

Les ponts en bois : points de repère sur un matériau mal connu.

Jacques BERTHELLEMY

SÉTRA / CTOA

Vincent BARBIER,

Groupe Ouvrages d'Art,

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nancy

1. Introduction

1.1 Une méconnaissance du bois

Actuellement en France, peu de références sur les ouvrages en bois sont disponibles, mis à part au niveau de la réglementation de calcul, l'eurocode 5, qui s'est doté d'une partie spécifique sur les ponts.

En outre, la plupart des ouvrages réalisés à partir des années 1970 en France présentent des problèmes de dégradation prématurée. La durée de vie des ouvrages récents est trop souvent inférieure à vingt ans, alors que certains ouvrages anciens se comportent bien : le pont de Lucerne, en Suisse, avec plus de six siècles de service avant son incendie accidentel en 1993, en est un exemple notoire. Cette dispersion importante de la durée de vie des ouvrages en bois s'explique par la perte actuelle de compétence sur le matériau. 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 ressources d'entretien que le bois, jugé trop contraignant par les maîtres d'ouvrage. Au 20^e siècle, avec le développement 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. Or, la pérennité des ouvrages repose essentiellement sur le choix de bonnes dispositions constructives et sur la qualité de l'entretien.



Photo 1 : passerelle de Blagnac mettant en œuvre le bois (Photo DDE 31)

1.2 Un fort potentiel de développement

Pourtant, le bois est un matériau qui revient à la mode pour son aspect chaleureux et pour des raisons environnementales. Le bois permet en particulier de stocker du dioxyde de carbone, principal agent de détérioration de la couche d'ozone. À ce sujet, la mise en application concrète des accords de Kyoto (1997) se traduit par une charte nationale visant à augmenter la part du bois dans la construction.

Par ailleurs les ouvrages en bois sont légers et faciles à monter, ce qui est très appréciable quand la gêne occasionnée aux voies franchies doit être réduite le plus possible. La passerelle de Vaires-sur-Marne, montée récemment la nuit d'une seule pièce, en quelques heures, en est le plus brillant exemple. Les ouvrages d'art en bois, en particulier les ponts piétons, possèdent ainsi un fort potentiel de développement.



Photo 2 : passerelle de Vaires-sur-Marne conçue par SNCF Ingénierie – Bernard Rey architecte.
(photo Olivier Thomas)

1.3 Un guide pour la conception et la prescription

Dans cette optique de développement de l'emploi du bois, un guide technique sur les ouvrages en bois va prochainement être édité par le SETRA. L'objectif avoué de ce guide est de donner aux maîtres d'ouvrages des éléments leur permettant d'appréhender correctement la conception et la prescription d'ouvrages d'Art en bois.

Le guide s'organise en cinq parties principales. La première partie présente un historique sur les ponts en bois mettant en exergue l'importance des détails de conception dans la durabilité de ce type d'ouvrage. Les notions fondamentales liées au comportement mécanique et physique du bois sont ensuite développées dans une seconde partie assez théorique. Un chapitre traite ensuite 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 de la prescription réussie sont jetées dans la dernière partie.

2. Bref regard sur le passé

En Europe, le bois a été utilisé depuis l'antiquité pour le franchissement de rivière. Les grumes posées à plat et recouvertes d'un platelage formaient les premiers ponts en bois, mais les portées étaient limitées à une dizaine de mètre. Pour augmenter les longueurs de franchissement, les militaires ont rapidement utilisé des barges flottantes en guise d'appui intermédiaire.

Les romains ont développé de nouvelles structures plus complexes avec des assemblages, notamment les ponts à béquilles, à poutres et en arc. Parmi ce dernier type, on peut citer le pont de Trajan sur le Danube datant de 103 et franchissant 1100m par portées successives de 35m.

A partir du Moyen Age, les constructeurs prennent conscience que la pourriture est l'ennemi majeur du bois, et que celle-ci peut être évitée en conservant le matériau 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 datant de 1333 (photo 2).



Photo 3: pont de la Chapelle à Lucerne, construit en 1333

Au cours des siècles, certaines parties ont été reconstruites, et en 1993 une grande partie de l'ouvrage a été détruite par le feu. Il a été reconstruit à l'identique en 1994.

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 XIX^{ème} siècle.

