

Pathologie des structures en bois

par **Jean-Pierre BIGER**

*Ingénieur de l'École supérieure du bois
Spécialiste en structures bois au Bureau Veritas*

1. Introduction.....	C 2 450 - 2
2. Charpentes traditionnelles.....	— 2
2.1 Déformations de toitures.....	— 2
2.2 Déformation et fissuration de solive.....	— 2
2.3 Ruptures différées dues aux défauts du bois.....	— 3
2.4 Rupture d'assemblage.....	— 4
2.5 Dégradations d'origine biologique.....	— 4
3. Charpentes légères.....	— 6
3.1 Flambement de fermettes.....	— 6
3.2 Décalage d'appuis de poutrelles.....	— 7
3.3 Déversement de portique.....	— 8
3.4 Instabilités de maisons à ossature bois.....	— 8
4. Charpentes en lamellé-collé.....	— 9
4.1 Autocintrage de reins de portiques.....	— 9
4.2 Fissuration de poutres courbes.....	— 9
4.3 Autres cas de fissuration.....	— 10
4.4 Charges hydrostatiques.....	— 10
4.5 Assemblages.....	— 11
4.6 Ancrages.....	— 12
4.7 Montage.....	— 13
5. Causes exceptionnelles et accidentelles.....	— 14
5.1 Chutes de neige exceptionnelles.....	— 14
5.2 Cyclones.....	— 14
5.3 Feu.....	— 15
5.4 Séisme.....	— 16
6. Conclusion.....	— 16
Pour en savoir plus.....	Doc. C 2 450

Les structures en bois ont démontré leur capacité à braver les siècles, mais ce privilège n'est pas donné à toutes. D'après les statistiques, la sinistralité des structures bois ne représente que 3 % de la sinistralité totale de la construction. Toutefois, certains cas sortant de l'ordinaire échappent à cette analyse.

Qu'il s'agisse de charpente traditionnelle, de charpente légère, ou de charpente en lamellé-collé, les erreurs de conception, de fabrication, de mise en œuvre, ou les circonstances exceptionnelles et accidentelles, sont les genres auxquels se rattachent habituellement les causes de pathologie. La pathologie des charpentes en bois trouve paradoxalement l'une de ses principales sources dans les règles de calcul et de conception elles-mêmes.

Les effets de la traction transversale, les effets d'échelle, les effets de durée de chargement, les effets du glissement des assemblages, l'effet d'autocintrage... sont sous-estimés, voire ignorés, par les Règles de calcul et de conception en vigueur depuis 1971. À ces lacunes correspond le genre inattendu des « sinistres réglementaires ».



Figure A – Halle de Méreville (Orléans)

La détection de ces anomalies a suscité la réflexion des ingénieurs, des professionnels, des scientifiques porteurs de la nouvelle approche du matériau bois développée dans le cadre européen, ce qui a permis de corriger les dispositions de construction ou de calcul défaillantes [1] [14].

Messieurs Gras et Renou de Saretec, Mainnevrey du Cabinet Cerruti, Amilhau de la SCOR, Loutrel des Établissements Renofors, Simonneau des Établissements Simonneau, Briand, Blanc, Czeszynski, Dupont, Lebeau, Le Bris, Letort, Marchand, Ménard, Sens du Bureau Veritas, ont contribué à la collecte des illustrations et des informations présentées dans le présent document. L'auteur les en remercie très vivement.

1. Sinistralité

Si certaines structures en bois ont démontré leur capacité à braver les siècles, il en est d'autres qui se sont signalées à l'attention des compagnies d'assurances avant le terme de la garantie décennale.

Le taux de sinistralité de la charpente en bois est de 3 % en nombre et de 2,5 % en coût, par rapport aux sinistres de la construction dont le coût est compris entre 5 kF et 1 MF (cf. Tableau A en [Doc. C 2 450]). À titre de comparaison, le taux de sinistralité des façades est de 12 % et celui des couvertures de 25 %.

Il s'agit en général de défaillances d'ouvrages de petites et moyennes dimensions, ou bien d'endommagements locaux affectant des ouvrages plus importants.

Les statistiques concernant les sinistres de plus de 1 MF ne sont pas établies ou ne sont pas divulguées. Ces cas de pathologie sont rares, il peut s'agir d'ouvrages de grandes dimensions, ou encore de surfaces commerciales pour lesquelles des dommages immatériels considérables s'ajoutent aux dommages matériels.

2. Charpentes traditionnelles

La sinistralité de la charpente traditionnelle représente environ les 2/3 de la sinistralité de la charpente en bois. Les déformations de toitures, les déformations de planchers, les ruptures de pièces de charpentes, les fissurations et les ruptures d'assemblages, les attaques de champignons ou d'insectes, en constituent les traits principaux.

