durée de vie escomptée de l'ouvrage, il est toutefois recommandé de prévoir un traitement anticorrosion adapté par exemple par galvanisation à chaud ou par dépôt de zinc (cf. norme NF EN ISO 2081 [29]). **En raison des caractéristiques mécaniques élevées de l'acier constitutif, il est indispensable de s'assurer que le procédé de protection contre la corrosion mis en œuvre n'induit pas de fragilisation par l'hydrogène (des risques existent en cas de décapage chimique préalable ou de dépôt de zinc par voie électrolytique).**

3.1.3.3.2 - Les broches et les boulons

Les broches sont le plus généralement des éléments de section transversale circulaire.

La partie filetée des boulons et des écrous doit être de section transversale circulaire.

La principale caractéristique de résistance des boulons et des broches est le moment d'écoulement plastique déterminé selon les mêmes principes que pour les tirefonds.

3.1.3.3.3 - Le marquage des éléments de fixation

Le marquage et l'emballage des éléments de fixation doivent au minimum indiquer les informations suivantes :

- l'identification du fabricant ;
- le numéro de la norme (NF EN 14592) ;
- le type d'élément de fixation (vis ou tirefonds, boulons, broches) ;
- le diamètre d et la longueur l nominaux ;
- la nuance du matériau de base ;
- l'épaisseur de la protection contre la corrosion ;
- le moment d'écoulement plastique caractéristique.

Pour les tirefonds, les informations complémentaires suivantes doivent être indiquées :

- le paramètre d'arrachement caractéristique ;
- le paramètre de traversée de la tête caractéristique ;
- la capacité de traction caractéristique ;
- le diamètre interne du filetage d_i ;
- la longueur de la partie filetée l_g .

Le marquage CE des éléments de fixation de type tirefond utilisés dans la fabrication du tablier est obligatoire et attesté par la présentation d'un agrément technique européen couvrant l'usage prévu.



3.2 - Dispositions pour la protection des nervures en bois en phase transitoire de construction

Le présent guide propose des dispositions constructives visant à assurer la durabilité des nervures en bois durant la vie en service du pont. Des dispositions doivent également être prises pour protéger les nervures, et tout particulièrement leur face supérieure, depuis l'instant où elles quittent les locaux de l'usine jusqu'au moment où le hourdis béton armé assure son rôle de « parapluie ». Il s'agit **d'éviter l'exposition aux intempéries (transport, stockage et mise en œuvre sur site) et de limiter les reprises d'eau des surfaces de bois dans le cas du contact avec le béton frais.**

Les dispositions de protection provisoire des nervures en bois doivent faire l'objet de spécifications dans les cahiers des charges des marchés de travaux, puis de propositions des entreprises titulaires.

Pour les phases de transport, stockage et manutention sur site, une protection par bâches provisoires étanches est généralement adaptée. Pour le stockage provisoire, les nervures ne doivent pas reposer sur le sol et doivent être suffisamment surélevées.

En revanche, une fois les poutres positionnées sur appuis définitifs, compte tenu des délais de réalisation du hourdis (particulièrement dans le cas d'un hourdis coulé en place où la pose du ferrailage est une opération relativement longue qui s'échelonne sur plusieurs jours) la solution la plus pertinente pour protéger le bois paraît être une protection directe des surfaces exposées. La mise en œuvre d'un abri protégeant intégralement le tablier, si elle ne doit pas systématiquement être exclue, paraît en effet difficilement envisageable dans le cas général.

La protection directe du bois peut être réalisée par application d'une peinture limitant massivement la pénétration de l'eau. Il paraît pertinent d'appliquer cette protection sur la totalité de la surface supérieure des nervures avec un retour de 5 à 10 cm sur les faces latérales avant mise en œuvre des éléments de connexion. La peinture est également appliquée aux extrémités des nervures.

La fonction principale recherchée pour la peinture est le contrôle de la pénétration de l'eau et des variations dimensionnelles qui en découlent. La norme NF EN 975-1 – tableau 1 intègre ces considérations sous la forme de trois grandes catégories d'usage final, à savoir non stable, semi-stable et stable, caractérisant la maîtrise des variations dimensionnelles et permettant de sélectionner un système de peinture. Dans le cas de la présente utilisation, le système de peinture doit être classé dans la catégorie d'usage final « stable ». Les performances attendues sont à spécifier en référence à la norme NF EN 927-2, en particulier le système de peinture doit avoir fait l'objet d'essais de performance qualifiant ses propriétés vis-à-vis de l'absorption d'eau. Pour une catégorie d'usage final « stable », la valeur d'absorption à l'eau déterminée selon la norme NF EN 927-5 [28] doit être comprise en 30 g/m² et 175 g/m².

3.3 - Conception des nervures en bois

3.3.1 - Conception générale des nervures

La largeur des nervures en bois varie environ de 0,80 m dans le cas général à, plus exceptionnellement, 1,20 m. Ces nervures sont obtenues par collage de 4 à 6 poutres unitaires en bois lamellé-collé de section rectangulaire constante. Pour optimiser les cycles de collage en usine, un nombre pair de poutres est à privilégier et l'on choisit des poutres unitaires de la plus grande largeur possible soit environ 200 mm. La largeur maximale est notamment conditionnée par les moyens de manutention en usine (masse de la nervure finale) et par le procédé de recollage de bloc (géométrie des bancs de recollage).

Les poutres unitaires en bois lamellé-collé sont fabriquées industriellement en usine selon des éléments de profil déterminé. Il existe ainsi des gammes de produits propres à chaque fabricant, le débit d'une section particulière est possible, mais plus coûteux.

En France, selon les usines, on trouve principalement deux familles de section pour le lamellé-collé qui permettent de construire des poutres jusqu'à environ deux mètres de haut et quarante-cinq mètres de long :

Sections « françaises » :

- Épaisseur des lamelles (mm) : 30 – 33,3 – 33,5 – 35 – 45
- Largeur standard (mm) : 90 – 115 – 140 – 160 – 185 – 210
- Hauteur (mm) : de 400 à 2000 mm environ

Sections « allemandes » :

- Épaisseur des lamelles (mm) : 40
- Largeur standard (mm) : 60 – 80 – 100 – 120 – 140 – 160 – 180 – 200
- Hauteur (mm) : de 400 à 2010 mm

Là où les dimensions des poutres en bois massif sont limitées, les poutres en bois lamellé-collé peuvent ainsi atteindre jusqu'à 45 mètres de longueur, ce qui permet de couvrir la gamme de portée visée.

Compte tenu des moyens de levage actuellement disponibles en usine, **la masse des nervures doit être limitée à une douzaine de tonnes pour favoriser la compétitivité de la solution.**

Les nervures massives présentent une inertie de torsion relativement élevée. La conservation du monolithisme des nervures sous les actions de torsion est importante car elle assure un fonctionnement homogène en flexion longitudinale des poutres unitaires composant la nervure.

En dessous de 4 poutres unitaires en lamellé-collé par nervures, le monolithisme est assuré par la maîtrise du procédé de recollage de bloc et il n'est pas nécessaire de mettre en œuvre des barres transversales.

Au-delà de 4 poutres par nervure et selon les moyens de l'entreprise, un système de barres transversales peut être prévu pour assurer le monolithisme des nervures. Dans ce cas, le système n'est pas pris en compte dans le calcul (calcul en poutres indépendantes en ne considérant que les plans de collages réalisés dans des conditions jugées maîtrisées).

Le système de barres peut être constitué de tiges filetées en acier aptes à la galvanisation à chaud d'un diamètre de l'ordre de 20 mm positionnées dans le tiers inférieur des nervures. Le serrage doit rester modéré de telle sorte que la contrainte appliquée au bois soit de l'ordre de 0,5 MPa.

3.3.2 - Paramètres principaux de la poutraison

Lorsque les portées et le schéma statique du tablier sont fixés, le projeteur doit déterminer l'élancement des nervures. Plusieurs solutions sont possibles selon que l'on accorde la prépondérance à l'un ou l'autre des deux critères suivants :

- **critère de gabarit** : dans ce cas, on privilégie une diminution de la hauteur des nervures en les resserrant ou les élargissant. Il n'est toutefois pas économique de rechercher une minceur extrême, car le volume de bois nécessaire croît rapidement. En outre, plus la nervure est large plus les cisaillements de torsion sont susceptibles d'être importants et ce point doit alors faire l'objet d'une vérification particulière ;
- **critère d'économie** : cette option peut être envisagée quand l'ouvrage n'est soumis à aucune contrainte de gabarit, on choisit alors des nervures plus hautes et plus espacées.

Les paramètres fondamentaux qui permettent de définir la section transversale du tablier sont ainsi :

- l'élancement ;
- la largeur d'encorbellement ;
- l'espacement entre axes des poutres ;
- la faisabilité technologique des nervures.

L'élancement des nervures du pont mixte bois/béton à nervures sous chaussée est de l'ordre de 1/15^e.

Comme cela a déjà été précisé, la largeur de l'encorbellement est déterminée de façon à assurer une protection des nervures de rive vis-à-vis des intempéries en veillant à respecter un angle de 45° maximum par rapport à l'horizontale. Il est possible de jouer sur la hauteur de la corniche.

L'espacement entre axes des nervures peut varier de 1,5 à 2 m environ pour une largeur de nervure de l'ordre de 0,80 m à 1,20 m.



Si l'on considère des portées de 15 m et un élancement de 1/15°, la hauteur des poutres est de l'ordre de 1,00 m. En fixant un encorbellement de 1 m et un entraxe des poutres à 2 m, on détermine le nombre de nervures en fonction de la largeur du tablier, pour des nervures de 0,80 m de large (tableau 17).

Largeur (m)	6	8	10	12	14
Nombre de nervures	3	4	5	6	7

Tableau 17 : Choix indicatif du nombre de nervures en fonction de la largeur de tablier

3.4 - Conception de la connexion

Comme précisé au début du guide, le système de connexion envisagé ici est constitué de plaques métalliques sur lesquelles des goujons sont soudés en face supérieure pour assurer la connexion au béton et qui présentent des perçages permettant leur liaison au bois par tirefonds vissés.

3.4.1 - Plaques d'interface en acier

3.4.1.1 - Géométrie en plan des plaques

Deux familles de conception de plaques peuvent *a priori* être envisagées :

- plaques isolées de dimensions décimétriques ;
- plaques jointives formant une couverture intégrale des nervures.

Plaques isolées de dimensions décimétriques

L'option la plus simple et la plus économique consiste à réaliser des plaques isolées dont les dimensions en plan sont inférieures au mètre. Pour des largeurs de nervures de 0,80 à 1,20 m deux plaques peuvent être positionnées dans la largeur de nervure. Dans le sens de la longueur, l'espacement des plaques est adapté en fonction de l'intensité de l'effort de glissement à reprendre à l'interface bois/béton. La géométrie des plaques peut être standardisée avec le cas échéant des plaques renforcées en termes de nombre de connecteurs aux extrémités des nervures. Les plaques peuvent être enchâssées dans des réservations réalisées sur le dessus des nervures (photo 9).



Photo 9 : Engravures dans les nervures en bois pour logement des plaques de connexion (Source : Arbonis)

Plaques jointives formant une couverture intégrale des nervures.

Une autre conception peut consister à recourir à un système de plaques métalliques recouvrant intégralement la face supérieure des nervures en bois. Cette disposition permet de limiter grandement l'exposition de la face supérieure des nervures aux intempéries sur chantier et leur humidification au contact du béton frais en cas de coulage de béton sur nervures. Un traitement spécifique (joints silicones par exemple) des pourtours de plaques et des têtes de tire-fond sur plaques peut être envisagé dans le but d'assurer une meilleure étanchéité. En cas de doute, il est tout à fait possible d'appliquer un système de peinture sur la face supérieure de nervures préalablement à la pose des plaques, comme précisé ci-avant.

En retenant des plaques continues dans la longueur des nervures, il est envisageable de les faire participer à la reprise des efforts dans les zones de moments négatifs où le béton du hourdis est fissuré.

Dans le sens transversal, le nombre de plaques doit tenir compte des capacités de rabotage automatique en largeur des nervures. Pour assurer un bon contact entre la plaque et la face supérieure de la nervure, une plaque ne doit recouvrir que des éléments dont les faces supérieures ont été rabotées dans une même opération. Les moyens actuels permettent d'atteindre des largeurs de rabotage de l'ordre du mètre et donc d'envisager des plaques métalliques en pleine largeur dans le cas général (photo 10).



Photo 10 : Rabotage automatique de la face supérieure des nervures en bois (Source : Arbonis)

Cette solution à plaques jointives formant une couverture intégrale des nervures a l'inconvénient d'être plus onéreuse et plus complexe à mettre en œuvre notamment pour les phases de manutention (masse, longueur, etc.).

3.4.1.2 - Épaisseur des plaques

L'épaisseur des plaques est généralement **supérieure ou égale au diamètre nominal des tirefonds**, soit en général **au moins 12 mm d'épaisseur**.

3.4.1.3 - Protection anticorrosion des plaques

Les plaques sont protégées vis-à-vis de la corrosion (acidité liée aux tanins) par un système anticorrosion, par exemple système ACQPA, **sur la face en contact avec le bois** et sur ses tranches avec un retour sur la face côté béton.

3.4.2 - Tirefonds

Le diamètre extérieur de la partie filetée des tirefonds employés est de l'ordre de 12 mm. La longueur de pénétration dans le bois est de l'ordre de 15 cm.

Les conditions sur l'espacement et les distances au bord des tirefonds à respecter sont données par le tableau 8.6 de la norme NF EN 1995-1-1/A1.

La mise en œuvre des tirefonds doit respecter les préconisations du fournisseur (diamètre et profondeur de préperçage, contrôle du couple de serrage, etc.) et **des essais préalables de mise en œuvre sont recommandés pour valider le mode opératoire**. Une attention particulière sera notamment apportée à la qualité du contact de la tête du tirefond sur la plaque.



3.4.3 - Goujons

Il s'agit de goujons en acier classiquement utilisés pour les ponts mixtes acier/béton, le diamètre retenu est généralement de 16 mm, leur hauteur est de l'ordre de 125 mm. La résistance unitaire d'un tel goujon est supérieure à celle d'un tirefond usuel de diamètre nominal 12 mm d'un facteur de l'ordre de 6 à 8.

3.4.4 - Dimensionnement de la connexion

La connexion de la plaque métallique dans le hourdis en béton réalisée par l'intermédiaire de goujons est considérée comme parfaite au contraire de la connexion dans le bois réalisée par l'intermédiaire de tirefonds. La connexion par tirefonds est caractérisée par une raideur relativement élevée qui n'est cependant pas infinie.

La connexion doit permettre d'équilibrer les efforts de glissement agissant à l'interface bois/béton. Dans une poutre à une travée isostatique, ces efforts de glissement sont plus importants aux extrémités et décroissent lorsque l'on se rapproche de la mi-travée. La densité des éléments de fixation est donc importante près des culées et peut être diminuée en travée.

En ce qui concerne les tirefonds, les espacements sont rapprochés à proximité des culées où les efforts de glissement sont les plus importants tout en respectant les espacements minimaux fixés par l'Eurocode 5 (EN 1995-1-1/A1 – Fig 8.11a et Tab 8.6). En travée, l'espacement sera augmenté pour accompagner la décroissance des efforts de glissement à l'interface.

Dans le cas de ponts à travées continues, les efforts de glissement dans les sections proches des appuis intermédiaires sont élevés. Dans le fonctionnement mixte du tablier, le béton est tendu dans ces sections et ne participe pas à la résistance de la section. La connexion est cependant dimensionnée pour reprendre l'effort de glissement correspondant à l'ancrage du hourdis béton.

3.5 - Conception du hourdis

3.5.1 - Constitution et fonctions du hourdis

3.5.1.1 - Constitution du hourdis

Les éléments présentés dans cette partie sont basés sur le guide Sétra « Ponts mixtes acier/béton – Guide de conception durable » de septembre 2010 et le lecteur pourra s'y reporter pour plus de précisions sur la conception du hourdis béton armé.

Les ponts à poutres comportent en général des hourdis centraux et des hourdis en encorbellement qui sont tous des dalles appuyées sur un ou plusieurs côtés.

Le hourdis peut être :

- entièrement coulé en place sur les nervures et sur des coffrages entre nervures ;
- partiellement préfabriqué constitué de prédalles préfabriquées posées sur les nervures ;
- partiellement préfabriqué constitué de dalles préfabriquées pleine hauteur posées sur les nervures ;
- entièrement préfabriqué constitué de dalles préfabriquées pleine hauteur, couvrant tout ou partie de la largeur du tablier et équipées de fenêtres au droit des plaques de connexion pour clavage aux nervures bois.