Dans les années 1970, certaines passerelles ont été construites en bois, notamment en bois lamellé collé. La perte de connaissance sur le matériau du à sa désuétude depuis plus d'un siècle a conduit à l'oubli des règles essentielles de conception assurant la durabilité de ces ouvrages. De nombreuses pathologies ont donc été détectées sur ce type d'ouvrages.

3. Le bois, un matériau complexe

Le bois est un matériau naturel, qui n'est pas façonné par l'homme comme l'acier ou le béton. Cela induit des hétérogénéités notoires dans les comportements mécaniques et physiques.

3.1 Un comportement mécanique orthotrope

Contrairement à l'acier ou au béton, le bois n'a pas les mêmes propriétés mécaniques dans tous ses plans.

Pour le bois, le repère le plus adapté est le repère cylindrique (figure 1), qui se rapproche quasiment parfaitement de la grume. On définit le sens axial, sens de la hauteur de l'arbre, le sens radial et le sens tangentiel.

Les performances mécaniques sont très bonnes dans le sens longitudinal, mais relativement faible dans le sens transversal. A titre d'exemple, la limite de rupture moyenne du chêne dans le sens longitudinal en flexion est de l'ordre de 100 à 150MPa tandis qu'elle est limitée à 3 à 4MPa dans le sens transversal°!



A : Coupe schématique d'un billot de bois.

B : coupe transversale (plan RT) d'un tronc de chêne

Les performances mécaniques sont très fortement liées au sens de sollicitation

(CNDB)

Figure 1

Outre ses particularités d'anisotropie, le bois présentent des hétérogénéités notoires qui viennent singulièrement affaiblir les performances mécaniques. L'exemple le plus parlant est la présence de nœud, qui viennent augmenter localement la densité mais aussi diminuer la résistance mécanique du bois en traction.

3.2 Les phénomènes de retrait gonflement du bois

Une autre caractéristique du bois est son "travail", qui correspond à ses variations dimensionnelles dues à la modification de la teneur en eau du matériau.

L'eau est présente dans le bois sous trois formes: l'eau de constitution, l'eau liée et l'eau libre. L'eau libre est l'eau qui circule à l'intérieur des vaisseaux du bois. L'eau liée est l'eau qui est prisonnière entre les chaînes de celluloses. L'humidité du bois est un facteur primordial pour le bois. Il est défini comme le rapport entre la masse d'eau et la masse de bois sec.

Après son abattage, le bois contient un maximum d'eau liée et une quantité d'eau libre importante. Le bois sèche ensuite par évaporation de l'intégralité de son eau libre et d'une partie d'eau liée, jusqu'à être en équilibre hygroscopique avec le milieu dans lequel le bois se situe. Pour un bois en extérieur abrité, la carte ci-dessous (figure 2) indique les valeurs d'humidité du bois en fonction de la saison.

L'anisotropie du bois n'est pas seulement mécanique: les variations dimensionnelles engendrées par le départ ou l'arrivée d'eau liée n'ont pas la même ampleur dans les trois directions. Ces variations sont quasiment nulles dans le sens longitudinal et deux fois plus importante dans le sens tangentiel que dans le sens radial. Ceci induit des déformations en tuile des sections transversales en particulier sur les dosses (débits aux extrémités de la grumes).



Les variations dimensionnelles du bois sont à prendre en compte dès la conception pour laisser la place au bois de travailler sans exercer de contraintes trop importantes et non prévues au calcul.

Figure 2: Carte de France indiquant les valeurs de l'humidité du bois à l'extérieur abrité une fois l'équilibre atteint.

3.3 Les agresseurs biologiques du bois et les propriétés naturelles de "défenses" des essences

Une autre caractéristique spécifique au bois est qu'il est sujet à des agresseurs particuliers: les champignons, à l'origine de la pourriture et certains insectes. Certaines essences sont plus ou moins armées pour se défendre efficacement: c'est ainsi que le chêne pourra être utilisé en extérieur, où les conditions d'agressions sont maximales, tandis que le sapin devra être au maximum être abrité pour éviter des dégradations rapides.

A ce sujet, la norme NF EN 335 définit 5 classes d'emploi du bois (de 1-plus favorable à 5-plus défavorable). Les normes NF EN 351 et 460 permettent quant à elles de déterminer pour chaque classe d'emploi les essences qu'il est possible d'utiliser. Le choix d'une essence est un point essentiel dictant la durabilité future d'un ouvrage.

