

29 mars 2007 à Nancy

Le bois dans les ouvrages de génie civil : comment assurer une bonne durabilité

Le 29 mars 2007, le CETE de l'Est a organisé une journée technique consacrée au bois dans le génie civil. La nouvelle délégation Grand Est s'est associée à cette journée pour sa première manifestation.

Rappel du programme

9h00 Accueil des participants

9h30 Ouverture

François HURSON - Directeur du CETE de l'Est

Pascal TRIBOULOT - Directeur de l'ENSTIB

Le matériau bois

Président de séance: Pascal TRIBOULOT - ENSTIB

9h45 L'utilisation du bois dans la construction

D. MILLEREUX - FIBIC

10h05 Historique des ponts en bois

Jacques BERTHELLEMY - SETRA

10h30 Le bois et l'environnement

Marie Christine TRIBOULOT - ENSTIB

11h00 Les propriétés physiques et mécaniques du bois

Jean-Louis CHAZELAS - LCPC - NANTES

11h20 Pause

11h35 Les produits à base de bois et assemblages

J. SURLEAU - FIBIC

12h00 Connexions bois-béton

Robert LEROY - ENPC

12h20 L'Eurocode 5

S. LENEVÉ - CTBA

12h45 Les équipements routiers en bois: spécificités et exemples

J. GENDARME - AREBOIS

13h15 Déjeuner

Les ouvrages de franchissement en bois

Président de séance: Thierry KRETZ - SETRA

14h30 Bien concevoir les ouvrages de franchissement

Vincent BARBIER - CETE de l'Est

14h55 La commande d'un ouvrage en bois

Pierre CORFDIR - CETE de l'Est

15h15 Exemples de ponts et passerelles

Jean Yves JOINEAU - CETE de l'Est

15h35 Le pont sur la DORE (Puy de Dôme)

Dominique CALVI - BET CALVI

16h00 Table ronde "les ouvrages en bois - du choix initial à la gestion" animée par D. MILLEREUX, avec la participation de V. BARBIER (CETE de l'Est), M. DUBLE (Entreprise Fargeot), M. BRUN (ASF), D. CALVI (BET CALVI) et J.L. MICHOTÉY (SEPIA)

16h45 Synthèse et conclusion de la journée par les deux présidents

Quelques résumés des conférences

Historique des ponts en bois

Jacques BERTHELLEMY

Le public apprécie la présence du bois autour de lui. Le choix du bois pour la réalisation de nombreux écrans routiers anti-bruit en témoigne. À performances phoniques égales, les riverains qu'on consulte, choisissent des écrans acoustiques en bois.

Avec ces préoccupations environnementales du public, les maîtres d'ouvrage redécouvrent le bois et son aspect initial chaleureux. De plus, les ponts en bois sont légers et faciles à monter, ce qui est très appréciable pour réduire la gêne causée par des travaux.

Mais trop de ponts, pourtant récents, et construits en bois traité, présentent déjà de graves dégradations par pourrissement après moins de vingt ans de service. Quand les ponts doivent être démolis, les maîtres d'ouvrage sont responsables des déchets toxiques produits par les bois traités.

Il était nécessaire de réaffirmer que la pérennité des structures en bois repose avant tout sur le choix de bonnes dispositions constructives initiales, qui doivent mettre à l'abri un matériau sensible, d'origine organique. Certes, la qualité de l'entretien contribue également à la durabilité de structures en bois qui, en participant à l'ossature d'un pont, sont somme toute toujours un peu plus exposées que des charpentes de toiture.

Il ne faut pas pour autant opposer la construction en bois bien conçue, à la construction en bois traité. Une charpente en bois, bien à l'abri et bien conçue, constitue un développement durable.

Paradoxalement, il devient alors plus légitime de la traiter par des antifongiques et des insecticides.

Ces traitements seraient en effet moins efficaces avec une mauvaise conception, laissant la charpente exposée aux intempéries.

Par ailleurs, on trouve pour les platelages et les garde-corps en contact avec le public, des bois exotiques issus de forêts gérées sans compromettre l'avenir, qui demeurent durables sans nécessiter de traitement et ne posent pas de problème sanitaire : il n'y a donc aucune raison d'exclure a priori ces bois.

Actuellement, peu d'ouvrages de référence sont disponibles en France sur la construction des ponts en bois. Pour signaler tous les écueils, et promouvoir un matériau trop longtemps oublié, le Sétra a jugé utile de publier un guide consacré aux ponts, pour les maîtres d'ouvrage qui s'engagent sur le matériau bois.