La réalisation d'un hourdis coulé en place est possible, le coffrage peut être soutenu par des éléments porteurs longitudinaux placés entre nervures ou par un cintre général qui a cependant l'inconvénient de nécessiter une emprise sous l'ouvrage. Les nervures doivent être étayées pour éviter les fuites de laitance dues à une déformation relative des nervures avec les parties sous cintre. Dans cette conception, la connexion reprend le poids de la dalle lors des opérations de décintrement, ce qui peut permettre une certaine optimisation des nervures.

Le recours à un coffrage perdu est envisageable si la distance entre deux des nervures est inférieure au mètre.

Pour les trois premières solutions, le coffrage du hourdis en encorbellement nécessite des dispositions particulières comme le recours à une poutre métallique provisoire.



Les exigences vis-à-vis des dispositions constructives à retenir pour le hourdis sont à adapter aux enjeux du franchissement. Pour un ouvrage ayant à supporter un trafic poids lourds significatif, la présence de joints longitudinaux n'est pas recommandée et l'on privilégiera les solutions avec éléments préfabriqués pleine largeur ou avec un hourdis entièrement coulé en place. Lorsqu'il n'est pas possible d'éviter de tels joints longitudinaux (difficultés de calage d'éléments préfabriqués pleine largeur sur plusieurs nervures, impossibilité d'implantation d'un cintre, espacement entre nervures rendant impossible le recours à des coffrages perdus, etc.), leur nombre doit être limité et leurs positions judicieusement choisies pour éviter l'aplomb des bandes de roulement.

Dans le cas de recours à des éléments préfabriqués avec fenêtres de connexion, l'injection des zones non connectées est recommandée pour les ouvrages supportant un trafic poids lourds significatif.

Quelle que soit la solution retenue, il faut prendre des précautions afin d'assurer la durabilité des nervures en bois de l'ouvrage lors de la réalisation du hourdis en évitant la pénétration d'eau. La solution avec éléments préfabriqués équipés de fenêtres de connexion est celle qui limite le plus la durée d'exposition des nervures sur site ainsi que les surfaces en contact du béton frais.

Dans le cas des ouvrages légèrement courbes en plan, il est nécessaire de rattraper la courbure au niveau du hourdis par un encorbellement de largeur variable.

3.5.1.2 - Fonctions du hourdis

Les fonctions principales du hourdis sont :

- d'assurer la liaison transversale entre les nervures ;
- de servir de table de compression en travée ;
- de transmettre par flexion transversale les charges routières aux nervures ;
- d'offrir un support à l'étanchéité au revêtement de chaussée, au trottoir et à ses équipements ;
- de permettre l'ancrage des dispositifs de retenue en rive.

Dans les tabliers continus sur pile, le ferrailage longitudinal du hourdis doit être renforcé, les aciers contribuant à la rigidité de flexion de la section.

3.5.2 - Épaisseur

L'épaisseur à donner au hourdis dépend directement de sa portée transversale et devrait en principe varier avec la distance entre poutres. Dans la pratique, compte tenu de l'espacement des nervures, les conditions mécaniques ne sont pas déterminantes et l'épaisseur à retenir résulte de critères de bonne construction.

On adoptera une valeur de l'ordre de 20 à 25 centimètres dans le cas **d'une dalle en béton classique C35/45**. Dans le cas d'emploi des bétons à hautes performances, cette épaisseur peut être réduite au minimum compatible avec de bonnes dispositions constructives. La nécessité de mettre en place quatre nappes d'aciers (deux directions d'armatures sur chaque face) et d'assurer un bétonnage correct requiert dans le cas général une **épaisseur minimale du hourdis de 15 centimètres**.

D'autres considérations, comme la prise en compte d'un choc sur les dispositifs de retenue peuvent nécessiter un épaissement local du hourdis.

3.5.3 - Hourdis en dalles préfabriquées

Ce paragraphe et les illustrations qui l'accompagnent sont inspirés du §3 « Exécution de la dalle par préfabrication » du chapitre 5 du guide Sétra « Ponts mixtes acier/béton – Guide de conception durable », de septembre 2010.

3.5.3.1 - Dalle pleine hauteur

La construction de la dalle par préfabrication consiste à construire en usine ou sur une aire proche de l'ouvrage des tronçons de dalle de 2,5 à 4 m de longueur. Ces tronçons de dalle présentent des armatures en attente permettant d'assurer la continuité mécanique du hourdis. Ils sont posés sur les nervures en bois.



La mise en continuité des éléments préfabriqués et leur connexion aux nervures en bois peuvent se faire :

- par l'intermédiaire de poches de connexion : la préfabrication de la dalle se fait par éléments transversaux généralement de pleine largeur (photo 11 et figure 19), comportant des poches de connexion au droit des poutres ; ces éléments sont clavés entre eux par des joints transversaux de pleine largeur (type 1 décrit ci-dessous), le bétonnage sur site est limité aux poches de connexion et aux joints transversaux ; le hourdis est dit « entièrement » préfabriqué ;



Photo 11 : Mise en place à la grue des dalles préfabriquées avec réservations pour connexion aux nervures en bois
(Source : Nice Côte d'Azur Métropole)

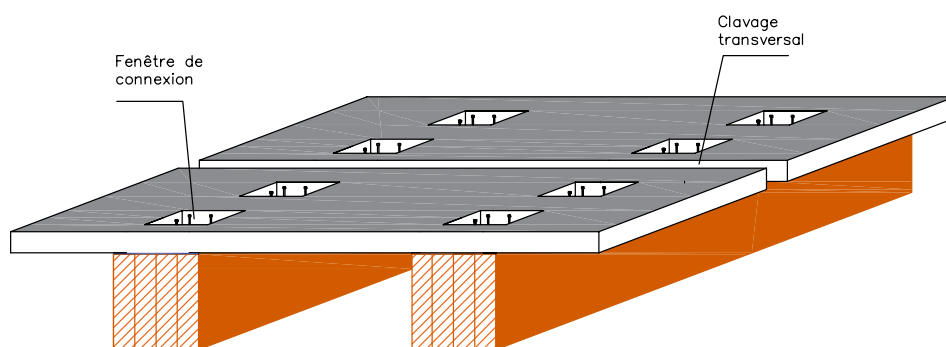


Figure 19 : Hourdis en dalles préfabriquées avec fenêtres de connexion

- par un clavage longitudinal continu (type 2 décrit ci-dessous), sur le dessus des nervures : le bétonnage sur site concerne toute la partie de hourdis située au-dessus des nervures ainsi que les clavages transversaux, la préfabrication du hourdis est partielle (figure 20).

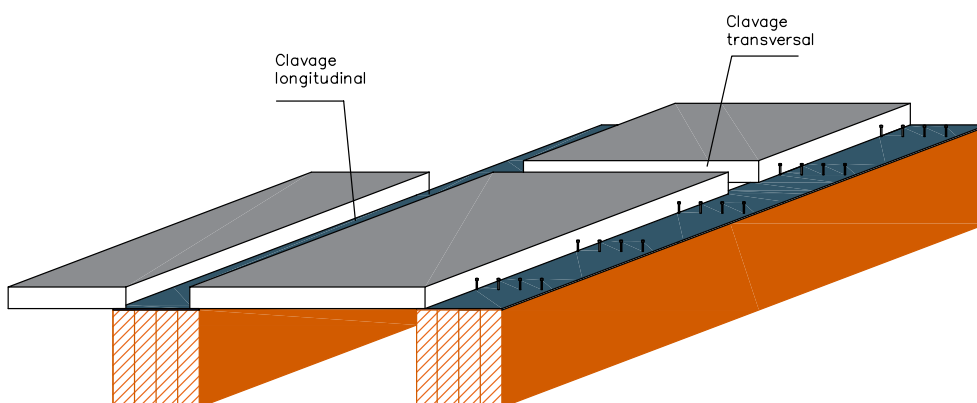


Figure 20 : Hourdis en dalles préfabriquées partielles

Sur le plan structurel, la préfabrication permet de réduire les effets du retrait du béton et le poids des prédalles ne sollicite pas la connexion. Compte tenu des portées visées pour le tablier, aucun phasage de clavage n'est *a priori* nécessaire et l'ensemble du poids des dalles est repris par les nervures bois.

La préfabrication nécessite un grand soin dans la conception et la mise en œuvre. C'est tout particulièrement le cas pour les clavages, qui doivent permettre de boucler les aciers des éléments préfabriqués contigus. Il est recommandé de prévoir des clés sur les surfaces verticales de reprise de bétonnage qui s'opposeront à tout mouvement vertical.

Un point de vigilance est le calage en planéité des dalles préfabriquées sur les nervures en bois notamment lorsqu'elles sont réalisées en pleine largeur. Au besoin, un système de réglage altimétrique (par exemple par vis) peut être envisagé, accompagné d'une injection des interstices entre le bois des nervures et le béton du hourdis.

Les clavages entre éléments préfabriqués sont de deux types :

- **type 1 : clavage dans le vide :**

Le cas du clavage transversal qui s'effectue dans le vide est complexe. Deux solutions peuvent être recommandées :

- coffrage traditionnel (figure 21) : cette solution permet la continuité de tous les aciers passifs longitudinaux ;

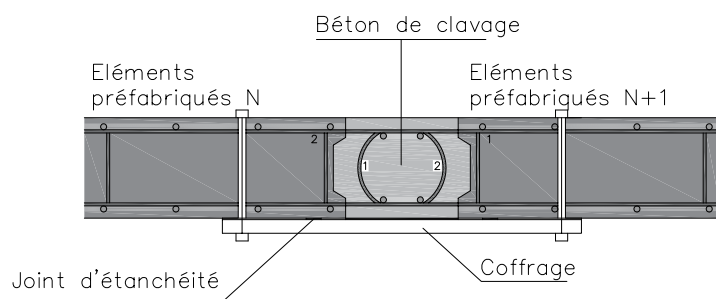


Figure 21 : Clavage transversal sur coffrage

- corbeaux en béton armé en prolongement des dalles, réalisés en surépaisseur (figure 22) ;

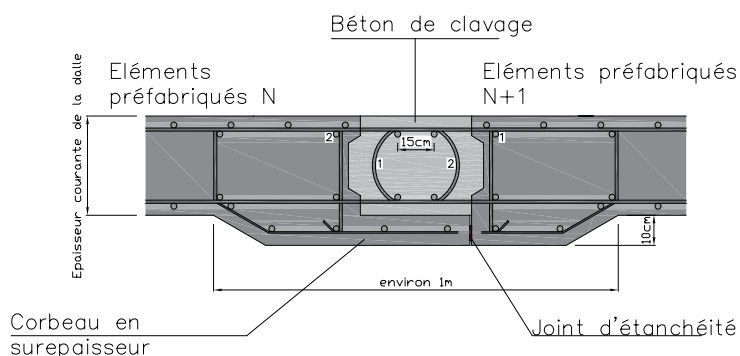


Figure 22 : Clavage transversal avec corbeaux

- **type 2 : clavage sur nervure :**

Les éléments à claver sont posés sur les nervures dont la face supérieure sert de coffrage au béton de seconde phase. Les dispositions à retenir vis-à-vis du ferrailage sont celles présentées ci-avant pour les joints de type 1 avec généralement des longueurs disponibles plus grandes pour assurer les recouvrements.



Pour ce type de joint et dans le but d'éviter le contact direct du béton frais sur le bois, les dispositions suivantes peuvent être retenues :

- clavage par poches discontinues de connexion (figure 23) : les réservations dans la dalle ont des dimensions légèrement supérieures aux plaques de connexion, le béton de clavage est mis en œuvre au contact de la plaque, des joints mastic assurent l'étanchéité sur le pourtour des réservations et au droit des têtes de vis ;

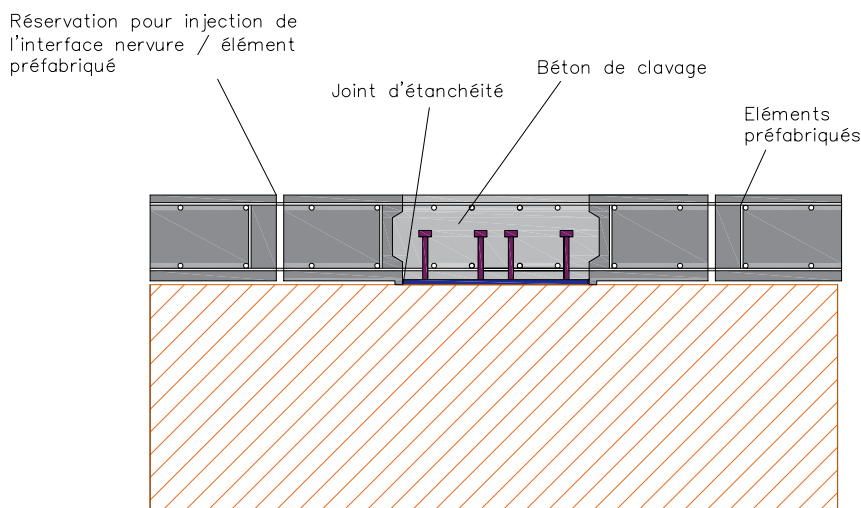


Figure 23 : Détail d'une fenêtre de clavage sur nervure

- clavage longitudinal continu sur nervures : la protection du bois est assurée soit par le recours à des plaques métalliques couvrant intégralement le dessus des nervures (figure 24), l'étanchéité pouvant être améliorée par la mise en œuvre de joints aux pourtours des plaques et au droit des têtes de tirefonds, soit par une étanchéité directement appliquée sur la face supérieure des nervures en bois (par exemple peinture de protection), soit la combinaison des deux dispositions.

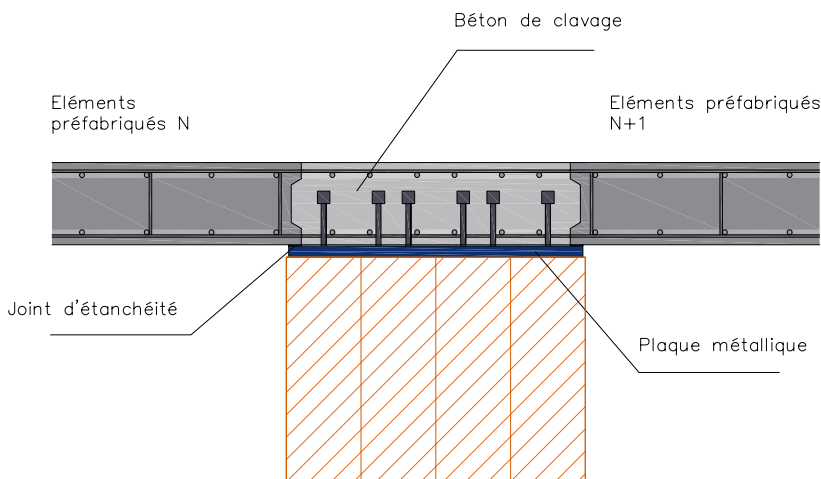


Figure 24 : Clavage longitudinal continu sur nervure

3.5.3.2 - Prédalles collaborantes

Le principe s'apparente à celui des dalles préfabriquées présentées ci-avant, les dalles n'étant plus ici de pleine hauteur (figure 25). L'épaisseur des prédalles représente ainsi environ 50 % de l'épaisseur de totale de la dalle.

Le ferrailage des prédalles est relativement complexe :

- en première phase, il doit reprendre le poids des prédalles et le poids du béton mou de seconde phase ;
- une fois le béton de seconde phase mis en œuvre et résistant, il participe à la reprise des efforts dus aux superstructures du tablier et aux surcharges d'exploitation.

Le ferrailage du hourdis doit être continu dans le sens longitudinal et transversal et conforme aux exigences de l'Eurocode 2 vis-à-vis du cisaillement le long des surfaces de reprise entre prédalle et béton coulé en seconde phase.

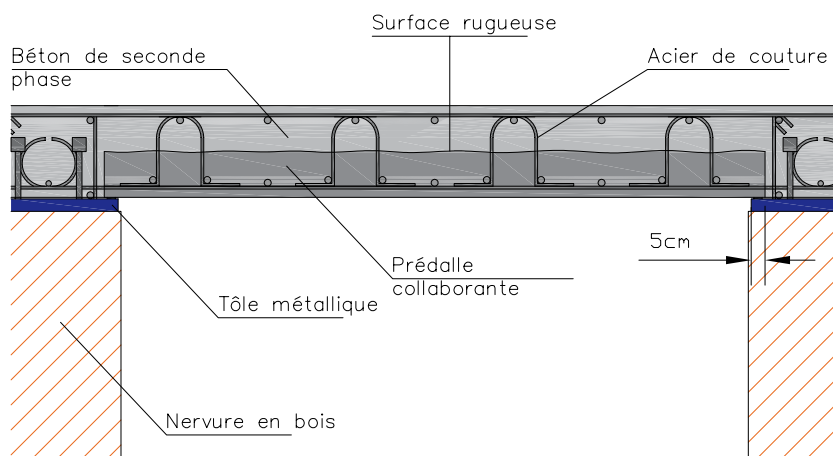


Figure 25 : Exemple d'un hourdis avec prédalles collaborantes

Les précautions à prendre lors du coulage du béton vis-à-vis de la protection du bois sont celles évoquées ci-avant.