Classes	Situation en service	Exemples	Zone sensible	Risques biologiques
1	Bois sec, humidité toujours inférieure à 20%	Menuiseries intérieures	2mm de profondeur	- insectes - termites
2	Bois sec, dont l'humidité peut occasionnellement dépasser 20%	Charpente	2mm de profondeur	- insectes - termites - champignons de surface
3	Bois dont l'humidité est fréquemment supérieure à 20%	Constructions extérieures verticales : bardages, fenêtres...	Toute la partie humidifiable de la zone non durable naturellement	- pourriture - insectes - termites
4	Bois dont l'humidité est toujours supérieure à 20%	Bois extérieurs horizontaux (balcons...) et en contact avec le sol	Toute la zone non durable naturellement	- pourriture - insectes - termites
5	Bois en contact permanent avec l' eau de mer	Pontons, ...	Toute la zone non durable naturellement	- pourriture - insectes - Térébrants marins

Tableau I: Définition des classes d'emploi selon la norme NF EN 335.

3.4 Les bois traités: attention, danger

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

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

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

Le bois non traité est un matériau naturel et écologique, mais l'adjonction de produits chimiques de préservation peut rendre caduques ces propriétés. En particulier, ces produits posent des problèmes de santé et d'environnement. On retiendra notamment:

- Vis à vis de la santé, l'emploi des produits, l'usinage des bois ou le contact cutané prolongé sont des sources de risques de cancers.
- Vis à vis de l'environnement, le bois ainsi traités peuvent être classés comme déchets dangereux, ce qui rend leur fin de vie très délicate (incinération dans des centres spéciaux).

Certains produits de préservation chimique sont aujourd'hui interdits (aldrine, PCP), d'autres sont d'un usage limité (CCA, créosote). Une directive européenne prévoit de tester les produits sur des plans de toxicité et d'écotoxicité en vue de retirer du marché les produits présentant des risques trop élevés.

En tout état de cause, l'emploi de ces produits chimiques est actuellement à déconseiller, en raison des risques qu'ils engendrent (des évolutions concernant les produits chimiques de préservation sont en cours pour réduire l'impact sur l'environnement et sur la santé) et en raison de solutions de substitution: il est possible d'utiliser des essences naturellement durables et d'améliorer la conception de l'ouvrage, moyennant un surcoût.

4. Les règles d'or pour un minimum de durabilité

Pour obtenir une durabilité suffisante des ouvrages, le principe de base est de conserver le bois sec, c'est à dire en dessous de 20% d'humidité. En effet, dans ces conditions le risque de pourriture est annulé. Il est à souligner que cette humidité n'est pas dépassée en France métropolitaine à l'extérieur abrité (voir figure 2), hormis localement en hiver, ce qui n'est pas rédhibitoire pour la durabilité du bois.

Les corollaires sont alors d'éviter au maximum les venues d'eau, d'évacuer l'eau et de ventiler correctement le bois.

Parmi le panel de dispositions constructives qu'il convient de respecter, nous ne présentons ici que les protections globales de la structure, à savoir la toiture et le bardage.

4.1 Les ponts couverts

La solution la plus simple et la plus efficace pour protéger le bois est de couvrir le pont. Le bois de structure est ainsi à l'abri des intempéries. De nombreux ouvrages anciens témoignent de la qualité de cette disposition constructive, comme le pont ci contre dans la région de Davos en Suisse (photo 3).



Photo 4: Pont en Suisse.

4.2 Le bardage de la structure

Une autre solution consiste à protéger le bois de structure par un bardage. L'ouvrage de la photo 4 est basé sur deux arcs en lamellé collé d'épicéa (Fichte). L'essence n'étant pas suffisamment durable naturellement et au lieu d'administrer un traitement chimique de préservation, les concepteurs ont choisi de couvrir l'arc par une couverture en cuivre et un bardage en mélèze (Lärche) .



Photo 5 : pont de Scuols (Suisse) en arc bardé avec du mélèze

5. Exemples de ponts récents

Les trois exemples suivants témoignent des différentes formes de structures qu'il est possible de réaliser en utilisant du bois. La conception de ces ouvrages privilégie la durabilité naturelle du bois en le protégeant au maximum des intempéries.