Le guide se compose de cinq parties. La première partie retrace depuis l'Antiquité l'histoire des ponts en bois en soulignant l'importance des détails de conception pour leur durabilité.

Les notions fondamentales liées au comportement mécanique et physique du bois sont ensuite développées dans une deuxième partie assez théorique. Un chapitre traite des risques liés à l'utilisation de produits de traitement de préservation des bois, aussi bien en terme de toxicité qu'en terme de recyclage du bois ainsi traité. La conception et les dispositions constructives sont traitées dans une partie faisant la part belle aux exemples de ponts récents construits en France et en Europe. Enfin, les bases d'une prescription réussie sont présentées dans la dernière partie.

Le bois dans notre cadre de vie : de multiples tenants et aboutissants.

Utiliser le bois pour construire de grandes structures en plein air comporte de multiples conséquences en matière de santé et d'environnement.

• Minimiser les nuisances et la consommation de carburants

Les structures sont plus légères en bois qu'en utilisant d'autres matériaux plus classiques de construction. Les structures sont donc plus faciles et plus rapides à monter.

C'est un atout important pour les maîtres d'ouvrage soucieux de réduire gênes et nuisances causées par un chantier, aux usagers et aux riverains.

La consommation d'énergie sous forme de carburants est ainsi plus réduite, tant par le chantier pour la mise en place des structures, que par les riverains dans les embouteillages des déviations.

Le montage à la grue en une seule nuit de l'ensemble de la passerelle de Vaires-sur-Marne construite pour RFF à l'occasion de la construction de la ligne TGV-Est illustre parfaitement cet avantage du bois.



Passerelle de Vaires-sur-Marne conçue par SNCF Ingénierie - Bernard Rey architecte (photo Olivier Thomas)

• Séquestrer du carbone

Construire durablement en bois permet de fixer le gaz carbonique absorbé par la forêt.

Ce gaz est un des principaux agents de l'effet de serre. Il est produit lors de la combustion des hydrocarbures, ou des combustibles fossiles comme le charbon.

À ce sujet, la mise en application concrète des accords de Kyoto s'est traduite par une charte nationale « Bois-construction-environnement » visant à augmenter en France la part du bois dans le génie civil.

Cependant, aucun dispositif n'est prévu afin de rétribuer un maître d'ouvrage qui construit en bois pour cette séquestration de carbone, soit sur le marché des permis d'émission, soit par un autre système.

• Réduire la toxicité des produits de traitement

Le bois non traité est un matériau naturel et écologique, mais l'adjonction de produits chimiques de préservation, apparue en Amérique du Nord dans les années 1930, remet en question ces propriétés.

Lorsqu'ils sont insuffisamment durables, les bois peuvent être protégés des attaques fongiques par des traitements chimiques, à base de produits qui pour être efficaces, sont nécessairement toxiques.

Le grand intérêt de ces produits est de pouvoir valoriser des essences peu durables et d'utiliser les ressources locales de bois.

Le guide fait le point sur les réglementations qui concernent les traitements de préservation.

Le produit de traitement le plus connu était le Chrome-Cuivre-Arsenic (CCA) qui donne une couleur verdâtre au bois. Le cuivre est l'agent fongicide, l'arsenic est l'insecticide et le chrome a un rôle de fixateur.

Ces produits posent des problèmes de santé et d'environnement. Vis à vis de la santé, l'emploi des produits, l'usinage des bois ou le contact cutané prolongé peuvent être à l'origine de cancers. La réglementation qui concerne les traitements évolue avec les directives européennes. L'utilisation du CCA dans le traitement du bois est remise en cause aujourd'hui parce qu'il contient des substances toxiques qui en doses suffisantes peuvent induire le classement des bois traités en déchets dangereux. Le CCA est interdit depuis

septembre 2006, mais il existe des traitements de substitution.

Avant de démolir des anciennes structures, il est par ailleurs préférable d'analyser au préalable la toxicité potentielle des déchets pour en assurer une élimination conforme à la réglementation. Les informations fournies à ce titre dans le guide peuvent également être utiles aux gestionnaires d'équipements routiers comme les glissières de sécurité en bois utilisées dans certaines zones d'intérêt paysager.

• **Ne pas exclure a priori les bois exotiques.**

Il convient essentiellement pour un maître d'ouvrage de s'assurer de la provenance des bois utilisés afin d'éviter l'emploi de bois d'origines incertaines. Les Services des Douanes peuvent le cas échéant indiquer au maître d'ouvrage quelles sont à un moment donné les essences qui présenteraient des risques à cet égard, et sont seuls en mesure d'établir le document douanier d'importation.