3.5.3.3 - Hourdis coulé en place sur coffrage

Le hourdis peut être coulé en place :

- soit sur un coffrage porté par un cintre général, dans ce cas les nervures sont également étayées pour éviter les déformations différentielles entre parties coulées sur cintre et parties coulées sur nervures ; la connexion est sollicitée lors du décoffrage par l'action de poids propre du béton qui participe alors à la reprise de son propre poids ;
- soit sur un coffrage perdu porté par les nervures qui reprennent alors intégralement le poids propre du béton (photo 12).



Photo 12 : Bétonnage en place du hourdis (Source : BG Ingénieurs-Conseils)

Pour le coffrage de l'encorbellement, l'élément de coffrage repose d'une part sur la nervure de rive et d'autre part sur une poutre provisoire disposée à l'extrémité de l'encorbellement.

Les précautions à prendre lors du coulage du béton vis-à-vis de la protection du bois sont celles évoquées ci-avant.



3.5.4 - Ferrailage des hourdis entre nervures

3.5.4.1 - Généralités

Pour les sections en travée, le ferrailage structurel le plus important est le ferrailage transversal, y compris pour les encorbellements. Ce ferrailage constituera les nappes les plus proches des parements. Un ferrailage longitudinal secondaire est mis en place pour maîtriser la fissuration de la dalle.

Dans les éventuelles zones sur appui intermédiaire sollicitées en moment négatif sous flexion générale, le ferrailage longitudinal devient plus important et représente de 1 à 1,2 % de la section de béton. Ce ferrailage participe à la reprise des efforts de flexion longitudinale du tablier.

Les aciers transversaux du hourdis sont parallèles aux lignes d'appui, le biais pour ce type de pont restant modéré ($80 \text{ gr} < \phi < 100 \text{ gr}$).

Les aciers longitudinaux du hourdis sont parallèles aux nervures et placés à l'intérieur des aciers transversaux.

L'utilisation des treillis soudés est déconseillée puisque leur mise en place n'est pas commode : difficulté de recouvrement des fers, conflit avec d'autres armatures.

3.5.4.2 - Ferrailage transversal

Les aciers transversaux résultent d'un calcul de béton armé. Les moments transversaux dans le hourdis, dus au **cumul** de la **flexion transversale générale** et de la **flexion locale**, sont prépondérants vis-à-vis des moments longitudinaux, notamment quand l'espacement entre poutres est important. C'est donc le ferrailage transversal qui est le ferrailage principal et qui forme les nappes extérieures, disposées à l'enrobage nominal minimal, afin d'obtenir le plus grand bras de levier. Cette disposition est généralement maintenue, même si les poutres sont plus resserrées.

3.5.4.3 - Ferrailage longitudinal

Les moments de flexion longitudinale dans le hourdis sont relativement faibles. En partie courante du hourdis, les aciers longitudinaux à disposer sur chaque face doivent présenter une section au moins égale au tiers du ferrailage transversal de la face considérée. Sur appui intermédiaire, le ferrailage longitudinal résulte du calcul en flexion longitudinale de l'ouvrage.

3.5.5 - Ferrailage des hourdis en encorbellement

Le ferrailage principal est formé par des armatures transversales placées en face supérieure du hourdis. Elles assurent l'encastrement de l'encorbellement au reste du hourdis. En face supérieure, ce ferrailage est complété par des aciers longitudinaux de répartition. En face inférieure, il est complété par des aciers longitudinaux et transversaux. L'ancrage correct des aciers transversaux, notamment en face supérieure du hourdis, au reste du tablier revêt un caractère primordial. En outre, des armatures en attente, des cadres la plupart du temps, sont généralement nécessaires pour sceller les contre-bordures, les contre-corniches ou d'autres équipements.

4 - Conception sur appuis

4.1 - Conception sur culées

Cette partie n'aborde que les points de conception des appuis qui découlent de la spécificité du tablier mixte bois/béton envisagé.

4.1.1 - Dispositions générales

La conception générale retenue pour la zone d'about est celle d'un pont semi-intégral (figures 26 et 27), c'est-à-dire que l'ouvrage n'est pas équipé de joints de chaussée. Compte tenu des gammes de portée (portée principale de 20 m maxi) et longueurs de franchissement (de l'ordre 35 à 40 m maxi), les déplacements longitudinaux aux extrémités de l'ouvrage sont faibles (de l'ordre de 2 cm).

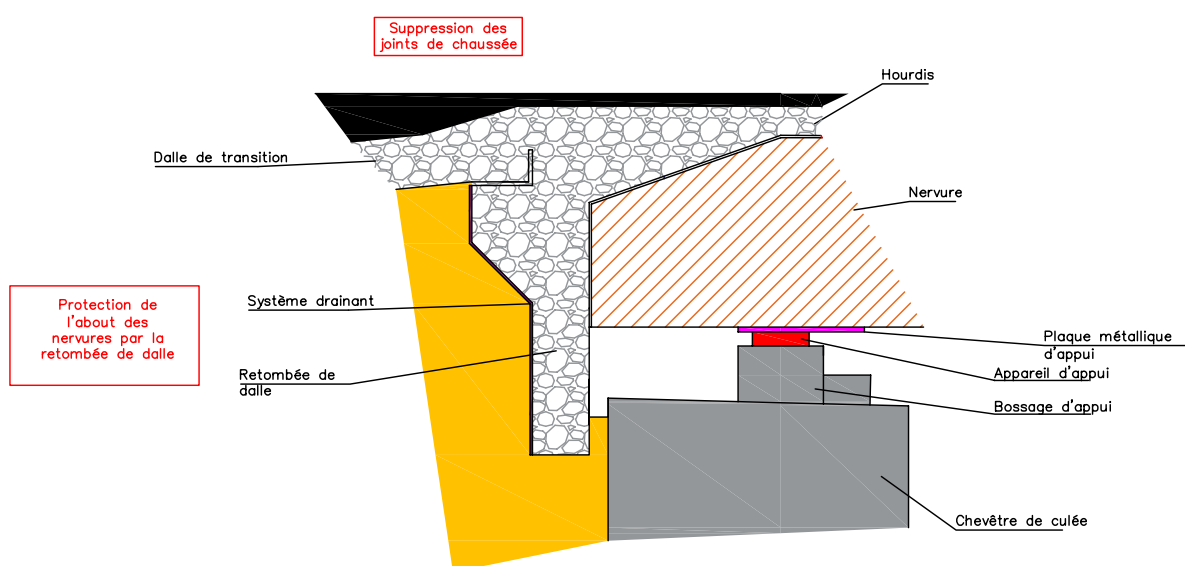


Figure 26 : Coupe longitudinale dans l'axe d'une nervure

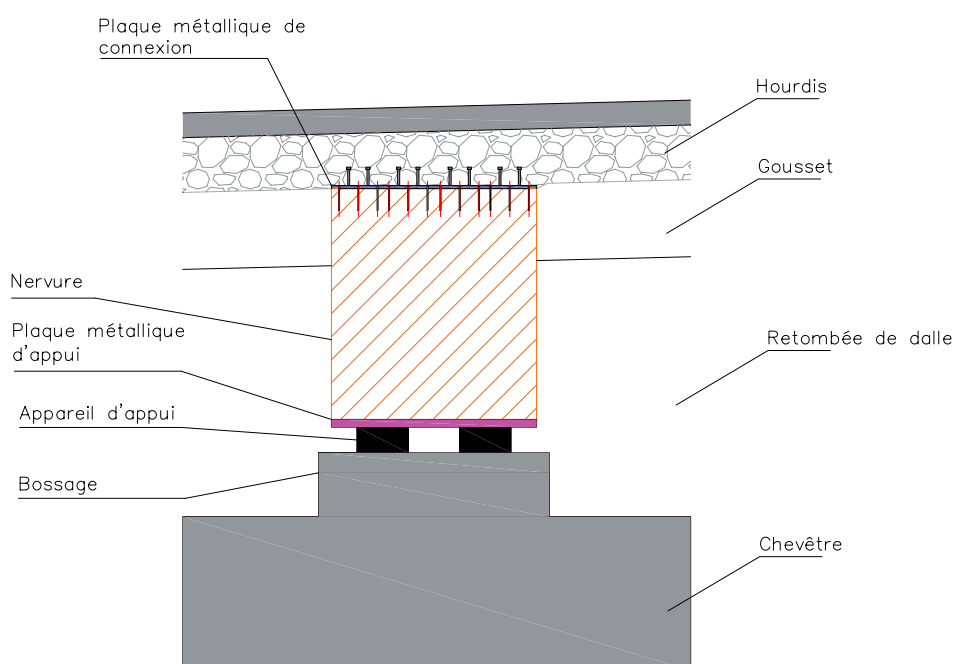


Figure 27 : Coupe transversale dans l'axe d'appui d'une nervure



Cette configuration semi-intégrale permet :

- d'assurer aux nervures en bois une bonne protection vis-à-vis d'éventuelles venues d'eau ;
- de renforcer localement la dalle en offrant un appui massif vis-à-vis des efforts des poids lourds arrivant sur l'ouvrage ;
- de supprimer les assemblages entre les poutres porteuses et une éventuelle entretoise d'appui ;
- d'éviter l'emploi de joints de chaussée.

4.1.2 - Conception de détail de la culée semi-intégrale

La conception semi-intégrale d'une culée (photos 13 et 14) est envisageable pour des déplacements horizontaux relatifs entre extrémités du pont et corps de chaussée inférieurs ou égaux à 20 mm.



Photo 13 : Extrémité de tablier avec culée semi-intégrale (Source : Cerema)



Photo 14 : Détail de la jonction entre la retombée de dalle et le mur latéral de culée (Source : Cerema)

Il n'existe pas aujourd'hui en France de guide de conception abordant cette solution. Les éléments présentés ci-après s'inspirent des dispositions en vigueur en Suisse basées sur le document [54] de l'Ofrou (figure 28). D'autres dispositions sont envisageables.

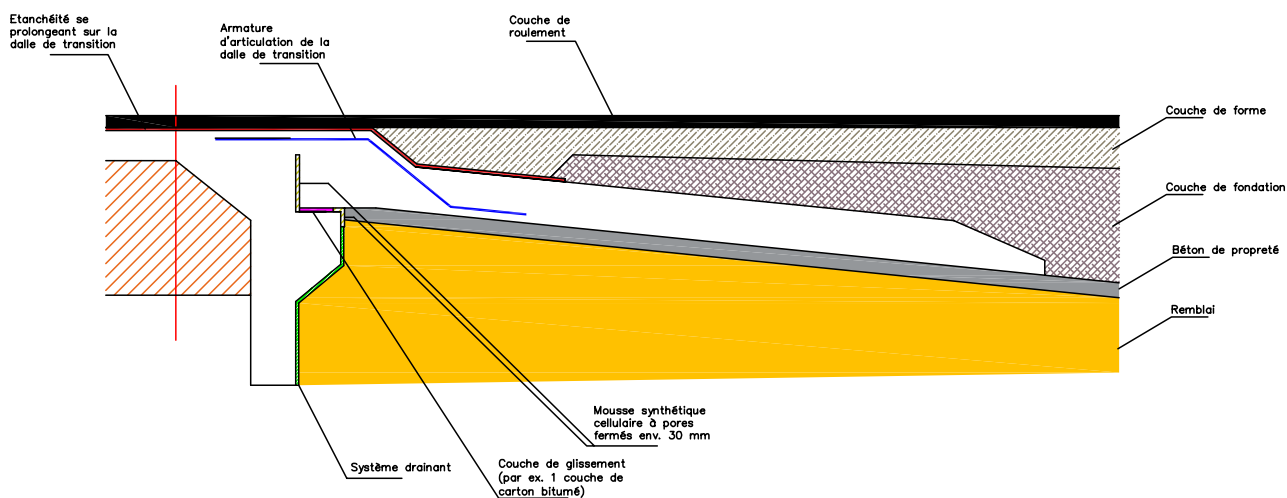


Figure 28 : Conception de culée semi-intégrale – Selon Ofrou

La retombée de dalle en béton armé présente une épaisseur de l'ordre de 30 cm. En service, cette retombée de dalle permet de protéger l'about des nervures et de rigidifier l'extrémité du tablier.

Cette retombée de dalle est préférentiellement coulée au contact de l'extrémité des nervures en bois pour un meilleur fonctionnement vis-à-vis des efforts de butée des terres. Elle peut, le cas échéant, être partiellement préfabriquée. Pour améliorer le monolithisme de la structure, une connexion entre la face verticale des nervures en bois et la retombée en béton peut être envisagée. Cette connexion est alors à positionner suivant un axe vertical centré à la mi-largeur des nervures, il convient en effet d'éviter l'apparition de fissures par bridage transversal au fil du bois.

Il est recommandé de traiter l'extrémité des poutres dans le but de limiter la pénétration d'eau, tout particulièrement au niveau des zones susceptibles d'être en contact avec du béton frais (figure 29). La protection peut être apportée par un système de peinture comme présenté précédemment pour la protection de la face supérieure des nervures en bois.

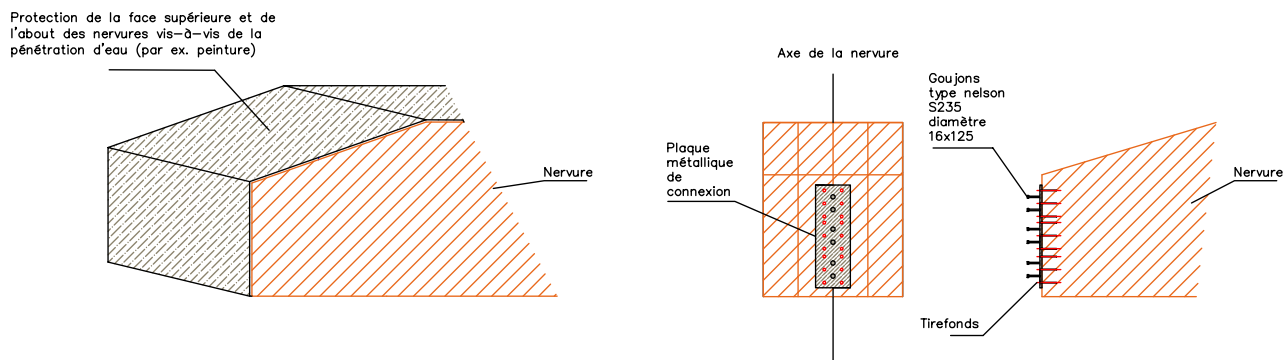


Figure 29 : Détail de l'about des nervures en bois : protection du bois et exemple de connexion à la retombée de dalle

Un espace libre de l'ordre de 5 cm est laissé entre le chevêtre et la retombée de dalle afin d'éviter les efforts parasites dans la retombée de dalle en cas de mouvement relatif entre le tablier et ses appuis. Un joint souple compressible peut être mis en place dans cet espace pour empêcher les éventuelles remontées de matériaux ou d'humidité.

Le remblai doit être exécuté avec de la grave sur au moins la hauteur de la retombée de dalle et sur la longueur de la dalle de transition. Un compactage soigné doit garantir des tassements différentiels aussi faibles que possibles entre l'ouvrage et le corps de chaussée indépendamment de la présence d'une dalle de transition.



Il importe d'être attentif aux raccords latéraux de la retombée de dalle avec les murs encastres sur le chevrete. Afin que les déplacements de la structure soient entravés le moins possible et que le matériau de remblai ne puisse y pénétrer, il est nécessaire de combler les espaces intermédiaires au moyen de matériaux appropriés (par exemple par des plaques de mousse). Une autre solution peut consister à accrocher de petits murs en retour à la retombée de dalle, ces murs étant noyés dans le remblai.

La dalle de transition assure la compensation des déplacements relatifs verticaux et horizontaux entre l'extrémité du pont et le corps de chaussée. Cette compensation est nécessaire pour satisfaire les exigences relatives à la planéité de la chaussée et pour garantir le confort de roulement.

La dalle de transition a généralement une épaisseur de 30 cm. Sa longueur est variable selon l'importance des tassements différentiels prévisibles, elle est généralement de l'ordre de 5 m. La pente de la dalle de transition est d'environ 10 %.