5.1 Pont sur la Dore à Saint Gervais sous Meymont (63)



Le pont sur la Dore à Saint-Gervais-sous-Meymont construit en 1994 est le premier pont en bois sans limitation de charge, de classe routière II en France. Il a bénéficié du label IVOR (innovations validées sur ouvrages de référence) en 1996.

La structure principale est composée d'un treillis formé par des poutres en lamellé collé en pin sylvestre. Le platelage en chêne est suspendu aux nœuds de la charpente principale.

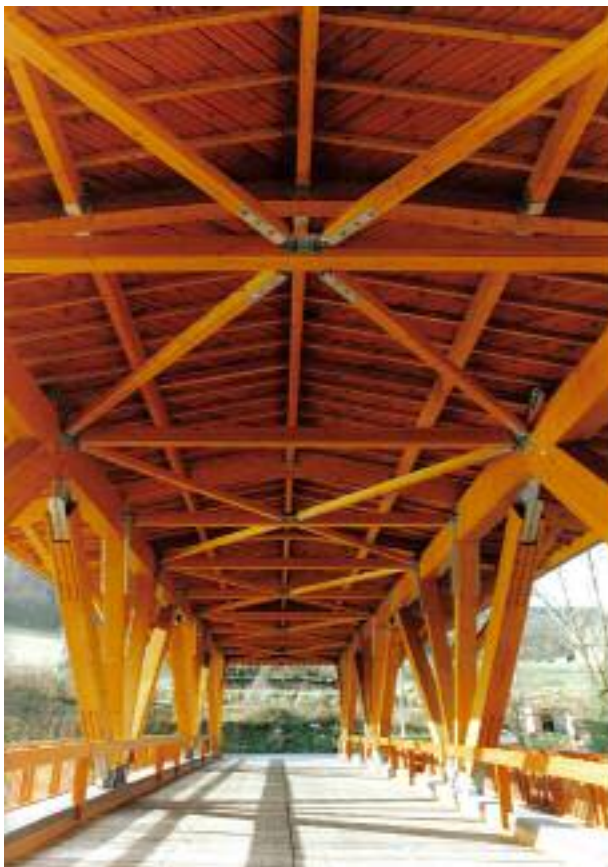


Photo 6: Vue générale du pont sur la Dore, de 33m de portée La structure est un treillis en bois sur laquelle est fixé un platelage en chêne.

La hauteur du gabarit est de 4.70m et la largeur 6.00m. La portée de l'ouvrage est de 33.25m avec un élancement général de l'ouvrage faible (environ 1/7^{ème}) mais la structure est très lumineuse.

Chacune des poutres principales est formée de deux éléments en lamellé collé de 185x528mm. Les diagonales sont formées par deux poutres BLC 185x363mm. Les poteaux sont des poutres BLC 200x363mm. Les assemblages sont boulonnés, avec des tiges filetées insérées et collées dans les poutres en bois.

La couverture générale de l'ouvrage le protège des intempéries et confère ainsi à l'ouvrage un fort potentiel de durabilité.

5.2 Passerelle Pinot à Blagnac (31)

La passerelle PINOT à BLAGNAC d'une portée de 36m a été réalisée en 1998 sous maîtrise d'œuvre DDE 31.



Photo 7: Vue intérieure de la passerelle Pinot, de 36m de portée. Les arcs sont en bois, les tirants et suspentes en acier et la dalle en béton.

Cet ouvrage multi-matériaux est composé d'une structure principale en arc auto-ancré en bois, d'une dalle en béton armé, de poutre-tirant, de pièces de pont, ainsi que de suspentes en acier, et d'une couverture en polyméthacrylate de méthyle, qui sert à protéger le bois des venues d'eau.

Les arcs ont une section constante de 324mm x 627mm, soit un "élancement" de $1/57^{\text{ème}}$. La dalle non collaborante est réalisée en panneaux préfabriqués en béton armé de 14cm d'épaisseur.

Dans cet exemple, les poutres en arc sont protégées des intempéries par le toit en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) qui assure la durabilité des bois porteurs.

L'essence retenue est le pin sylvestre. Le bois lamellé collé utilisé pour la fabrication des arcs à une contrainte caractéristique en flexion retenue au niveau des calculs de 24MPa.