S'il est raisonnable d'exiger une certification PEFC* (*PEFC : "pan european forest council"), Keurhout ou équivalent concernant l'origine des bois exotiques, exiger des certifications complémentaires serait en revanche trop restrictif et exclurait arbitrairement de nombreuses régions de production soucieuses de la gestion durable de leur forêt, comme la Guyane française par exemple.

Bref regard sur le passé

Le bois est utilisé dès le Néolithique pour le franchissement des rivières. On estime que des grumes posées à plat et recouvertes d'un platelage il y a 17.000 ans déjà constituent les premiers ponts en bois, avec toutefois des portées limitées à une dizaine de mètres.

À l'époque médiévale, les constructeurs prennent conscience que la pourriture est l'ennemi majeur du bois et qu'elle peut être évitée en conservant le matériau au sec. Ainsi des ponts couverts apparaissent et des blocs de pierre s'intercalent entre le sol humide et le bois. Un exemple frappant de longévité datant de cette période est le pont de la chapelle de Lucerne construit en 1333, qui avait plus de six siècles de service avant son incendie accidentel en 1993.

L'effondrement d'un pont bâti parisien, celui du Petit-Châtelet, en janvier 1407 lors d'une crue de la Seine marque le début de l'abandon du bois : la Grande Peste de 1349 et la guerre, en causant un terrible dommage à la démographie et à l'économie, avaient probablement conduit à l'abandon progressif des bonnes pratiques en matière d'entretien du patrimoine d'ouvrages d'art. Depuis le 14^e siècle, l'utilisation du bois a décliné en France au profit de la pierre, matériau plus cher à l'investissement mais moins exigeant en termes d'entretien que le bois, jugé trop contraignant par les maîtres d'ouvrage. Le développement des ouvrages en acier et en béton, l'augmentation des charges routières liées à l'apparition de l'automobile ont condamné en grande partie les ouvrages en bois dès la fin du 19^e siècle.

Au 20^e siècle, avec le développement des diverses formes d'association du béton et du métal, ce

phénomène s'est encore accentué. En France, les notions importantes sur le comportement du bois et les règles de construction ont même été peu à peu oubliées. C'est pourquoi certains ouvrages réalisés au cours des vingt dernières années notamment en bois lamellé collé présentent déjà des problèmes de dégradation prématurée : La dispersion importante de la durée de vie des ouvrages en bois s'explique par une perte de compétence sur l'utilisation de ce matériau.

La pérennité des ouvrages repose essentiellement sur le choix de bonnes dispositions constructives initiales et sur la qualité de l'entretien. Les deux photos qui suivent illustrent ces principes d'une façon raccourcie, mais saisissante.



Pont couvert du 18^e siècle toujours régulièrement entretenu et encore en service aujourd'hui. Photo : Jacques Berthelley



Tablier de pont suspendu en bois mal protégé après le passage d'un poids lourd ne respectant pas la limitation de tonnage. Photo : Cete de Lyon

Le bois et l'environnement

Marie-Christine TRIBOULOT

Les atouts écologiques du bois

L'écologie est la science qui étudie les conditions d'existence d'un être vivant et les rapports qui s'établissent entre cet être et son environnement. Est écologique ce qui se rapporte à l'écologie. Ces définitions du dictionnaire ne nous éclairent guère sur ce qu'est un matériau écologique ou un atout écologique.

On comprend cependant qu'un matériau, ou un produit, dit « écologique » aura peu d'impacts négatifs sur l'environnement en terme d'énergie dépensée, de

matières premières consommées et de pollutions occasionnées. Plusieurs indicateurs existent comme l'énergie grise, l'empreinte écologique ou l'écobilan. Cette dernière évaluation est la plus complète ; elle étudie les impacts de toutes les étapes de vie d'un produit, « du berceau jusqu'à la tombe » selon l'expression consacrée. Les écobilans ou les analyses des cycles de vie (ACV) sont les outils indispensables permettant d'améliorer les points faibles et de faire les meilleurs choix en terme de protection de l'environnement.

Les écobilans des produits bois sont souvent favorables pour justifier le choix de ce matériau. Même si un écobilan peut toujours être amélioré, le bois bénéficie d'un avantage initial sans nul autre pareil : c'est un matériau aux propriétés mécaniques exceptionnelles, fabriqué et recyclé naturellement sur Terre depuis des centaines de millions d'années. Il est renouvelable et biodégradable. Qui plus est, alors que le monde entier prend enfin conscience de la gravité des changements climatiques à venir, la fabrication du bois par les arbres utilise le dioxyde de carbone atmosphérique, principal gaz à effet de serre émis par les activités humaines.