La dalle de transition doit être liée de façon monolithique à la structure (photo 15). Ce détail constructif permet de répartir les déplacements relatifs entre le pont et le corps de chaussée.

L'étanchéité du tablier est poursuivie sur la dalle de transition sur une longueur de l'ordre de 2 m.



Photo 15 : Dalle de transition de la culée semi-intégrale (Source : BG Ingénieurs-Conseils)

Un système drainant est mis en œuvre le long de la retombée de dalle côté remblai et en l'absence de dalle de transition, le prolongement de l'étanchéité de l'extrados sur la retombée est recommandé.

4.2 - Conception sur piles

4.2.1 - Disposition globale

Les appuis intermédiaires d'un pont à travées continues sont constitués en général par des piles de type voile ou des piles de type colonne (photo 16). L'appui des nervures se fait par l'intermédiaire d'une unique ligne d'appui comportant généralement deux appareils d'appui. L'encombrement total est déterminé en tenant compte des dimensions des appareils d'appui, des dimensions des emplacements de vérinage (un emplacement de part et d'autre de l'appareil d'appui dans le sens longitudinal) et des distances minimales aux parements (figure 30).



Photo 16 : Exemple de pile voile ajouré avec chevêtre en tête (Source : Cerema)

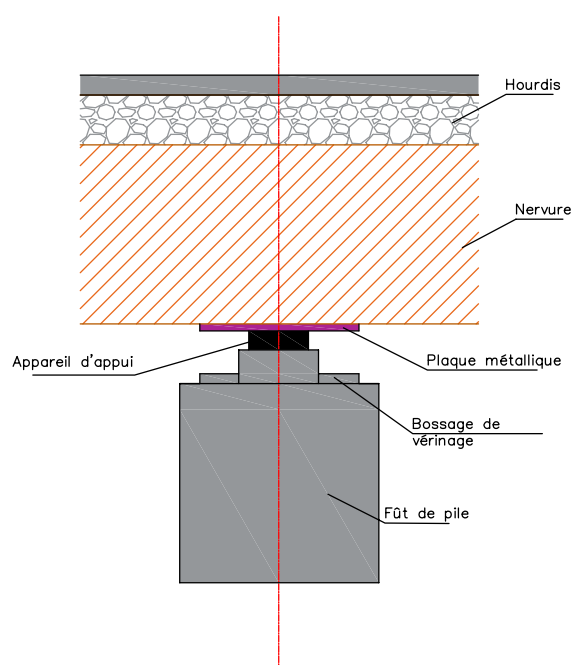


Figure 30 : Dispositions sur pile

4.2.2 - Conception de détail des têtes de pile

La tête des piles ne présente pas de spécificité particulière. La largeur de la tête de pile doit permettre l'implantation des bossages de vérinage sauf à prévoir des dispositions pour mettre en place des éléments provisoires lors de cette opération, par exemple des réservations permettant la mise en œuvre de barres de brélage de chaises de vérinage. On évitera de bloquer horizontalement le tablier sur pile, celui-ci étant bloqué au niveau des culées.

4.3 - Appareils d'appui et vérinage

4.3.1 - Appareils d'appui

Les appareils d'appui envisagés sont du type caoutchouc fretté. Compte tenu de la largeur des nervures, on positionne deux appareils d'appui transversalement sous chaque nervure et pour chaque ligne d'appui (figure 31 et photo 17). L'appui des appareils d'appui ne se fait pas directement sur le bois, mais via une plaque métallique liaisonnée au bois. Pour renforcer le monolithisme de la nervure à ses extrémités, une unique plaque peut être positionnée dans la largeur.

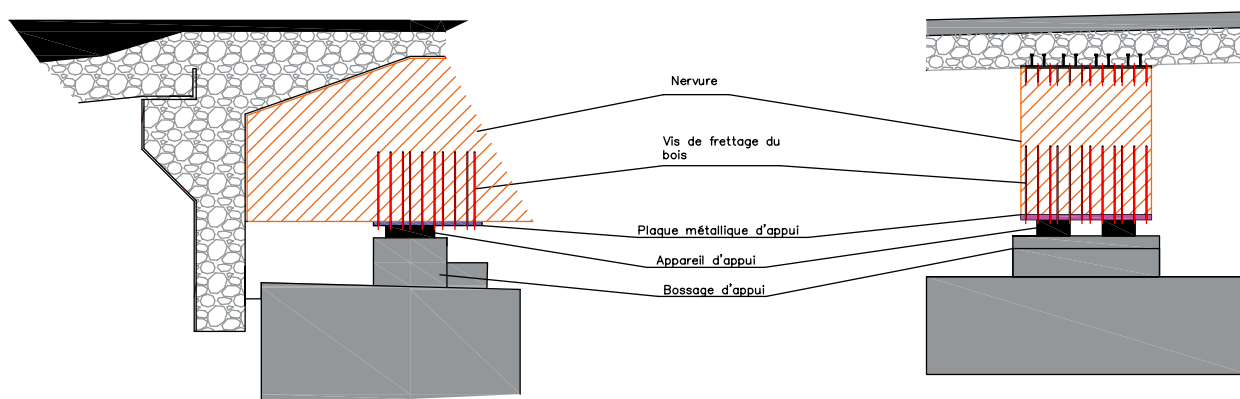


Figure 31 : Détail de la disposition des appareils d'appui



Photo 17 : Détail des appareils d'appui avec plaques de répartition (ici une plaque par appareil d'appui) (Source : Cerema)

Les dimensions des appareils d'appui sont déterminées classiquement à partir des réactions d'appui verticales, des rotations et des déplacements horizontaux.

Le critère de dimensionnement de la section des appareils d'appui est la résistance en compression perpendiculaire du bois. La dimension en plan de l'appareil d'appui résulte donc du compromis entre la nécessité d'assurer une compression suffisante de l'appareil d'appui et la nécessité de limiter l'effort transmis au bois. Pour satisfaire le critère de résistance en compression perpendiculaire, une solution couramment mise en œuvre consiste à renforcer localement les poutres en bois par des frettages chargés de diffuser la réaction d'appui dans la poutre. Le dimensionnement de ce frettage n'est pas fourni par les Eurocodes et l'on se reportera à la référence [55] ou aux agréments des vis de frettages.

Le principe de renforcement consiste à fretter la zone d'appui par des vis qui diffusent l'effort de compression dans le bois (figure 32). La vérification du critère de résistance en compression se fait à l'extrémité des vis sur une surface efficace plus grande que la section de l'appareil d'appui, et il convient par ailleurs de vérifier la vis de renfort vis-à-vis de l'instabilité par flambement. Pour améliorer la résistance au flambement, les têtes de vis peuvent être insérées dans la plaque d'acier d'appui ce qui bloque leur rotation.

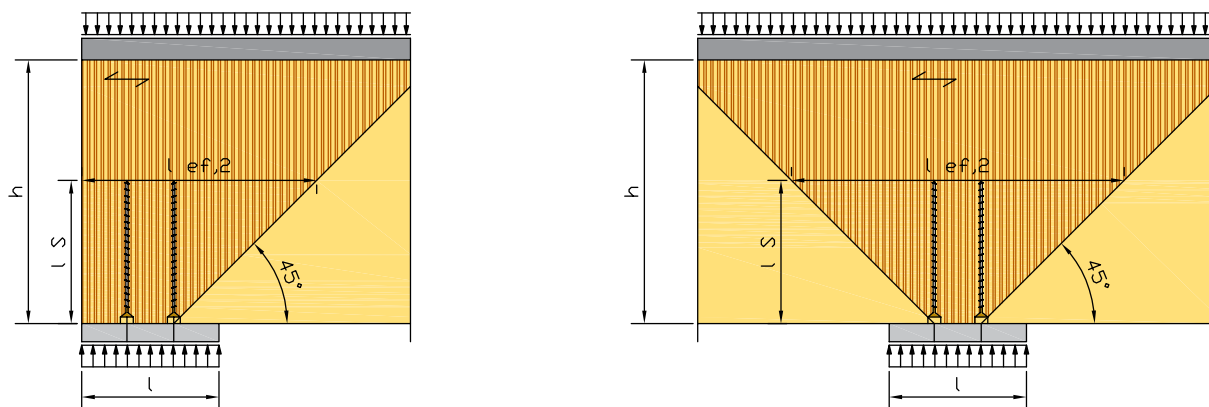


Figure 32 : Distribution des efforts pour le cas de charges appliquées aux appuis – h : hauteur de poutre – l_s : longueur des vis de frettage – $l_{ef,2}$: longueur de diffusion à l'extrémité des vis de frettage

Les appareils d'appui sont mis en œuvre avant la pose des nervures. Les déformations dues aux opérations de construction de l'ouvrage sont relativement limitées et le taux de travail final des appareils d'appui est relativement faible.

4.3.2 - Vérinage

Les points de vérinage sont positionnés sous les nervures à proximité immédiate des appareils d'appui. Ces zones font également l'objet d'un frettage permettant d'améliorer la résistance du bois vis-à-vis de la compression perpendiculaire.

Sur culée, le vérinage est effectué sous les nervures à l'avant des appareils d'appui (photo 18).



Photo 18 : Emplacements de vérinage sur culée (Source : Cerema)

Sur pile, le vérinage est effectué sous les nervures de part et d'autre des appuis (photo 19), ceci nécessite des têtes de pile adaptées.



Photo 19 : Emplacements de vérinage sur pile (Source : Cerema)

4.4 - Conception des fondations

Hormis le fait que le pont mixte bois/béton est un ouvrage relativement léger, la conception des fondations de l'ouvrage ne diffère pas de celle des ouvrages courants. Nous rappelons ci-après les principes généraux de cette conception.

Le sol de fondation est un des facteurs de choix de l'implantation des appuis et donc de la répartition des travées. C'est en outre le principal facteur de détermination du type de fondation. De ce fait, il importe de veiller à intégrer dans son choix non seulement les conclusions de l'étude de sol, mais également toutes les contraintes de réalisation des fondations (blindages de fouilles, rabattement de nappe, etc.).

En fonction de ces conclusions et de ces contraintes, le choix s'effectue entre la fondation sur semelles superficielles ou la fondation profonde (pieux, puits ou barrettes). Le type de fondation le plus simple est bien entendu la fondation superficielle lorsque le bon sol est peu profond. La semelle, qui repose alors sur un béton de propreté d'environ 10 centimètres d'épaisseur, doit être suffisamment épaisse pour résister au poinçonnement, sans que des armatures verticales (cadres et étriers) ne soient nécessaires. La base de la semelle doit se situer à un niveau plus bas que la profondeur de pénétration du gel (profondeur hors gel), cette profondeur est d'au moins 0,50 mètre dans les régions à climat tempéré de la France métropolitaine et doit être déterminée selon le site d'implantation selon la norme NF P 94-261 – Annexe O [41]. Dans le cas d'un pont à travées continues, le projeteur devra s'assurer de la maîtrise des tassements différentiels des appuis.

Lorsque le bon sol est profond, la fondation sur pieux s'impose. En fonction de leur portance, les pieux peuvent être soit battus, pour des portances de l'ordre de 1 000 kN, soit forés, pour des portances allant jusqu'à 5 000 kN environ.

Le cas des sols affouillables mérite une attention particulière. Dans un tel cas, qu'il s'agisse de semelles ou de pieux, il est impératif d'asseoir les fondations à un niveau suffisant pour que leur stabilité soit préservée. Le choix du niveau des fondations revêt dans ce cas une grande importance. Des enrochements peuvent être prévus, mais malgré le caractère favorable de cette protection, elle ne doit pas modifier le choix du niveau de fondation.

5 - Équipements

Comme pour tout type de ponts, si les équipements ne participent pas à la résistance de l'ouvrage, leur incidence est en revanche majeure sur sa conception, son aspect (corniches et dispositifs de retenue, notamment), sa pérennité (étanchéité, assainissement, etc.) ainsi que sur la sécurité des usagers. Pour toutes ces raisons, le choix et l'implantation des équipements sont essentiels. La bonne conception des équipements doit aussi contribuer à limiter l'entretien en service. La description des différents équipements ainsi que leurs conditions d'emploi sont détaillées dans les dossiers spécialisés ou les avis techniques du Cerema.

5.1 - Dispositifs de retenue

Ces dispositifs modifient la face vue du tablier, ils ont donc une incidence forte sur l'aspect de l'ouvrage. Leur choix doit répondre d'abord à des critères de sécurité, mais aussi d'esthétique. Vis-à-vis de la sécurité, les critères de choix et d'implantation dépendent à la fois de la destination de l'ouvrage et de la définition des objectifs visés : pour quelles catégories de véhicules et quelles conditions de choc le dispositif doit-il être efficace ?

La démarche à mener, basée sur la notion d'indice de danger, est développée dans le guide Cerema « Dispositifs de retenue routiers marqués CE sur ouvrages d'art – De la conception de l'ouvrage à la mise en œuvre des dispositifs de retenue » de décembre 2014 [46].

Elle permet d'aboutir, dans les cas courants, à quelques dispositions types dont la panoplie, par ordre d'efficacité croissante, va du simple garde-corps à la barrière de niveau H2, H3, etc.

5.2 - Étanchéité

Le choix du système d'étanchéité doit être compatible avec les conditions thermo-hygrométriques dans lesquelles se situe l'ouvrage. Les procédés composés d'un vernis d'imprégnation et d'une feuille bitumineuse autoprotégée en surface par des granulés céramiques sont recommandés (photo 20).



Photo 20 : Étanchéité par feuille préfabriquée (Source : DIR Est)

Un soin tout particulier doit être apporté à la continuité de l'étanchéité sur toute la surface du tablier et des retombées de dalle (photo 21) ainsi qu'aux relevés d'étanchéité dans les engravures ménagées à cet effet.



Photo 21 : Continuité de la feuille sur la retombée de dalle et protection de la feuille par un asphalte gravillonné sur la face supérieure du hourdis (Source : DIR Est)

L'étanchéité de la jonction entre la retombée de dalle, le chevêtre et les murs en retour peut être traitée par l'intermédiaire d'une géomembrane.

5.3 - Assainissement

Ce problème est traité en détail dans le document du Sétra « Assainissement des ponts-routes ».

Il est naturellement indispensable de bien drainer les tabliers et leurs accès.

En ce qui concerne les accès à l'ouvrage, les massifs de remblai adjacents doivent être convenablement drainés pour éviter les risques de gonflement de terrain ou les rétentions d'eau derrière les murs, toujours préjudiciables à la durabilité. Il est également souhaitable de placer en tête de talus un dispositif assurant le guidage des eaux de ruissellement de la plate-forme.

5.4 - Corniches

Les corniches font partie des éléments les plus visibles de l'ouvrage et contribuent par conséquent pour une part importante à l'aspect de ce dernier.

Elles ont pour fonction d'habiller et de protéger les bords de tablier donc de masquer d'éventuelles imperfections. Elles soulignent favorablement la continuité du profil en long. Elles permettent de jouer sur l'effet d'ombre sur un tablier qui peut s'avérer relativement massif et contribuent également à la protection des nervures de rive vis-à-vis des précipitations.

Bien entendu, le choix du type de corniche ainsi que sa forme et sa texture doit être guidé par des considérations d'aspect et de facilité d'entretien, non seulement des corniches elles-mêmes, mais aussi et surtout du tablier notamment si les corniches participent à la protection du bois des nervures.

6 - Esthétique

L'esthétique d'un ouvrage est un enjeu dont il faut tenir compte dès les premières phases de l'étude, et notamment dans la conception générale.

Comme pour les autres ouvrages, l'aspect global des ponts à poutres sous chaussée est conditionné par leur silhouette générale (photo 22) ; c'est la toute première image de l'ouvrage perçue par un observateur situé à distance. Cette silhouette se caractérise en particulier par la régularité du profil en long, les proportions et l'harmonie générale des lignes dégagées, l'intégration de l'ouvrage dans l'environnement, etc.



Photo 22 : Silhouette générale d'un pont mixte bois/béton avec palissade bois (passage faune) (Source : Cerema)

Lorsque l'observateur s'approche de l'ouvrage, cette perception globale s'estompe pour céder la place à la perception des détails (photo 23), tels que la disposition et l'architecture des appuis, l'aspect des parements, ou encore la forme, la couleur, la proportion des corniches et des dispositifs de retenue par rapport à la face vue du tablier.



Photo 23 : Perception de la forme des nervures en bois au passage sous l'ouvrage (Source : Cerema)



6.1 - Silhouette générale

L'œil est très sensible à des discontinuités observées sur les lignes principales d'un ouvrage. Il en est ainsi du profil en long qui ne devrait jamais comporter de cassure marquée. La régularité peut être obtenue simplement, par exemple au moyen d'un profil rectiligne dans le cas d'un ouvrage en pente, ou bien par un profil circulaire à grand rayon. Il est à noter, dans cette seconde éventualité, que les profils convexes donnent un aspect bien préférable à celui des profils concaves, qu'il convient donc d'éviter.