5.3 Pont à Innenferrera (Suisse)

Le pont en arc à Innenferrera en Suisse construit en 1998 est un pont mixte bois béton. L'ouvrage de 60m de longueur est constitué de 4 arcs principaux en lamellé collé d'une portée de 45m. La dalle collaborante est formée par des prédalles de 6cm d'épaisseur et de béton coulé en place de 16cm d'épaisseur. Les essences utilisées sont du mélèze pour les arcs et de l'épicéa pour le reste.

Les arcs en bois sont ici protégés des intempéries par la dalle en béton armé, plus large et bien étanchéifiée.

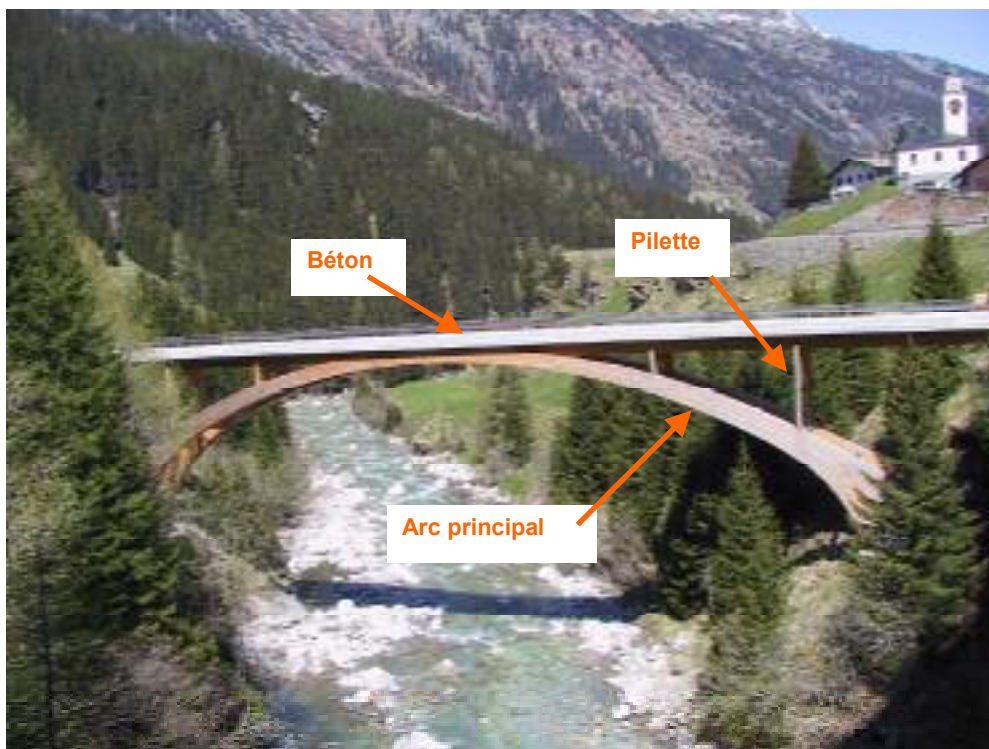


Photo 8: Pont en arc à Innenferrera construit en 1998, de 60m de longueur. Ce pont allie le bois (arcs) et le béton (dalle), connectés entre eux mécaniquement.

6. Ce qu'il faut retenir pour la prescription

Pour commander un ouvrage en bois, plusieurs points sont à définir précisément. La méthode de protection générale de l'ouvrage, des exigences sur l'évacuation des eaux et la ventilation du bois, un choix judicieux des essences sont les points clés à préciser obligatoirement pour se prémunir d'erreurs grossières. Le matériau bois demande un soin tout particulier pour son emploi pour assurer une durabilité suffisante. Le concepteur et le prescripteur sauront efficacement se rapprocher des professionnels de la filière bois pour aboutir à un ouvrage pérenne.

7. Conclusion

Le bois est un matériau renouvelable aux performances mécaniques relativement bonnes, son utilisation pour les ponts piétonniers et routiers mérite donc d'être développée progressivement tout en sachant rester vigilant aux spécificités de ce matériau. En particulier, la durabilité peut être tout à fait correcte à condition de prendre les mesures nécessaires pour préserver le bois des attaques fongiques.

8. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes ayant contribué à l'élaboration du guide technique, et notamment Pierre Corfdir, Jean-Louis Chazelas, Dominique Calvi, Robert Leroy, Stella Becker, Jérôme Laplane, Serge Lenevé.