Le bois contient 50% de carbone en masse et tout ce carbone provient du dioxyde de carbone prélevé par l'arbre dans l'atmosphère. Pour fabriquer 1 m³ de bois de masse volumique 550 kg/m³, l'arbre a retiré de l'atmosphère 1 tonne de CO₂. Alors que la fabrication des autres matériaux (métaux, béton, matières plastiques) consomme de l'énergie et émet du CO₂, la fabrication du bois stocke du carbone issu du CO₂ atmosphérique.

Dans le cadre de la lutte contre l'accentuation de l'effet de serre, l'intérêt de l'utilisation du bois dans la construction (secteur susceptible d'absorber les plus gros volumes) a plusieurs facettes :

- La récolte du bois permet de soustraire à la décomposition les arbres arrivés à maturité et de régénérer les forêts pour leur faire jouer un véritable rôle de puits de carbone (un puits est un stock qui augmente).

- Par ailleurs, l'exploitation forestière ne doit pas être responsable de la déforestation.

Pour sauver les forêts des pays pauvres, il faut avant tout remédier à la pauvreté.

Donner une valeur marchande au bois peut participer à donner de la valeur à la forêt et encourager son respect.

- Le bois est un matériau à faible coût énergétique : utiliser plus de bois, c'est utiliser moins de matériaux non renouvelables, nécessitant beaucoup d'énergie pour leur fabrication et leur transformation. Le bois est un bon isolant qui permet de faire des économies d'énergies.

- Le bois présente l'avantage d'être non seulement un matériau de construction mais également une source d'énergie. Les bois d'éclaircie, les déchets de fabrication et les produits en fin de vie peuvent être valorisés pour produire de l'énergie. Le bilan en carbone du bois énergie est nul, la combustion rejetant simplement le carbone retiré de l'atmosphère par l'arbre au cours de sa croissance.

Les manifestations régionales

- Le bois est facilement recyclable : on peut par exemple utiliser de vieilles poutres pour fabriquer des menuiseries, de vieilles menuiseries pour fabriquer des panneaux de particules,...

L'écocertification (FSC, PEFC,...) permet d'identifier les bois récoltés dans les forêts gérées durablement. L'état français, la communauté européenne et les professionnels s'engagent :

- pour promouvoir l'utilisation du bois dans la construction

- pour garantir la provenance des bois (forêts exploitées durablement et légalement)

La durabilité du bois

Certains êtres vivants se nourrissent de bois. La conservation des propriétés du matériau pendant un temps défini nécessite une connaissance des agents biologiques de dégradation, de leur mode de développement et de la résistance naturelle des essences.

Beaucoup de bois présentent une durabilité naturelle suffisante pour de nombreuses utilisations. Aujourd'hui, les professionnels de la construction en bois privilégient le choix d'essences naturellement résistantes, en y associant des mesures de prévention constructive visant à limiter le plus possible le risque d'humidification et à maintenir le bois hors des conditions physiques de biodégradation.

Le traitement chimique doit être considérée comme une solution de dernier recours permettant de conférer si nécessaire une plus grande durabilité au matériau. Il doit être choisi en fonction du risque d'humidification, qui définit les classes d'emploi, et de la durée de vie attendue du produit ou de l'ouvrage en bois.

Les législations européenne et française, de plus en plus sévères, contrôlent l'utilisation des biocides. Cependant, malgré le principe de précaution, il ne faut pas céder à la diabolisation de la chimie. Dans le cadre d'une démarche environnementale globale, un traitement préventif de préservation du bois, dans le respect des réglementations et des exigences techniques, peut rendre l'écobilan d'un produit ou d'un ouvrage en bois encore plus favorable :

- élimination des risques (un traitement préventif permet d'éviter les traitements curatifs plus difficiles, plus chers et plus polluants)

- utilisation d'essences locales

- augmentation des performances à l'usage et des durées de service

La limitation des impacts d'un produit ou d'un ouvrage sur l'environnement n'est pas une démarche simpliste qui interdit l'utilisation du bois traité. Même traité, le bois reste souvent le meilleur choix.