Par ailleurs, l'esthétique d'un ouvrage tient aussi et dans une large mesure aux relations qui existent entre ses dimensions géométriques, aux rapports entre les zones d'ombre et de lumière, aux contrastes entre surfaces pleines et ajourées, aux proportions entre les masses des éléments qui le composent.

Les défauts des ouvrages à poutres sous chaussée portent souvent sur l'imperfection du profil en long et le manque d'harmonie de certaines parties d'ouvrage.

Pour l'ouvrage type mixte bois/béton, l'imperfection du profil en long peut résulter des déformations par fluage du bois des poutres, qui rend difficile le maintien d'un profil en long satisfaisant dans le temps. Pour pallier cela, une contre-flèche sera prise sur chaque poutre de sorte à compenser la déformation due au fluage du tablier sous poids propre.

6.2 - Perception de détail

6.2.1 - Disposition des appuis

À l'approche de l'ouvrage, l'observateur prend conscience de la disposition des appuis par rapport à la voie franchie. Pour des raisons de transparence sous l'ouvrage, il est souhaitable de disposer les appuis parallèlement à cette voie, ce qui est le cas général des appuis du pont type du présent guide qui est très préférentiellement un ouvrage droit.

6.2.2 - Hauteur vue du tablier

Les tabliers des ponts à poutres sous chaussée sont relativement épais en comparaison de solution de type dalle.

Si cet aspect massif s'accommode assez bien des tirants d'air importants, nécessaires au-dessus de voies routières, il n'en va pas de même pour les faibles tirants d'air. Dans ce dernier cas, il est souhaitable d'améliorer la transparence et l'harmonie de l'ouvrage en diminuant la hauteur vue du tablier. À cela plusieurs solutions sont possibles :

- diminution de l'espacement des nervures afin de pouvoir réduire leur hauteur ;
- diminution de la longueur des travées : la marge de manœuvre reste limitée, puisqu'elle dépend des possibilités d'implantation des appuis et qu'elle ne doit rompre en aucune manière l'harmonie générale ;
- réalisation d'encorbellements suffisamment larges pour réduire, par l'effet d'ombre, la hauteur vue du tablier ;
- adaptation de la hauteur des corniches en vue de réduire la hauteur vue des nervures.

6.2.3 - Dispositifs de retenue

L'incidence des dispositifs de retenue sur l'aspect de l'ouvrage est importante puisqu'ils complètent la face vue du tablier.

Certains équipements, en raison de leur barreaudage, donnent une impression de légèreté et améliorent la transparence de l'ouvrage.

6.2.4 - Corniches

La corniche est l'élément de superstructure qui permet de marquer la ligne de l'ouvrage, puisqu'il s'agit de la partie la mieux éclairée du tablier, donc la plus visible. Dans le cas des tabliers à faible encorbellement, il convient de donner à la corniche une hauteur suffisante, convenablement proportionnée à l'encorbellement.

6.2.5 - Architecture des appuis

L'aspect de l'ouvrage peut également être sensiblement amélioré par une architecture adaptée des appuis (photo 24 et 25), en particulier dans le cas d'ouvrages urbains.



Photo 24 : Exemple d'une pile à parement lisse en béton avec évidement et d'une culée à parement de pierres appareillées (Source : Cerema)



Photo 25 : Exemple d'un quart de cône de remblai contigu de culée recouvert de pierres (Source : DIR Est)



On choisira de préférence des fûts de section polygonale ou oblongue, plutôt que circulaire dont l'aspect est monotone. On recherchera également une proportion équilibrée et un raccord adouci entre le fût et le chevêtre.

Les culées sont généralement des culées apparentes et implantées en pied de talus ou des piles-culées semi-enterrées et perchées en crête de talus.

6.2.6 - Parements en béton

La qualité des parements des appuis constitue un facteur important de l'esthétique des ouvrages. Les parements de béton sont principalement ceux des piles et, lorsqu'elles sont apparentes, ceux des culées. S'il est nécessaire, au stade de l'exécution de veiller à la qualité du béton, des coffrages et au soin apporté à la mise en œuvre, il faut également dès la conception avoir prévu un système d'assainissement de l'ouvrage et des formes de corniches tels que les eaux de ruissellement ou d'infiltration ne viennent pas tacher les faces vues.

Pour améliorer l'aspect, pas toujours satisfaisant, des parements lisses bruts de décoffrage, on peut envisager d'intervenir sur leur texture, leur couleur ou leur relief. Parmi les moyens mis en œuvre, on peut citer :

- l'utilisation de matrices dans les coffrages permettant d'obtenir des parements architecturés ;
- l'incorporation de pigments dans la masse du béton.

6.2.7 - Parements en bois

Le plus souvent le parement bois présentera la teinte naturelle de l'essence retenue. Avec le temps, les parements les plus exposés aux rayonnements UV pourront présenter un grisaillement, mais ce phénomène devrait être limité compte tenu de la protection des nervures vis-à-vis de cette exposition.

Des lasures colorées peuvent être mises en œuvre sur les parements des nervures en bois (photo 26) pour limiter ce grisaillement naturel avec toutefois la nécessité de procéder à son entretien régulier.

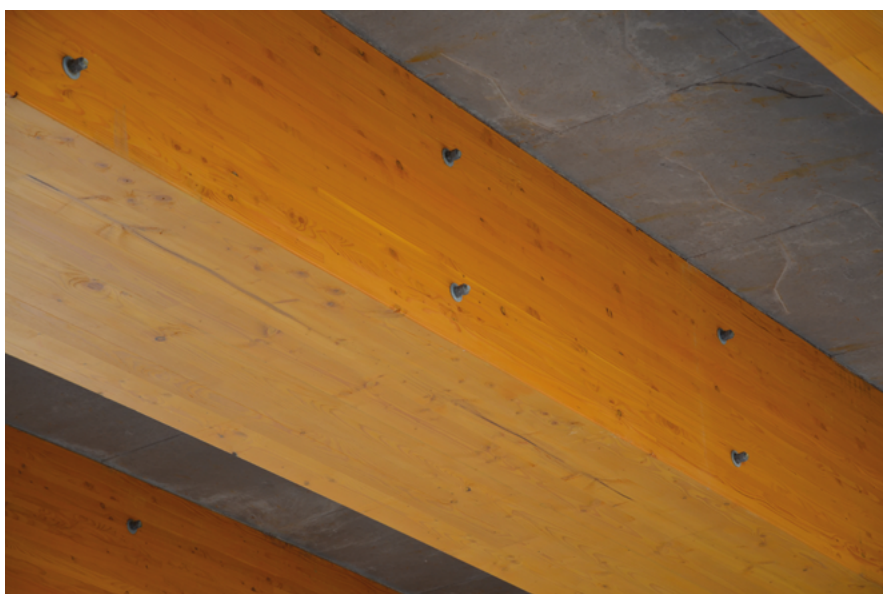


Photo 26 : Nervure en bois teintée par une lasure (Source : Cerema)

Il est aussi possible de jouer sur la géométrie des nervures en bois en donnant par exemple une forme légèrement arrondie à l'arête inférieure vue des nervures de rives.

6.2.8 - Graffitis

La présence de graffitis nuit grandement à l'esthétique de l'ouvrage. Des traitements antigraffitis peuvent être mis en œuvre sur les parties en béton des appuis et sur les faces les plus exposées des nervures en bois notamment dans le cas des ouvrages implantés en site urbain.

7 - Exécution de l'ouvrage

7.1 - Étapes globales de fabrication

Les principales étapes d'exécution d'un tablier composé de nervures en bois associées à une dalle en béton armé sont décrites dans ce chapitre. Les nervures sont réalisées en usine, alors que le hourdis est soit coulé en place soit préfabriqué pour tout ou partie. Les principales étapes d'exécution sont :

Fabrication et transport des nervures

- débitage et aboutage des lamelles ;
- moulage sur les gabarits des poutres en lamellé-collé ;
- assemblage par collage des poutres unitaires pour constitution d'une nervure ;
- mise en place des plaques de connexion par tirefonds ;
- mise en place des plaques et des vis de fretage des zones d'appui ;
- mise en œuvre éventuelle d'une protection des parements en bois (lasure par exemple) ;
- stockage en usine ;
- transport ;
- stockage sur chantier ;
- mise en place à la grue des nervures sur appuis provisoires.

Lors du transport, du stockage sur site, et après leur mise en place sur site, il est indispensable de prévoir une protection des nervures en bois vis-à-vis des intempéries et ce jusqu'à la réalisation du hourdis.

Fabrication du hourdis et des retombées de dalle

- coffrage et ferrailage du hourdis ou pose des dalles préfabriquées ;
- coffrage et ferrailage des retombées de dalle ;
- bétonnage du hourdis et des retombées de dalle, clavage des dalles.

Finitions

- transfert des charges sur appuis définitifs ;
- pose des superstructures.

7.2 - Détail de l'exécution

7.2.1 - Fabrication des nervures en usine

Les nervures principales en bois lamellé-collé sont préalablement fabriquées et assemblées en atelier. Une ligne de fabrication comprend généralement les postes suivants :

Préparation des lamelles

- réception du bois massif (photo 27) ;
- séchage des bois ;
- triage (visuellement ou par ultrasons) (photo 28) ;
- tronçonnage (purge des défauts) ;
- traitement des chutes par broyeur ;
- débitage des lamelles ;
- entourage et aboutage des lamelles (photo 29) ;
- rabotage 2 faces des lamelles.



Fabrication des poutres unitaires

- préparation des paquets ;
- encollage et serrage sur les gabarits ;
- raboteuse 4 faces ;
- application des traitements ou des finitions.

Fabrication des nervures

- assemblage par collage des poutres unitaires (photos 30 à 33) ;
- serrage pendant la polymérisation de la colle (photos 34 à 37) ;
- réalisation des préperçages à l'emplacement des tirefonds ;
- mise en place de la plaque de connexion par tirefonds ;
- mise en place des plaques et des vis de frettages des zones d'appui ;
- application des traitements (lasure, traitement fongique), finitions et contrôle (photos 38 à 40).

Les photos ci-après illustrent les opérations de fabrication des nervures en bois lamellé-collé.



Photo 27 : Réception du bois massif en usine (Source : Arbonis)



Photo 28 : Contrôle visuel du bois massif (Source : Cerema)



Photo 29 : Aboutage de lamelles par entures
(Source : Cerema)



Photo 30 : Stockage de poutres bois lamellé-collé en usine
(Source : Arbonis)



Photo 31 : Encollage des poutres unitaires en bois lamellé-collé
(Source : Cerema)

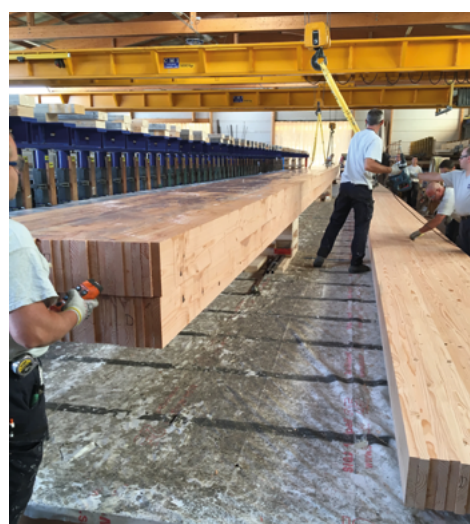


Photo 32 : Préparation des blocs de poutres unitaires
(Source : Cerema)



Photo 33 : Prise en charge par pont roulant
d'un bloc de trois poutres unitaire (Source : Arbonis)



Photo 34 : Mise sous presse d'un bloc de trois poutres unitaires
(Source : Cerema)



Photo 35 : Bâti de maintien en pression pendant la polymérisation de la colle (Source : Cerema)



Photo 36 : Détail d'un bloc de trois poutres unitaires sous presse (Source : Cerema)



Photo 37 : Stockage de blocs de quatre poutres unitaires (Source : Arbonis)



Photo 38 : Lasurage des blocs (Source : Cerema)



Photo 39 : Réception d'un bloc de six poutres en usine (Source : Cerema)



Photo 40 : Bloc de 6 poutres équipé de ses plaques de connexion (Source : Cerema)

7.2.2 - Transport et manutention

Les éléments préfabriqués sont amenés à subir de nombreuses manutentions de l'usine jusqu'à la mise en place définitive dans l'ouvrage :

- de l'atelier d'assemblage jusqu'au parc de stockage ;
- pendant le transport de l'usine au chantier ;
- pour leur pose sur appuis définitifs.

Pour les éléments relativement courts, de l'ordre d'une quinzaine de mètres, le transport jusqu'au chantier s'effectue généralement par camion. Au-delà, il convient de prendre les précautions habituelles relatives aux convois exceptionnels qui autorisent classiquement le transport de pièce jusqu'à 40 m environ (photos 41 et 42).

Le bois doit être livré de manière à ce que son équilibre hygroscopique soit compatible avec son environnement. Le taux d'humidité d'équilibre du bois est indépendant de l'essence, mais dépend de la température et de l'humidité relative de l'air. Il varie donc bien sûr suivant les saisons et les régions, et c'est la valeur moyenne, diminuée d'un point, qui sert de référence pour les bois à livrer. Il faut en effet que le bois reprenne de l'humidité sur site et non l'inverse, sauf à créer des fentes dans le bois.

Durant le stockage, le transport et jusqu'à la mise en œuvre du hourdis béton, le bois est protégé de manière à éviter les reprises d'humidité.



Photos 41 et 42 : Transport par convois exceptionnels des blocs sur site (Sources : Cerema)

7.2.3 - Mise en place des nervures

Une fois sur le chantier, la mise en place des nervures est effectuée soit au moyen de deux grues, soit à l'aide d'une seule grue et d'un palonnier ou encore d'élingues de grande longueur (photos 43 et 44).

Compte tenu de la géométrie retenue pour les nervures (dimension de la base proche de celle de la hauteur), la stabilité vis-à-vis du déversement latéral n'est en général pas un problème (photo 45).

Dans le cas exceptionnel où la stabilité des nervures ne serait pas assurée, il y aurait lieu de prévoir des systèmes d'entretoisement et de contreventement provisoires.



Photo 43 : Prise en charge d'une nervure lamellé-collé par une grue (Source : Cerema)



Photo 44 : Mise en place d'une nervure à la grue (Source : Cerema)



Photo 45 : Nervure équipée de la connexion posée sur ses appuis (Source : Cerema)

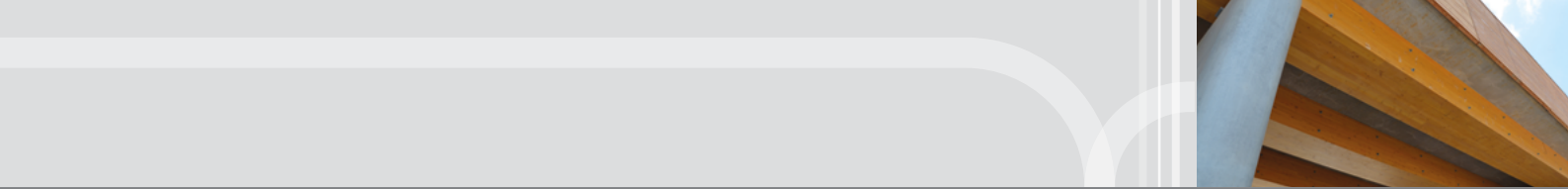
7.2.4 - Exécution du hourdis

7.2.4.1 - Hourdis coulés sur coffrages

Les coffrages sont soit portés par les poutres soit par un cintre. La déformation relative des nervures et des éléments porteurs des coffrages doit être la plus faible possible, ce qui peut conduire à étayer les nervures dans le cas du recours à un cintre. Il est indispensable dans tous les cas que les joints entre éléments de coffrages et nervures soient parfaitement étanches afin d'empêcher toute fuite de laitance pendant le bétonnage.

Les aciers inférieurs du hourdis ne doivent pas rester au contact avec les coffrages. L'enrobage réglementaire doit être respecté, ce qui est obtenu au moyen de cales disposées en nombre suffisant.

Pour la plupart des ouvrages, les volumes de béton à mettre en œuvre restent modérés et autorisent un bétonnage en continu. À l'issue du coulage, il est nécessaire de bien régler la face supérieure du hourdis pour assurer la mise en œuvre correcte du système d'étanchéité. Afin d'éviter toute perte d'eau anormale, nuisible à sa résistance, la cure du béton est nécessaire durant sa prise, notamment lorsque le bétonnage a lieu en période de forte chaleur (température durablement supérieure 30 °C ou température du béton au moment de sa mise en œuvre supérieure à 32 °C) ou de grand vent.



De même, si le bétonnage doit s'effectuer par temps froid (température comprise entre + 5 °C et -5 °C, le bétonnage étant non autorisé en dessous de -5 °C), des moyens de prévention et des précautions particulières sont également indispensables pour pouvoir continuer à bétonner, afin que le béton ne puisse pas geler et qu'il ait la résistance requise.

Les retombées de dalle peuvent être coulées en seconde phase, voire préfabriquées, compte tenu de la complexité de leur coffrage.

7.2.4.2 - Hourdis constitués de dalles préfabriquées de pleine hauteur

La première étape consiste à mettre en place les dalles préfabriquées sur les nervures bois. Le clavage est ensuite réalisé.

7.2.4.2.1 - Préfabrication et stockage

Les éléments de dalle peuvent être préfabriqués soit en usine de préfabrication permanente soit dans une installation foraine.

Compte tenu de la faible longueur des clavages, leur ferrailage, par ailleurs très dense, doit être conçu et mis en œuvre avec le plus grand soin : utilisation de gabarits, contrôle des longueurs en attente des aciers, etc.

Une grande importance doit également être accordée aux conditions de stockage des éléments de dalle. Des précautions doivent ainsi être prises pour ne pas dégrader les aciers passifs en attente. Il convient également d'éviter les empilements anarchiques qui pourraient conduire à des déformations importantes des éléments de dalle.

Comme toutes pièces préfabriquées, les éléments de dalle doivent comporter des dispositifs de levage (ancres, anses) permettant leur manutention en toute sécurité pendant le stockage puis par l'engin de pose.

7.2.4.2.2 - Pose des éléments préfabriqués

Compte tenu des dimensions relativement modestes des ouvrages envisagés, les éléments préfabriqués peuvent être posés avec une grue mobile située à côté du tablier en cours de construction.

7.2.4.2.3 - Traitement des surfaces de reprise

Une attention toute particulière doit être apportée à la qualité et à la rugosité mécanique des surfaces de reprise.

7.2.4.2.4 - Conditions d'appui des dalles Les dalles ne doivent pas prendre appui directement sur le bois, mais être positionnées sur la plaque métallique de connexion par l'intermédiaire de joints souples empêchant les fuites de laitance pendant le bétonnage des clavages. La largeur d'appui doit au minimum être de 5 cm.

7.2.4.2.5 - Béton de clavage

Le béton de clavage doit bénéficier d'une formulation permettant de limiter son retrait avec une humidité ambiante comprise entre 70 et 80 %. Par ailleurs, sa résistance caractéristique doit être plus élevée (C60 par exemple), car ce béton subit des efforts concentrés importants au droit des connecteurs.



7.2.4.2.6 - Dispositions particulières

Le cas échéant, des dispositions particulières doivent être prises pour assurer la stabilité des éléments de dalle en encorbellement.

7.2.4.3 - Hourdis coulés sur prédalles participantes

Les dispositions à considérer lors de l'exécution d'un hourdis coulé sur prédalles collaborantes découlent à la fois de celles évoquées pour le cas du hourdis coulé en place et de celles évoquées pour le cas des dalles de pleine hauteur.

7.2.5 - Mise en place des superstructures

Une fois le hourdis réalisé, débute la mise en place des superstructures.

Un délai minimal de deux jours selon le type de béton (avec ou sans adjuvant accélérateur de prise) doit être respecté pour pouvoir ensuite effectuer la reprise de bétonnage nécessaire au coulage de la longrine de garde-corps.

Classiquement, une couche d'étanchéité de 3 cm d'épaisseur est ensuite coulée en place. Cette épaisseur d'étanchéité peut être réduite (entre 5 et 10 mm) si la couche d'étanchéité est préfabriquée. Un relevé d'étanchéité de 15 cm au minimum est effectué sur la longrine pour éviter toute infiltration d'eau dans le béton.

Le cas échéant, on dispose des bordures de trottoirs scellées sur mortier afin de délimiter la partie trottoir de la partie chaussée. Deux drains sont ensuite disposés, un pour la partie chaussée et un autre pour la partie trottoir, sur le film d'étanchéité. Le remplissage du trottoir s'effectue avec un béton et des élévissements peuvent y être ménagés.

Dans la plupart des cas, les revêtements des chaussées et des trottoirs sont respectivement des enrobés de 8 cm d'épaisseur et un asphalte de 2 cm d'épaisseur.

7.2.6 - Transfert des poutres sur leurs appuis définitifs

Il peut être nécessaire, après coulage du hourdis et pose des équipements, de vérifier l'ensemble du tablier afin d'effectuer un « recalage » des appareils d'appui notamment si la pose des nervures n'a pas pu être réalisée à une période de température moyenne.

Bibliographie

Normes et fascicules de documentation

- [1] NF EN 335 « Durabilité du bois et des matériaux à base de bois – Classes d’emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois » (Mai 2013)
- [2] NF EN 350 « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Méthodes d’essai et de classification vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois » (Octobre 2016)
- [3] NF EN 351-1 – « Durabilité du bois et des produits à base de bois – bois massif traité avec produit de préservation – Partie 1 : Classification des pénétrations et rétentions des produits de préservation » (Septembre 2007)
- [4] NF EN 460 « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Durabilité naturelle du bois massif – Guide d’exigences de durabilité du bois pour son utilisation selon les classes de risque » (Juillet 1994)
- [5] FD P 20-651 « Durabilité des éléments et ouvrages en bois » (Juin 2011)
- [6] NF EN 599-1 +A1 – « Durabilité des bois et des matériaux dérivés du bois – Performances des produits préventifs de préservation établies par des essais biologiques – Partie 1 : Spécification par classe d’emploi » (Janvier 2014)
- [7] NF B 50-105-3 – « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Bois et matériaux à base de bois traités avec un produit de préservation préventif - Partie 3 : spécifications de préservation des bois et matériaux à base de bois et attestation de traitement - Adaptation à la France Métropolitaine et aux DOM » (Octobre 2014)
- [8] NF EN 336 « Bois de structure – Dimensions, écarts admissibles » (Décembre 2013)
- [9] NF EN 15228 « Bois de structure – Bois de structure traité avec un produit de préservation contre les attaques biologiques » (Mai 2009)
- [10] NF EN 14080 – « Structures en bois – bois lamellé-collé et bois massif reconstitué – Exigences » (Août 2013)
- [11] NF EN 14081-1 « Structures en bois – Bois des structures à section rectangulaire classé pour sa résistance – Partie 1 : Exigences générales » (Avril 2016)
- [12] NF EN 13556 « Bois ronds et bois sciés – Nomenclature des bois utilisés en Europe » (Décembre 2003)
- [13] NF EN 14592 +A1 – « Structures en bois – Éléments de fixation de type tige – Exigences » (Août 2012)
- [14] NF EN 409 « Structures en bois – Méthodes d’essais – Détermination du moment plastique des organes d’assemblage de type tige » (Juillet 2009)
- [15] NF EN 1382 « Structures en bois – Méthodes d’essai – Résistance à l’arrachement dans le bois d’éléments de fixation » (Avril 2016)
- [16] NF EN 1383 « Structures en bois – Méthodes d’essai – Résistance à la traversée de la tête d’éléments de fixation à travers le bois » (Mai 2016)
- [17] NF EN 301 « Adhésifs de nature phénolique et aminoplaste, pour structures portantes en bois – Classification et exigences de performances » (Novembre 2017)
- [18] NF EN 302-1 « Adhésifs pour structures portantes en bois – Méthodes d’essais – Partie 1 : détermination de la résistance du joint au cisaillement en traction longitudinale » (Mai 2013)
- [19] NF EN 302-2 « Adhésifs pour structures portantes en bois — Méthodes d’essai — Partie 2 : Détermination de la résistance à la délamination » (Septembre 2017)



- [20] NF EN 302-3 « Adhésifs pour structures portantes en bois — Méthodes d’essai — Partie 3 : Détermination de l’influence de l’attaque d’acide des fibres de bois, résultant de traitements cycliques en température et humidité sur la résistance à la traction transversale » (Septembre 2017)
- [21] NF EN 302-4 « Adhésifs pour structures portantes en bois — Méthodes d’essai — Partie 4 : Détermination de l’influence du retrait du bois sur la résistance au cisaillement » (Mai 2013)
- [22] NF EN 302-6 « Adhésifs pour structures portantes en bois – Méthodes d’essai – Partie 6 : détermination du temps de serrage minimum dans des conditions de référence » (Mai 2013)
- [23] NF EN 302-8 « Adhésifs pour structures portantes en bois — Méthodes d’essai — Partie 8 : Essai de charge statique sur des éprouvettes à joints multiples en cisaillement par compression » (Mars 2017)
- [24] NF EN 15425 « Adhésifs – Adhésifs polyuréthane mono composants pour charpentes en bois portantes – Classification et exigences relatives à la performance » (Mars 2017)
- [25] NF EN ISO 10666 « Vis autoperceuses avec filetage de vis à tôle Caractéristiques mécaniques et fonctionnelles » (Octobre 1999)
- [26] NF EN 927-1 « « Peintures et vernis – Produits de peinture et systèmes de peinture pour le bois en extérieur – Partie 1 : classification et sélection » (Avril 2013)
- [27] NF EN 927-2 « Peintures et vernis – Produits de peinture et systèmes de peinture pour le bois en extérieur – Partie 2 : spécifications de performance » (Octobre 2014)
- [28] NF EN 927-5 « Peintures et vernis – Produits de peinture et systèmes de peinture pour le bois en extérieur Partie 5 : Détermination de la perméabilité à l’eau liquide » (Mars 2007)
- [29] NF EN ISO 2081 « Revêtements métalliques et autres revêtements inorganiques – Dépôts électrolytiques de zinc avec traitements supplémentaires sur fer ou acier » (Mai 2018)
- [30] NF EN 10025-2 « Produits laminés à chaud en aciers de construction – Partie 2 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés » (Mars 2005, en révision)
- [31] NF EN ISO 13918 « Soudage – Goujons et bagues céramiques pour le soudage à l’arc des goujons » (Juillet 2008)
- [32] NF EN 206/CN « Béton – Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206 » (Décembre 2014)
- [33] P 18-464 « Béton – Dispositions pour prévenir les phénomènes d’alcali-réaction » (Avril 2014)
- [34] NF EN 1990 « Eurocode 0 – Eurocodes structuraux – Base de calcul des structures » (Mars 2003) + son amendement A1 (Décembre 2006) + Annexes nationales
- [35] NF EN 1991-1-4 « Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent » (Novembre 2005) + Annexes nationales
- [36] NF EN 1992-1-1 « Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1.1 : règles générales et règles pour les bâtiments » (Octobre 2005) et son amendement A1 (Février 2015) + Annexes nationales
- [37] NF EN 1995-1-1 « Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments » (Novembre 2005) + ses amendements A1 (Octobre 2008) et A2 (Juillet 2014) + Annexes nationales
- [38] NF EN 1995-1-2 « Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1.2 : généralités – Calcul des structures au feu » (Septembre 2005) + Annexes nationales
- [39] NF EN 1998-1 « Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments » (Septembre 2005)
- [40] NF EN 1998-2 « Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 2 : Ponts » (Décembre 2006)
- [41] NF P 94-261 « Justification des ouvrages géotechniques – Normes d’application de l’Eurocode 7 – Fondations superficielles – Annexe O » (Juin 2013)

Guides

- [42] Guide Sétra « Application des Eurocodes par le maître d'ouvrage – Le programme d'un ouvrage d'art aux Eurocodes » (Février 2009)
- [43] Guide technique Sétra « Les ponts en bois – Comment assurer leur durabilité » (Novembre 2006)
- [44] Guide Sétra « Ponts mixtes acier/béton » Guide de conception durable (Septembre 2010)
- [45] Guide Cerema « Eurocode 5 – Application aux ponts-routes à tablier mixte bois/béton en poutres en lamellé-collé » (À paraître)
- [46] Guide Cerema « Dispositifs de retenue routiers marqués CE sur ouvrages d'art – De la conception de l'ouvrage à la mise en œuvre des dispositifs de retenue » (Décembre 2014)
- [47] Guide technique LCPC « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne » – Ifsttar (Août 2007)
- [48] Guide technique LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » (Décembre 2003)
- [49] Guide technique « Recommandations pour l'inspection détaillée des ouvrages en bois » LCPC (Avril 2008)
- [50] Guide pour la conception des Ouvrages d'Art en Bois – AFGC (Février 2013)

Autres textes

- [51] Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire
- [52] Arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la classe dite « à risque normal »
- [53] Fascicule 65 du cahier des clauses techniques générales « Exécution des ouvrages de génie civil en béton »
- [54] Directive – Détails de construction de ponts – Chapitre 3 : Extrémités de ponts – Office Fédéral des routes Ofrou (Suisse) – ASTRA 12004 – Édition 2011 V1.00
- [55] Self-tapping screws as reinforcements in beam supports – I Bejtka – H J Blaß – Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen – Meeting thirty-nine – Florence – Italy (August 2006)
- [56] Timber-Concrete Composite Bridges : State-of-the-Art Review – J. N. Rodrigues, AMPG Dias, P. Providencia – Bioresources (Novembre 2013)
- [57] Projet NR2C – State of the art review – A vision of new bridges (Octobre 2007)

Glossaire

Sigles, acronymes et abréviations

Acerbois-Glulam : la certification Acerbois-Glulam, en complément du marquage CE, atteste de spécifications techniques complémentaires grâce à un principe de contrôle continu à chaque étape de la production et en vérifie les performances (<http://www.acerbois.org/fr/acerbois-glulam/>).

Afnor : Association française de normalisation.

BLC : bois lamellé-collé.

CTB-P + : certification des produits de traitement (www.ctbplus.fr).

CTB-B + : certification d'aptitude à l'emploi du matériau bois (www.ctbbplus.fr).

FCBA : Institut technologique forêt cellulose bois-construction ameublement.

Label FSC : FSC est une organisation mondiale, sans but lucratif, vouée à la promotion de la gestion responsable des forêts dans le monde entier. Un label FSC apposé sur un produit en bois ou en papier donne la garantie que celui-ci provient de forêts gérées de manière responsable et/ou contribue à la gestion responsable des forêts (aussi via l'utilisation de produits recyclés par exemple) (<http://fr.fsc.org>).

NR2C : New Road Construction Concepts, projet porté par la Commission européenne, qui s'est déroulé de 2003 à 2007, qui vise à définir le réseau routier du futur (horizon 2040).

PEFC : Program for the Endorsement of Forest Certification (anciennement Pan European Forest Certification). Système européen à sa création en 1999, devenu mondial en 2001, représenté par PEFC Council, organisation mondiale à but non lucratif. Cette certification promeut la gestion durable des forêts : elle pérennise l'exploitation forestière tout en préservant le rôle de réserve de biodiversité, de capteur de CO2 et de régulateur du climat des forêts. Apposée sur un produit en bois ou à base de bois, la marque PEFC apporte la garantie au consommateur que le produit qu'il achète est issu de sources responsables et qu'à travers son acte d'achat, il participe à la gestion durable des forêts (<http://www.pefc-france.org>).

Définitions

Aboutage par entures multiples : aboutage à auto-emboîtement formé en usinant dans les extrémités d'éléments en bois un certain nombre d'entures similaires, effilées et symétriques qui sont usinées à l'aide d'une fraise pour entures multiples puis assemblées par collage.

Adhésif pour joint épais : adhésif qui a fait l'objet d'essais appropriés avec des joints d'épaisseur 2 mm (NF EN 14080).

Anisotrope : se dit d'un corps ou matériau dont les propriétés dépendent de la direction (contraire d'isotrope).

Anobium punctatum : ou petite vrillette, insecte coléoptère.

Aubier : zone externe du bois qui, dans un arbre sur pied, contient des cellules vivantes et conduit la sève (NF EN 350).

Bois lamellé-collé en bloc : élément de structure ayant une section transversale rectangulaire massive, fabriqué à partir d'au moins deux composants en bois lamellé-collé assemblés par collage à l'aide d'un adhésif pour joint épais (NF EN 14080).

Bois lamellé-collé homogène : bois lamellé-collé ayant une section transversale où toutes les lamelles appartiennent à la même classe de résistance ou au même profil de résistance spécifique du fabricant (NF EN 14080).

Bois parfait : zone interne du bois qui, dans un arbre sur pied, ne comporte plus de cellules vivantes ou ne conduit plus la sève (NF EN 350).

Champignon lignivore : champignon qui se nourrit de bois humide, en causant sa décomposition.