Les propriétés physiques et mécaniques du bois

Jean-Louis CHAZELAS

Le bois dans la plante

Plus qu'un matériau naturel, le bois est avant tout le matériau constitutif de la tige d'une plante ; l'arbre. Sa constitution doit donc répondre à ses fonctions dans l'arbre :

- il est l'interface entre le sol et le système de photosynthèse dans les feuilles : il doit donc y avoir des canaux de circulation fluide
- il doit porter offrir une résistance à la compression pour supporter le poids de la couronne et une résistance à la flexion pour résister à la prise au vent de cette couronne, et ce quelle que soit la direction du vent,
- il doit se protéger des agressions extérieures comme tous les être vivants, d'où son enveloppe d'écorce,
- son organisation s'explique enfin par la vie de cette être vivant, organisation qui doit permettre à l'arbre de pousser.

On notera que le tronc d'arbre, s'il est très sollicité en flexion n'est que très peu sollicité par des forces horizontales perpendiculaire au tronc: le bois n'a donc pas besoin d'être très résistant aux forces transversales au tronc.

Structure et micro-structure

L'unité de base du bois est bien sûr celui de toutes les plantes : la cellule.

Chaque année l'arbre ajoute une couche de bois qui forme un cerne d'accroissement annuel. Les arbres croissent donc par l'extérieur. Juste sous l'écorce se trouve une couche de cellules - le cambium - que se divise vers l'intérieur pour donner le bois proprement dit et vers l'extérieur pour générer le liber - bois plus poreux et plus chargé en sels qui est la base de l'écorce. De cette manière l'arbre a toujours sa protection contre les agressions de l'environnement : l'écorce.

Le bois juvénile près du cœur est un bois de moindre qualité car ses cellules sont plus courtes et moins bien structurées que celle du bois adulte. Une coupe horizontale du tronc fait également apparaître l'alternance annuelle du bois de printemps et du bois

d'été. Leur importance relative est caractéristique de chaque essence. On distingue également la zone d'aubier du reste de la section. L'aubier est le bois des 5 à 6 dernières années en moyenne au sein duquel circulent les sèves et les produits élaborés entre le sol et la couronne. C'est un bois très riche en produits sucrés qu'apprécient les insectes xylophages.

Anisotropie et hétérogénéité

A l'échelle microscopique on distingue bien la structuration cellulaire ; les cellules sont presque toutes orientées parallèlement à la verticale du tronc, notée L pour longitudinale. Les cellules forment comme une série de tuyaux parallèles avec une alternance de couches peu denses au printemps et très dense en été. La direction de cette alternance est la direction radiale R.

La direction T, tangentielle aux cernes d'accroissement annuel, forme avec la direction L et R définies précédemment un trièdre local d'orthotropie. Cette structure explique parfaitement pourquoi la résistance du bois n'est pas la même dans chacune de ces directions, les directions R et T étant relativement proches en termes de résistance.

En augmentant encore l'agrandissement on constate que la structure des cellules elles même est constituée de couches de fibres de cellulose agglomérées dans une « colle » l'hémicellulose. Les couches forment un système à plis croisés, les fibres de la couche principale étant organisées selon une structure hélicoïdale quasiment verticale. Ceci explique à la fois la résistance à la traction des cellules du bois et leur souplesse en flexion.

Quelques valeurs de propriétés mécaniques du bois parfait (tableau suivant) traduisent bien les tendances annoncées par l'observation de la micro-structure du bois et la notion de matériau anisotrope.

	Densité kg/m ³	Traction Longitudinale MPa	Traction transversale MPa	Compression longitudinale MPa	Compression transversale MPa	Flexion MPa
Un résineux Le pin sylvestre	450	100 à 120	1,8	40 à 50	7 à 8	80 à 90
Un feuillu Le chêne	650	120 à 150	4	50 à 80	18 à 20	100 à 170

Le bois est aussi un matériau hétérogène. Cette hétérogénéité se manifeste à divers titres :

- L'alternance de bois d'été et de bois de printemps : pour les bois à fort accroissement annuel cela peut avoir des conséquences sur la résistance des petites sections qui pourraient ne contenir que du bois de printemps peu résistant.
- Pour les pièces de charpentes de forte section, les directions de symétrie du repère d'orthotropie ne sont pas homogènes dans la section.
- Les noeuds introduisent encore une autre forme d'hétérogénéité. Localement il constitue une zone de bois juvénile dont les cellules sont orientées quasi perpendiculairement à celle du bois environnant. Il crée également un dévoiement des couches annuelles, Plus

généralement les noeuds constituent une amorce de rupture dont il est souhaitable de tenir compte pour utiliser la pièce.

- Il y a encore d'autres hétérogénéités plus ou moins liées à des accidents de la vie de l'arbre : poches de résine, roulures dues au vent, gélivures dues au gel, etc.

Toutes ces hétérogénéités du bois font que les propriétés d'usage des bois de charpente sont inférieures à celle du bois parfait et que ces propriétés sont acquises par une analyse statistique sur un nombre d'essais non négligeables sur des pièces de grandes dimensions.