Châtaignier : Castanea est un genre d'arbre de la famille des Fagaceae, comprenant le châtaignier commun (Castanea sativa) renommé pour son fruit, la châtaigne. (Wikipédia)

Chêne : nom de nombreuses espèces d'arbres et d'arbustes appartenant au genre Quercus, et à certains genres apparentés de la famille des Fagacées, notamment le Cyclobalanopsis et le Lithocarpus. Ce genre, présent dans tout l'hémisphère Nord et dont l'aire de répartition s'étend depuis les froides latitudes jusqu'aux zones tropicales de l'Asie et des Amériques, comprend à la fois des espèces à feuilles caduques et d'autres à feuilles persistantes. (Wikipédia)

Classe d'emploi : classement défini par la norme NF EN 335, permettant de distinguer les différentes situations en service auxquelles peuvent être exposés le bois et les matériaux à base de bois.

Classe de service : classement défini par l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-1) permettant d'affecter les valeurs de résistance et de calculer les déformations sous des conditions d'environnement définies. Les classes de service sont déterminées par la teneur en humidité du bois correspondant à l'humidité et à la température escomptées en service.

Délamination : la délamination est la propriété d'un film complexe, d'un matériau composite stratifié, à se cisailier dans son épaisseur longitudinalement. C'est un phénomène de vieillissement des matériaux à prendre particulièrement en compte. (Wikipédia) Les délaminations sont la conséquence d'un défaut de fabrication en usine, plus précisément d'un mauvais collage entre les lamelles constituant un élément. L'encadrement, via le marquage CE, des procédures d'autocontrôle de la fabrication a rendu ce phénomène rare. La délamination peut avoir plusieurs causes :

- lamelles mal préparées ;
- colle en quantité insuffisante ;
- serrage insuffisant en termes d'intensité ou de durée ;
- température non contrôlée pendant la fabrication.

Douglas : Pseudotsuga menziesii est une espèce d'arbre de la famille des Pinaceae, originaire de la côte ouest de l'Amérique du Nord. Elle est appelée « pin d'Oregon » (en Amérique du Nord), « sapin de Douglas » ou simplement « douglas » (cependant, d'autres espèces sont aussi appelées douglas). (Wikipédia)

Durabilité naturelle : résistance intrinsèque du bois aux attaques d'organismes destructeurs (NF EN 350 et FD P20-651).

Durabilité conférée : résistance améliorée d'une essence de bois vis-à-vis des agents de dégradations biologiques apportée par un procédé de traitement (chimique, physique, etc.) (FD P20-651).

Durabilité requise : exigence de l'Eurocode 0 (NF EN 1990) pour qu'une structure conserve un niveau de performance sur sa durée d'utilisation de projet.

Durée d'utilisation de projet : définie dans l'Eurocode 0 (NF EN 1990), c'est la durée pendant laquelle une structure ou une de ses parties est censée pouvoir être utilisée comme prévu en faisant l'objet d'une maintenance escomptée, mais sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures. Pour les ponts, elle est fixée à 100 ans.

Élancement : rapport entre la hauteur (ou l'épaisseur) d'un élément de structure et sa portée (ou sa longueur).

Épicea : Picea abies est une espèce d'arbre résineux de la famille des pinacées et du genre Picea (Wikipédia).

Équilibre hygroscopique : en fonction de la température et surtout de l'humidité de l'air ambiant, le bois se stabilise à une humidité d'équilibre, dite équilibre hygroscopique, qui est pratiquement indépendante de l'essence du bois. Sous le climat tempéré existant en France pendant la période la plus sèche, les conditions atmosphériques sont de l'ordre de 20 °C et 70 % d'humidité relative de l'air (HR), ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois d'environ 13 %. Pendant la période la plus humide, les conditions atmosphériques sont de l'ordre de 0 à 5 °C et 85 % HR, ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois de l'ordre de 19 %.

Fil du bois : sens des fibres du bois.

Fongicide : un fongicide est une substance (par exemple : produit phytosanitaire) conçue exclusivement pour éliminer ou limiter le développement des champignons parasites des végétaux. Les fongicides sont également produits à l'état naturel par certains végétaux (par exemple : l'épervière piloselle, Hieracium pilosella). (Wikipédia)

Hylotrupes bajulus : ou capricorne des maisons, insecte coléoptère à larve xylophage.

Imprégnabilité : facilité avec laquelle un bois peut être pénétré par un liquide (comme un produit de préservation) (NF EN 350).



Insecte xylophage : insecte se nourrissant du bois. On distingue les termites et les insectes à larves xylophages.

Insectes à larves xylophages : insectes (capricorne, vrillette, lyctus et syrex) dont les larves dévorent le bois et vivent dedans plusieurs années jusqu'à leur métamorphose en adultes prêts à se reproduire. Plus faciles à repérer que les termites et causant moins de ravages, ils sont exclus du cadre de la loi.

Joint de colle épais : joint de colle dont l'épaisseur nominale est comprise entre 0,3 mm et 2,0 mm au moment du collage.

Joint de colle : couche adhésive entre les éléments en bois (NF EN 301).

Joint de colle mince : joint de colle d'épaisseur maximale 0,1 mm (NF EN 301).

Lamelles : planches, habituellement aboutées par entures multiples, faisant partie d'un bois lamellé-collé ou d'un bois massif reconstitué (NF EN 14080).

Nervure : association de poutres en lamellé-collé, désigné bois lamellé-collé en bloc dans la norme NF EN 14080, formant ainsi une poutre massive de forme rectangulaire (la dimension de la base étant proche de celle de la hauteur).

Pin sylvestre : *Pinus sylvestris* est une espèce d'arbre de la famille des Pinaceae naturellement présent dans une grande partie de l'Europe tempérée et boréale et jusqu'en Sibérie orientale. Son bois est parfois désigné sous l'appellation « pin du Nord ». (Wikipédia)

Pin maritime : le pin maritime, pin des Landes, pin de Corse ou pin mésogéen (*Pinus pinaster*), est une espèce de conifère de la famille des pinacées. (Wikipédia)

Procédé de traitement par imprégnation : procédé comportant des caractéristiques ou des technologies destinées à modifier la résistance naturelle du bois à la pénétration d'un produit de préservation du bois prêt à l'emploi (défini selon la norme NF EN 599 +A1).

Produit de préservation : matière active ou préparations contenant une ou des matière(s) active(s) dans l'état où elles sont mises sur le marché, et qui sont sur la base des propriétés de leur(s) matière(s) active(s) destinées à prévenir les attaques du bois ou des produits à base de bois par des organismes soit détruisant, soit altérant l'aspect du bois (champignons, insectes et térébrants marins) (NF EN 599 +A1).

Résine aminoplaste : résine synthétique thermodurcissable dérivée d'une réaction de condensation entre les groupes -NH ou -NH₂ des amines ou amides et les aldéhydes. Surtout utilisé comme liant (adhésif) dans l'industrie du bois et de ses dérivés (contreplaqué, bois aggloméré, mélaminé) (NF EN 301).

Résine phénolique : résine synthétique thermodurcissable dérivée d'une réaction de condensation entre un phénol et les aldéhydes (NF EN 301).

Robinier : le robinier faux acacia ou acacia (*Robinia pseudoacacia*) est une espèce de la famille des fabacées (légumineuses de la sous-famille des Viciaceae). (Wikipédia)

Sapin : le sapin blanc, sapin commun, sapin pectiné ou plus simplement sapin (*Abies alba* Mill.) est un conifère de la famille des pinacées. Il est localement appelé sapin de Normandie ou sapin de l'aigle (Normandie), sapin de croix (Bretagne), sapin des Vosges, sapin noir, sapin à feuilles d'if, ainsi que vuargne, ouargne ou warne (Haute-Savoie et Suisse), ghjällicu (Corse) et plus rarement sapin argenté. C'est une essence importante pour la foresterie en Europe. (Wikipédia)

Semi-intégral : conception d'ouvrage dans laquelle on élimine les joints de dilatation en extrémité de tablier de façon à diminuer les charges d'entretien liées à la présence de cet équipement. Une retombée de dalle retient les terres (garde-grève intégré au tablier) et offre une excellente protection de l'about du tablier contre des arrivées d'eau.

Térébrants marins : se dit d'un animal marin (crustacé, mollusque) qui creuse des trous, des galeries dans un corps dur, notamment les bois immergés.

Termites : insecte vivant en colonie à l'extérieur, dans le sol, mais capable de traverser les maçonneries des maisons et immeubles pour venir s'attaquer au bois. Les ravages sont tels qu'il existe une loi pour s'en prémunir (loi n° 99-471 du 8 juin 1999).

Annexe

Exemples de réalisation de ponts mixtes bois/béton

Nous présentons ici trois exemples de réalisation de ponts mixtes bois/béton avec connexion mécanique construits récemment en France et inspirés du concept présenté dans le présent guide.

Pont du vallon du Riou

Le pont sur le vallon du Riou à Lantosque a été construit par les entreprises Campenon Bernard et Arbonis en 2015 sous la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage de Nice Côte d'Azur Métropole. Le pont porte une route à une voie. Le tablier présente une travée de 13 m de portée pour une largeur totale de 6,13 m (figure A1 et photos A1 et A2).

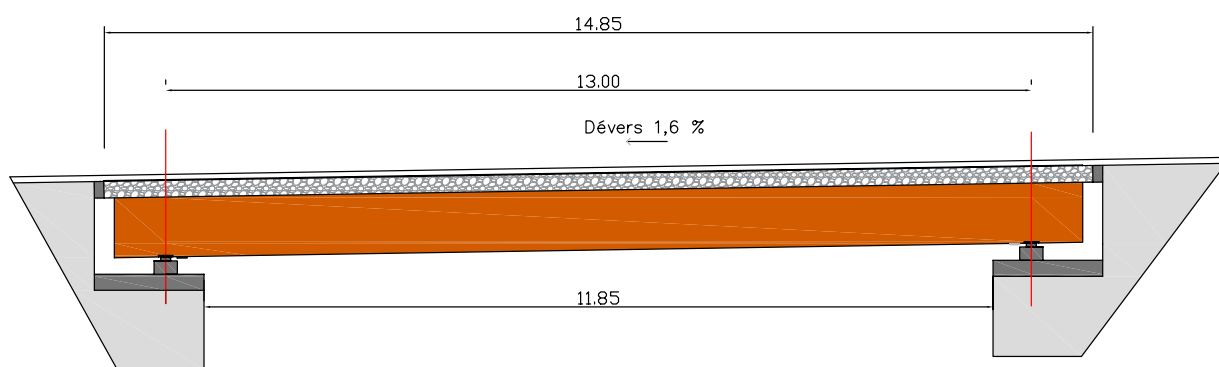


Figure A1 : Coupe longitudinale



Photo A1 : Élévation (Source : Nice Côte d'Azur Métropole)

Il comporte 4 nervures sous chaussée en bois lamellé-collé (figure A2) de dimension 0,82 m (b) x 0,90 m (h) en Douglas GL24. Chaque nervure est constituée de 4 poutres unitaires de 20,5 cm de large recollées entre elles. Les nervures reçoivent un traitement de préservation et une lasure.

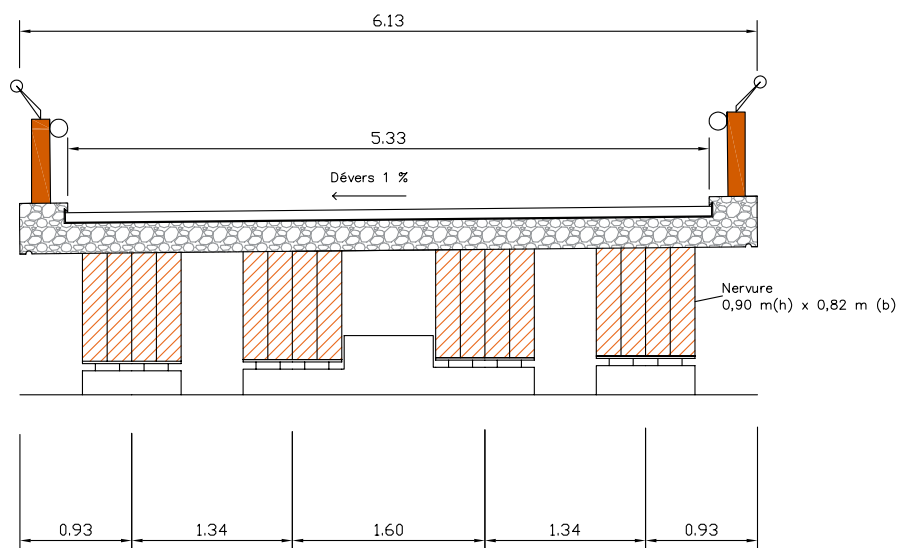


Figure A2 : Coupe transversale



Photo A2 : Vue de la chaussée sur ouvrage (Source : Nice Côte d'Azur Métropole)

La connexion est constituée de plaques métalliques de 12 mm d'épaisseur pour une dimension en plan de 190 mm x 346 mm positionnées chacune dans une engravure réalisée sur les nervures. La plaque est équipée de goujons soudés de diamètre 16 mm sur sa face supérieure (6 goujons par plaque suivant les zones) et est liaisonnée par des tirefonds WÜRTH VG 12 mm x 140 mm à raison de 28 tirefonds par plaque (figure A3 et A4).

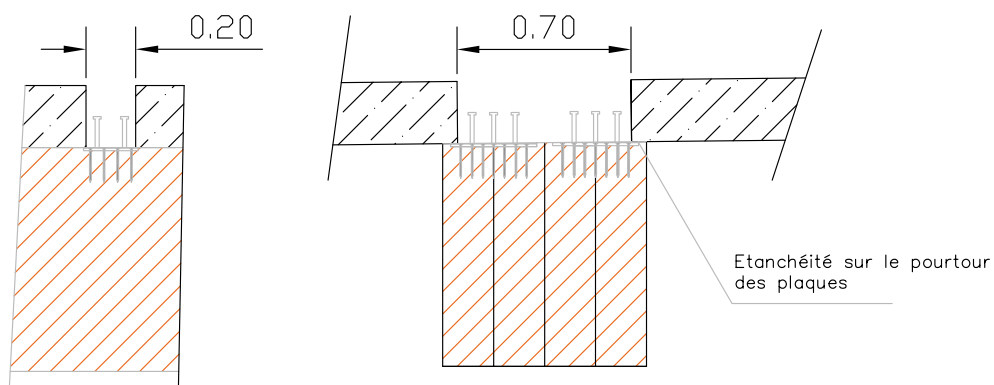
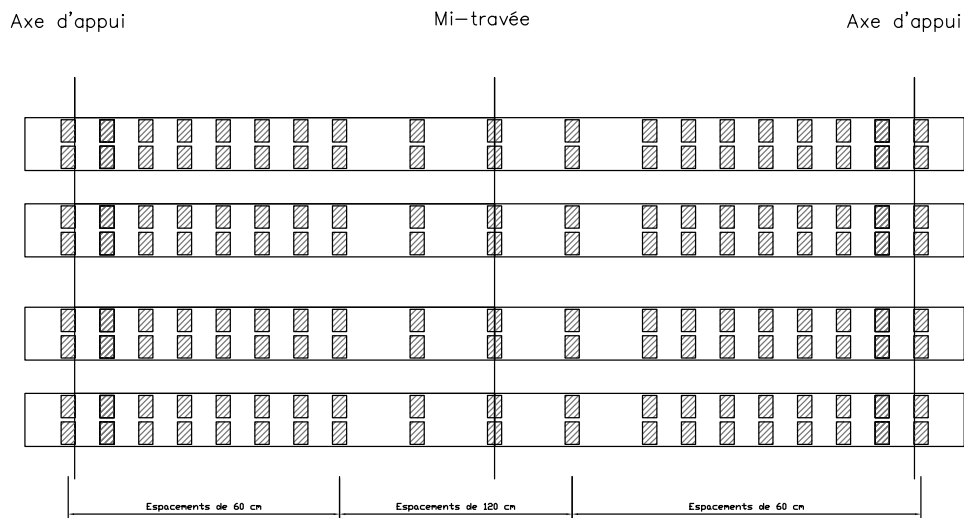


Figure A3 : Réserve dans le hourdis préfabriqué pour connexion sur les nervures en bois



Les nervures sont mises en œuvre à la grue, elles ne sont pas entretoisées et reposent sur des appareils d'appui en caoutchouc fretté. Les zones d'appui des nervures sont renforcées par des vis de fretage SFS WR T 13 de 500 mm de longueur. Le hourdis est constitué d'éléments préfabriqués (photo A3) en béton C35 d'une épaisseur de 25 cm et présentant des lumières pour connexion aux nervures.