Après l'anisotropie et l'hétérogénéité qui viennent de l'organisation structurelle du bois, il convient de mentionner les interactions du bois avec son environnement, au premier rang duquel vient l'eau.

Le bois et l'eau

Les matériaux de constitution du bois - cellulose principalement - sont hydrophiles. Le bois se met donc en permanence en équilibre avec le taux d'humidité de l'air et cet équilibre dépend de la température. La paroi des cellules se dilate et se rétracte au gré des variations hydriques ce qui explique que la rétractabilité se passe principalement dans le plan radial - tangentiel. De plus comme le retrait n'est pas totalement irréversible, il en résulte un retrait cumulé dans le temps. La rétractabilité tangentielle étant généralement supérieure à la rétractabilité radiale, les pièces sciées dosse et sur faux quartier se déforment plus (tuilage ou section en losange) que les pièces sciées sur vrai quartier qui restent rectangulaires. Le retrait - gonflement étant inéluctable, il convient de le gérer notamment lorsqu'on veut une large surface continue (panneaux antibruit par exemple).

Le bois est également un excellent support de croissance pour les organismes qui recyclent la matière vivante telle que les champignons et moisissures. Ces organismes ont besoin d'eau en permanence, d'humidité et d'air c'est pourquoi les pièces de bois qui reçoivent accidentellement ou rarement d'eau et peuvent sécher facilement n'ont rien à craindre de ce problème. En revanche, si le bois est souvent mouillé et qu'il y a un risque de stagnation, ou surtout lorsqu'il est en contact de l'eau et surtout au contact du sol qu'il faut très soigneusement choisir son bois. Les bois et les traitements du bois sont classés par rapport à quatre classes qui traduisent le risque d'attaque par les champignons et les moisissures.

Le bois et le feu

Les composants essentiels de l'air - azote, oxygène, CO_2 ont une action quasiment négligeable sur le bois. Peut-être y aura-t-il un grisaillement très lent de la couche de surface mais c'est plus l'action de la lumière que l'action de l'air. Il n'y a de risque que dans l'oxydation rapide c'est-à-dire le feu.

Matériau organique, le bois est un combustible. L'inflammabilité se fait par évaporation de fractions volatiles avec l'échauffement de l'environnement puis inflammation de ces composés qui entretiennent l'élévation de la température. De par sa structure microscopique, le bois se comporte comme un isolant. De ce fait, dans l'environnement très chaud d'un incendie, la température à l'intérieur du bois décroît très rapidement. De ce fait seules les couches externes sont attaquées et l'intérieur de la pièce de charpente conserve ses caractéristiques : les structures bois se consomment mais restent stables au feu très longtemps, contrairement à d'autres matériaux de construction.

Le bois et la lumière

La lumière solaire comporte des ultra-violets qui arrivent à casser les molécules de cellulose faisant perdre aux cellules de surface leur résistance mécanique et leur couleur originale. On ne peut garder cette couleur intégralement : il faut soit accepter le grisaillement de la surface soit passer des lasures en les renouvelant souvent soit peindre le bois, ce qui lui fait perdre son aspect initial.

Connexions bois-béton pour les tabliers d'ouvrages d'art Robert LE ROY

Le LCPC a inscrit pour la seconde fois dans son contrat quadriennal le développement de recherches sur les structures utilisant le minimum de matériaux non renouvelables. Les recherches menées au LAMI, unité mixte LCPC-ENPC, sur les ouvrages d'art, se situent dans cette démarche. Les conceptions de ponts dont le matériau principal est le bois y sont étudiées.

Deux thèses sont en cours sur les ponts en bois. La première (Pham 2004-2007) porte sur les ponts mixtes bois-béton, la seconde (Nguyen 2006-2009) sur l'utilisation du bois comme matériau d'âme de ponts hybrides (multi-matériaux).

Les études présentées ici visent à améliorer la performance mécanique des tabliers mixtes (thèse de Pham). Plus précisément, la recherche porte sur l'évaluation de la rigidité des systèmes de connexion entre la dalle béton et les poutres en bois lamellé collé et sur la variation de la résistance en flexion en fonction de cette rigidité. Etant donnée la grande performance des bétons fibrés ultra performants, le principe de liaison de dalles minces en BFUP à des poutres en bois a été exploré.