Pont de Cognin

Le pont sur la rivière l'Hyères à Cognin a été construit par les entreprises Eiffage et Pierrefeu en 2015 sous la maîtrise d'ouvrage de Chambéry Métropole. La maîtrise d'œuvre des travaux a été réalisée par le bureau BG Ingénieurs-Conseils. Le pont porte une route communale à 2 voies et une large piste cyclable. Le tablier présente trois travées continues (figure A5 et photos A4 et A9) de portées respectives 9, 19 et 10 m pour une largeur totale de 12,74 m.

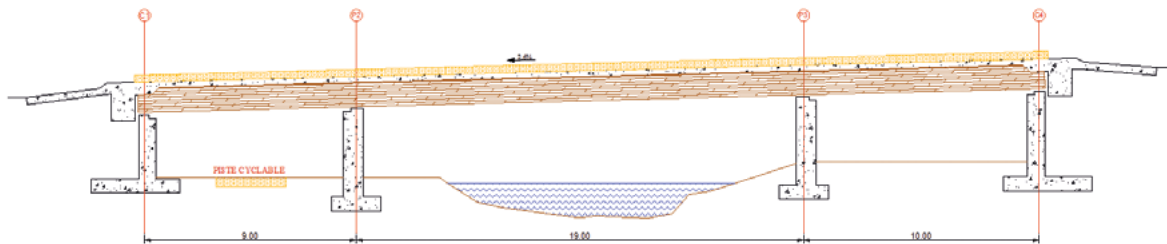


Figure A5 : Coupe longitudinale de l'ouvrage (Source : SIBSolutions)



Photo A4 : Élévation générale de l'ouvrage (Source : BG Ingénieurs-Conseils)

Il comporte 9 nervures sous chaussées en bois lamellé collé (figure A6 et photo A5) de dimension 0,54 m (b) x 1,00 m (h) en Douglas GL28c. Chaque nervure est constituée de 3 poutres unitaires de 18 cm de large recollées entre elles. Les nervures reçoivent un traitement de préservation et une lasure.

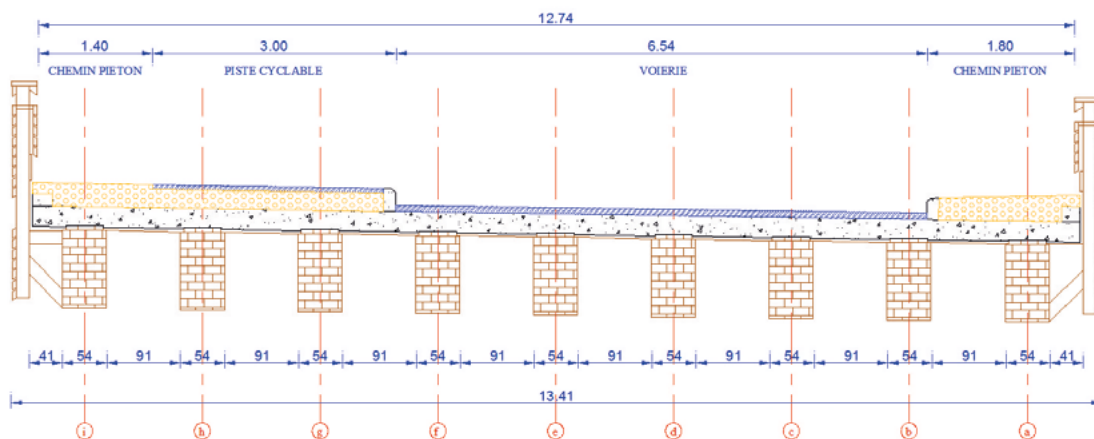


Figure A6 : Coupe transversale de l'ouvrage (Source : SIBSolutions)



Photo A5 : Vue de l'intrados du tablier (Source : Cerema)

La connexion est constituée de plaques métalliques de 10 mm d'épaisseur pour une dimension en plan de 200 mm x 400 mm. Chaque plaque est équipée de goujons soudés de diamètre 19 mm sur sa face supérieure (4 à 5 goujons par plaque suivant les zones) et est liaisonnée par des tirefonds SFS WR T 13 mm x 400 mm à raison de 20 à 23 tirefonds suivant les zones (figure A7).

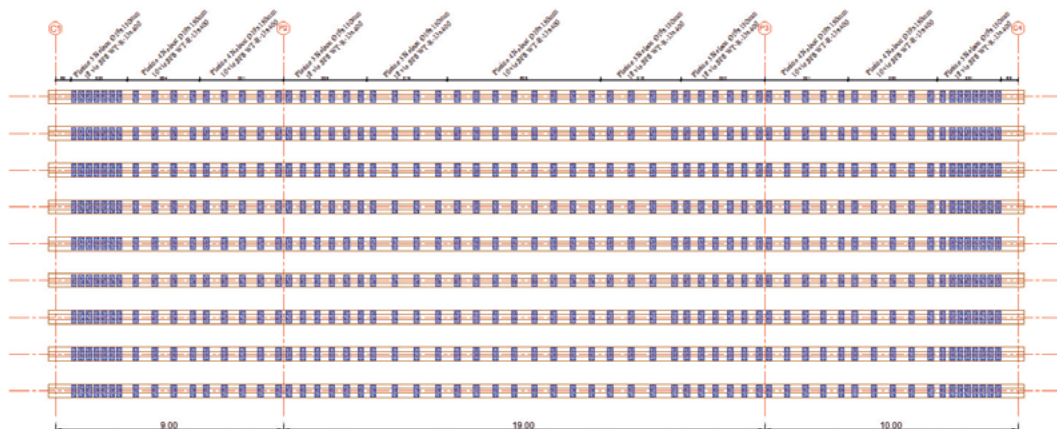


Figure A7 : Répartition des plaques de connexion sur les nervures en bois (Source : SIBSolutions)

Les nervures sont mises en œuvre à la grue (photo A6) et sont entretoisées sur chaque ligne d'appui. Elles reposent sur des appareils d'appui en caoutchouc fretté (photo A7) et leurs zones d'appui sont renforcées par des vis de frettage SFS WR T 13 de 500 mm de longueur sur culées et de 600 mm de longueur sur piles.



Photo A6 : Pose des nervures sur appuis définitifs (Source : BG Ingénieurs-Conseils)



Photo A7 : Appareil d'appui sur culée (Source : Cerema)

Le hourdis en béton C35 d'une épaisseur de 25 cm est coulé en place sur un coffrage perdu (photos A8). Les culées ont une conception semi-intégrale avec une dalle de transition articulée.



Photo A8 : Mise en œuvre du coffrage perdu (Source : BG Ingénieurs-Conseils)



Photo A9 : Épreuves de chargement du pont (Source : Cerema)

Passage faune sur la RN19

Le PS12 sur la RN19 à Lure a été construit par les entreprises Eiffage et Arbonis en 2017 sous la maîtrise d'ouvrage de la Direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement de Bourgogne-Franche-Comté. La maîtrise d'œuvre des travaux a été assurée par la Direction interdépartementale des routes Est. Le pont offre le passage à un chemin forestier et assure le rôle de continuité écologique pour la grande faune (photo A10). Le tablier présente deux travées continues de 15 m de portée chacune pour une largeur totale de 12,60 m (figure A8).



Photo A10 : Vue de l'extrados de l'ouvrage (Source : Cerema)

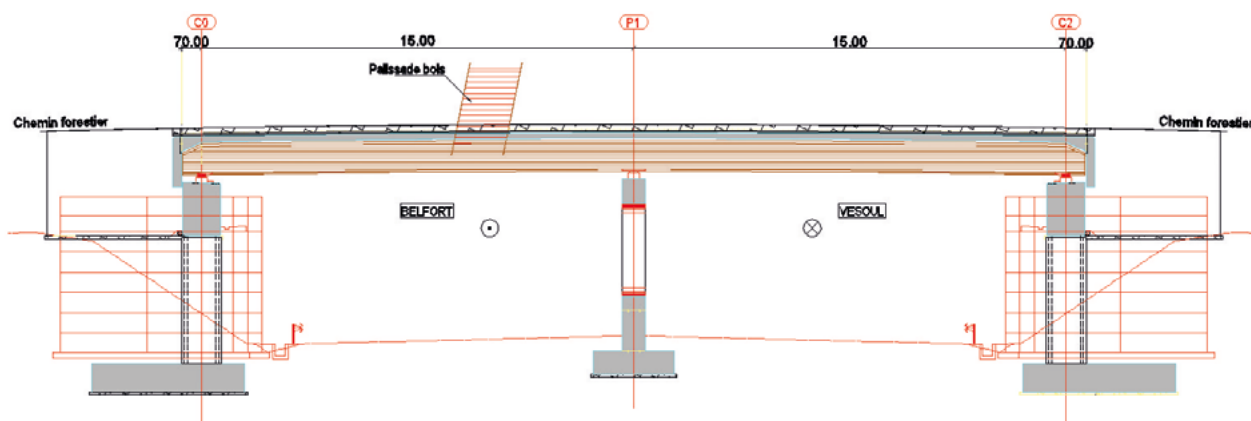


Figure A8 : Coupe longitudinale de l'ouvrage (source : Cerema)

Il comporte 4 nervures sous chaussée (photo A11 et figure A9) en bois lamellé-collé de dimension 1,20 m (b) x 1,00 m (h) en Douglas GL24. Chaque nervure d'une longueur de 31,40 m est constituée de 6 poutres unitaires de 20 cm de large recollées entre elles. Les nervures reçoivent un traitement de préservation et une lasure.



Photo A11 : Intrados du tablier (Source : Cerema)

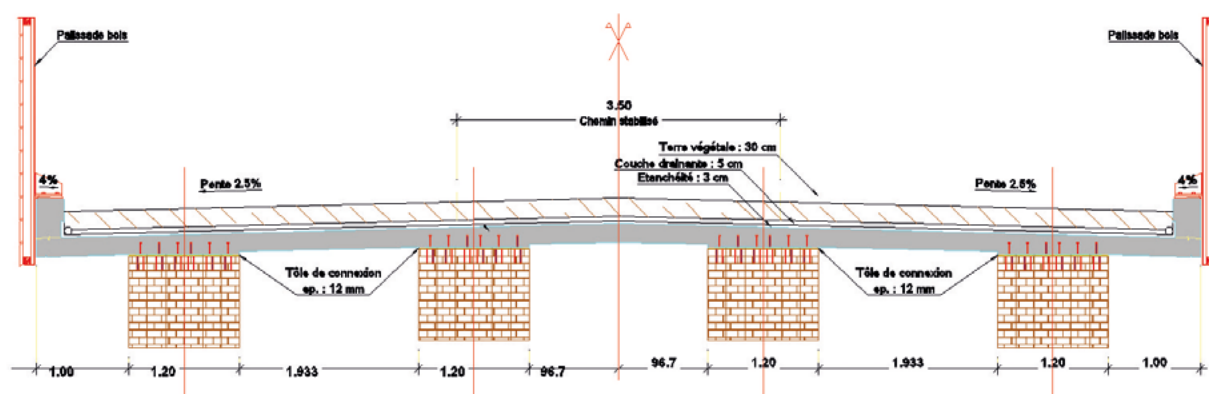


Figure A9 : Coupe transversale de l'ouvrage (Source : Cerema)

La connexion est constituée de plaques métalliques de 12 mm d'épaisseur pour une dimension en plan de 550 mm x 550 mm (figure A10). Chaque plaque est équipée de goujons soudés de diamètre 16 mm sur sa face supérieure (9 goujons par plaque) et est liaisonnée par des tirefonds ROTHOBLOSS HBS 12 mm x 160 à 320 mm (66 tirefonds par plaque).

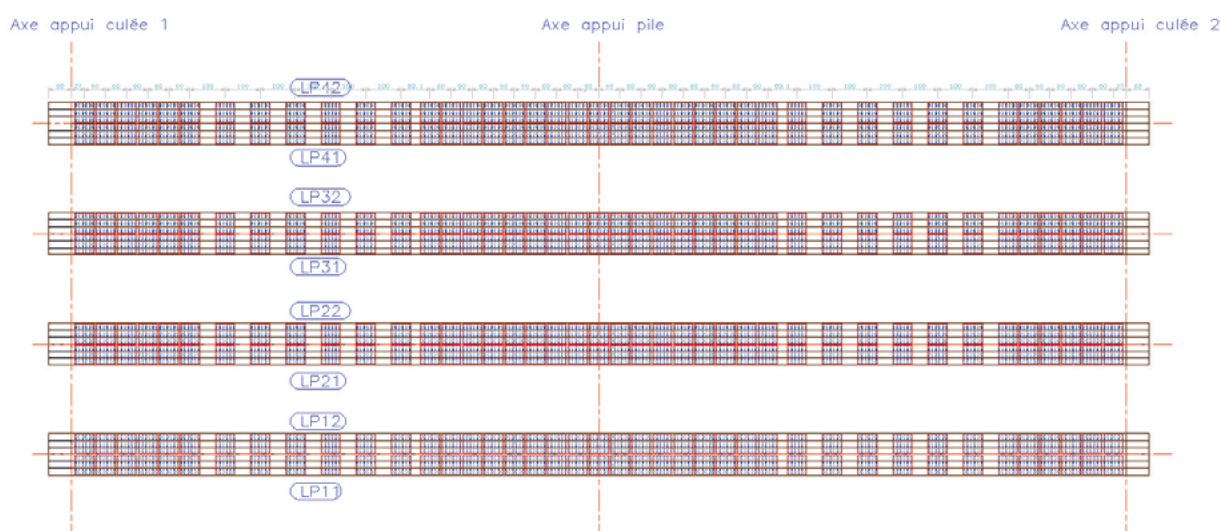


Figure A10 : Répartition des plaques de connexion sur les nervures en bois (Source : Cerema)

Les nervures, mises en œuvre à la grue (photos A12 et A13), ne sont pas entretoisées.



Photo A12 : Livraison des nervures sur site (Source : Cerema)



Photo A13 : Mise en œuvre des nervures à la grue (Source : Cerema)

Elles reposent sur des appareils d'appui en caoutchouc fretté (photo A14). Le hourdis en béton C35 d'une épaisseur de 20 cm est coulé en place. Les culées ont une conception semi-intégrale.



Photo A14 : Vue de la pile centrale (Source : Cerema)

Notes :

[illegible]

© 2019 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires.

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en oeuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au coeur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia.

Mise en page › Drapeau Graphic - Parc Éco 85 - 27 impasse Louis-Marie Barbarit - 85000 La Roche sur Yon

Illustration couverture › © Cerema

Impression › Jouve - 1, rue du Docteur Sauvé - 53100 Mayenne - Tél. 01 44 76 54 40

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Jouve est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétale, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Achevé d'imprimer : **novembre 2019**

Dépôt légal : **novembre 2019**

ISBN : **978-2-37180-413-5**

ISSN : **2276-0164**

Prix : **43 €**

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › www.cerema.fr

Pour toute correspondance › Cerema - Bureau de ventes - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03
ou par mail › bventes@cerema.fr

www.cerema.fr › Nos publications

La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Ponts mixtes bois/béton à poutres en lamellé-collé

Le succès des matériaux industriels comme l'acier et le béton a quelque temps éclipsé l'intérêt de ce matériau naturel aux caractéristiques mécaniques pourtant bien intéressantes qu'est le bois. Il convient aujourd'hui de remettre en évidence les qualités de ce matériau et surtout les bonnes dispositions constructives qui gouvernent la durabilité des ouvrages. Le matériau bois doit retrouver dans le domaine de la construction toute sa place, notamment dans le domaine des ponts routiers.

Le guide propose une association heureuse du bois et du béton. Le béton, qui a une excellente aptitude à travailler en plaque, sert de support à la couche de roulement mais aussi de protection contre l'eau aux poutres en bois. Le bois est utilisé de manière efficace avec des nervures porteuses en lamellé-collé, technique qui permet d'adapter facilement les caractéristiques des nervures aux besoins.

Dans la lignée des documents publiés par le Cerema, ce document a été rédigé pour guider le projeteur à toutes les étapes du projet depuis la conception générale jusqu'à la conception détaillée. Le présent guide aborde la conception d'une structure innovante qui a fait l'objet d'une expérimentation sur un ouvrage réel. Ce type d'ouvrage peut porter des voies routières sans limitation particulière de tonnage. Toutefois, on exclura, dans l'attente d'un retour d'expérience plus exhaustif les axes stratégiques et notamment les axes autoroutiers.

Sur le même thème

Eurocode 5 - Application aux ponts-routes à tablier mixte bois/béton à poutres en lamellé-collé - Guide méthodologique, Cerema, à paraître

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Prix 43 €

ISSN : 2276-0164

ISBN : 978-2-37180-413-5



Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr

Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30