Théories sur les interfaces imparfaites

Lorsqu'il y a adhérence parfaite entre 2 couches de matériaux différents d'une structure mixte, la RdM permet de prévoir sa rigidité en calculant l'inertie équivalente fonction des modules respectifs des 2 matériaux. Dans le cas des connexions en bois, l'interface n'est pas mécaniquement parfaite puisqu'on y constate un glissement générateur d'une souplesse structurelle. Newmark (1951) proposa la résolution de ce problème en faisant l'hypothèse que le glissement à l'interface est proportionnel à l'effort de cisaillement et inversement proportionnel à un coefficient K. L'eurocode 5 reprend une version simplifiée de la théorie de Newmark et propose une formule analytique pour le calcul de la raideur équivalente (EI_{eq}) des poutres mixtes, dans laquelle intervient une raideur K, proportionnel à K précédent.

Etude des différentes familles de connecteurs

Un ensemble de connecteurs couvrant la plupart des familles est d'abord étudiée pour des poutrelles de 1 m de longueur composées d'une partie en béton de haute résistance connecté à une poutrelle en bois GL28. Les modes de fonctionnement de chaque type et les différents modes de rupture sont identifiés.

Les connecteurs locaux, réalisés par des tiges ou des tubes ancrés par collage dans le bois présentent une raideur K inférieure à 200 MN/m/m. Cette relative souplesse contribue à augmenter la flèche en moyenne de 50% par rapport à au système parfaitement connecté. La famille des connecteurs linéiques est quant à elle composée de métal déployé, de ruban perforé ou de plaques à pointes. Les 2 premiers sont collés à l'époxy dans une rainure du bois, alors que les plaques à pointes sont clouées directement dans le bois. La raideur de cette famille de connecteurs est comprise entre 200 et 1200 MN/m/m.

Les charges à rupture des 2 familles sont en moyenne équivalentes.

Enfin, le système de connexion par collage conduit à une rigidité proche de la connexion parfaite ($K > 1500 \text{ MN/m/m}$), tout en offrant la résistance ultime supérieure d'au moins 20% à celles des systèmes précédents.

Des études complémentaires ont été menées sur le collage de BFUP sur le bois. Le BFUP utilisé est le BSI® CERACEM. La colle est la SIKADUR 30, de type époxydique. Le traitement de surface par ponçage a pu être validé. Le traitement par sablage est en cours d'étude. Le comportement proche de la connexion parfaite est retrouvé. Les corps d'épreuve ont supporté une charge de 100 kN, ce qui correspond à une contrainte de cisaillement maximale dans le plan de colle de 4,3 MPa. On montre par calcul que la contrainte maximale dans le bois est diminué de manière significative dans le cas du collage par rapport aux autres solutions, ce qui apporte une sécurité supplémentaire aux états limites ultimes, ou permet une diminution de matière.

La suite de l'étude porte sur le comportement en fatigue d'une structure mixte de 3 m de portée réalisée en CERACEM et bois GL 28. Les premiers résultats sont très prometteurs, car la rupture n'apparaît pas à l'interface.

La commande d'un ouvrage en bois

Pierre CORFDIR

Le programme de l'ouvrage

Le maître d'ouvrage doit définir les données du franchissement (nature du sol, brèche franchie, sismicité...), et le profil en travers souhaité pour son ouvrage.

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). En général, pour un pont routier, on retient une durée de 100 ans et pour une passerelle, une durée de 50 ans. Pour les bardages et les platelages, on peut retenir une durée de 25 ans.

Les charges routières et piétonnes à prendre en considération, ainsi que les actions du vent sont définies dans la norme NF EN 1991.

Le maître d'ouvrage doit définir la température et l'humidité de l'air, dans lesquelles l'ouvrage doit vivre, car le bois doit être livré de manière à ce que son équilibre hygroscopique soit compatible avec son environnement.

Le maître d'ouvrage peut également exiger des essences et des dispositions constructives (toit, général, bardage) qui évitent les traitements chimiques de préservation des bois.

Les dix commandements du bien construire en bois

1- Prévoir un toit général et/ou des protections des éléments par bardage ou par une dalle étanche

2- Protéger de l'eau l'extrémité des bois afin d'éviter l'infiltration dans les fibres du bois.

3- Favoriser l'évacuation rapide de l'eau pour que le bois sèche rapidement après une averse (pente longitudinale ou transversale en évitant tout piège à eau, notamment aux jonctions d'éléments).

4- Adopter un rapport hauteur/largeur d'une poutre toujours inférieur à cinq, sinon les poutres risquent de se cintrer.

5- Penser à prévoir à la jonction de deux éléments des dispositions permettant une bonne ventilation des pièces.

6- Prévoir un rainurage des platelages, sinon le bois est glissant par temps de pluie.

7- Prévoir une revanche de 60 cm au-dessus du gabarit des voies circulées pour les passerelles, qui sont des éléments très légers.

8- Penser à prescrire des bois provenant des forêts gérées durablement (label FSC, PEFC...).

9- S'entourer d'un maître d'oeuvre expérimenté dans le domaine des ponts en bois.

10- Maîtriser l'humidité de mise en oeuvre du bois (humidité en service moins 1 point)

Suivi de l'ouvrage

L'entretien d'un pont ou d'une passerelle en bois est essentiel pour sa bonne durabilité. En particulier, il convient de programmer régulièrement tous les 3 à 6 ans une visite de l'ouvrage, qui portera sur l'état des différentes parties (platelage, poutre, couches de finition et organes d'assemblages). En particulier, un contrôle de l'humidité du bois s'impose.

Quelques documents de références

- Eurocodes 5 : Calcul des structures en bois.
- Guide SETRA "Les ponts en bois : comment assurer leur durabilité ?".

Exemples de ponts et passerelles

Jean-Yves JOINEAU

En 2006, une enquête auprès d'un certain nombre de gestionnaires d'infrastructures routières a été conduite afin de réaliser un recensement de leur patrimoine d'ouvrages d'art tout ou partie en bois. A partir de ces données un fascicule intitulé « Panorama de 15 ouvrages d'Art en bois exemplaires en France » a été publié par le CETE de l'Est.

L'objectif de ce document est de découvrir quelques ouvrages remarquables par leurs mises en oeuvre, leurs intégrations et leurs dispositions constructives.

L'intervention « exemples de ponts et passerelles » reprend partiellement ce document en présentant quelques ouvrages représentatifs, avec par exemple :

- passerelle haubanée à Oye et Pallet (25),
- passerelle en arc de Clauzel (07),
- passerelle à béquilles de Preuilly (89),
- pont sur la Drôme à Crest (26)
- pont couvert des Fayettes (38)

En outre, des ouvrages dans des sites particulièrement difficiles sont présentés :

- passerelle d'Ajoux en Ardèche (07)

- passerelle de Vagney dans les Vosges (88).

Quelques ouvrages routiers étrangers sont ensuite sommairement présentés. En particulier un pont en arc en Suisse et deux ponts en treillis en Norvège témoignent des possibilités de réalisation d'ouvrages de grand franchissement.

Fruit de ce recueil, un site internet est en cours de réalisation (<http://pontsenbois.neuf.fr>).

Ce site précise les caractéristiques matériau et ses propriétés avec la construction d'ouvrages. En outre, il comporte une présentation des différents ouvrages et l'ensemble des informations collectées lors du recensement auprès des gestionnaires.

Cette présentation d'ouvrages remarquables doit permettre de sensibiliser les maîtres d'ouvrage aux possibilités offertes par le matériau bois en terme de comportement mécanique, de facilité d'emploi et de mise en oeuvre et doit encourager ceux-ci à étudier pour les ouvrages de génie civil la possibilité de cette troisième voie.

Le pont sur la Dore

Dominique CALVI

Le pont sur la Dore, situé à St Gervais sous Meymont (63) et dont le maître d'ouvrage est le Conseil Général du Puy de Dôme a été mis en circulation en Août 1994.

Les manifestations régionales

L'ouvrage

L'ouvrage en bois est un pont couvert :

- de portée 33.26 m
- de gabarit routier 4.85 m
- comportant 2 voies de 3.00 m (pont de 2ème classe)
- comportant 2 trottoirs de 1.05 m en encorbellement

La structure principale est constituée de :

- 2 poutres treillis Warren latérales
- 2 profilés HEB 600 renforcés suspendus aux 2 nœuds intermédiaires des poutres Warren, servant de supports intermédiaires aux longerons bois LC
- 4 longerons BLC
- poutres de pont en BLC, servant aussi de support des trottoirs en encorbellement
- tablier en chêne formé de solives et de platelage épais

La stabilité est assurée par :

- 2 treillis horizontaux entre les membrures hautes et entre les membrures basses
- la membrane sous toiture avec voligeage oblique
- des portiques transversaux ramenant les efforts à leurs pieds

La durabilité de l'ouvrage

La durabilité est assurée par 5 familles de dispositions :

- la couverture
- des essences adaptées
- la protection locale des parties fragiles exposées
- des assemblages ventilés rejetant l'eau
- des éléments remplaçables (trottoir)

Dans ces conditions, on peut effectivement considérer une durée de vie intentionnelle de 100 ans.