2.1 Déformations de toitures

La déformation de toiture de la figure 1a est presque imperceptible, les rangées de tuiles sont légèrement incurvées vers le bas des versants. Il ne s'agit pas d'un endommagement. Cette toiture permet cependant d'illustrer un défaut de conception ou d'exécution assez répandu pouvant occasionner des sinistres.

La charpente qui supporte cette toiture se compose très normalement de chevrons et de pannes supportées par les pignons et une ferme centrale.

Une partie de la charge des versants descend, par compression des chevrons, vers la sablière, et passe à la maçonnerie. Toute faiblesse des fixations des chevrons à la sablière ou de la sablière à la maçonnerie provoque des glissements qui ont pour effets simultanés la diminution de la compression des chevrons et la sollicitation des pannes en flexion transversale (figure 1b). C'est cette flexion transversale des pannes qui incurve les rangées de tuiles.

2.2 Déformation et fissuration de solive

La solive de la figure 2a est fortement fléchie, elle est fissurée de surcroît. Il ne s'agit pas des conséquences d'un sous-dimensionnement, mais des effets combinés du fluage et du retrait transversal consécutifs à la mise en œuvre d'un bois excessivement humide.

Le fluage augmente progressivement avec le temps la déformation initiale de flexion, jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale dite de long terme (figure 2b). L'intensité du fluage dépend des conditions de température et d'humidité, et surtout de leurs variations.

Le retrait résulte de la perte d'humidité par séchage qui se produit après la mise hors d'eau de l'ouvrage et le début de la saison de

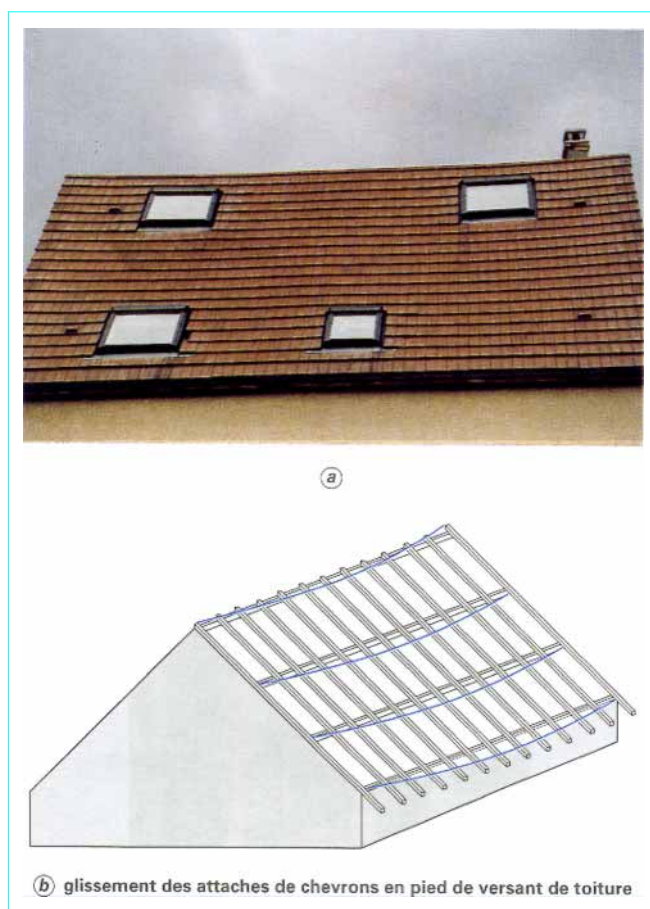


Figure 1 – Déformation de toiture

chauffe. La surface extérieure des bois sèche rapidement et se rétrécit, alors que le bois sous-jacent, qui sèche bien plus lentement, s'oppose au retrait superficiel. Des tensions superficielles perpendiculaires au fil du bois provoquent alors la fissuration radiale des bois de forte section (figure 2c).

2.3 Ruptures différées dues aux défauts du bois

Les pannes des figures 3 et 4 se sont fissurées et rompues quelques années après leur mise en œuvre. Des transferts de charges sur les éléments voisins ont évité leur effondrement. La fissure de la première panne (figure 3) se situe à proximité d'un nœud de forte taille placé près de la rive.

La fissure de la seconde panne (figure 4) s'est produite dans une zone où la pente de fil est importante. Des défauts tels que les nœuds et l'inclinaison du fil provoquent localement des contraintes de traction transversale représentées schématiquement sur les figures 3b et 4b.

L'entrait de ferme de la figure 5, s'est rompu à l'emplacement d'un nœud de grande taille, plus d'une centaine d'années après sa mise en œuvre.

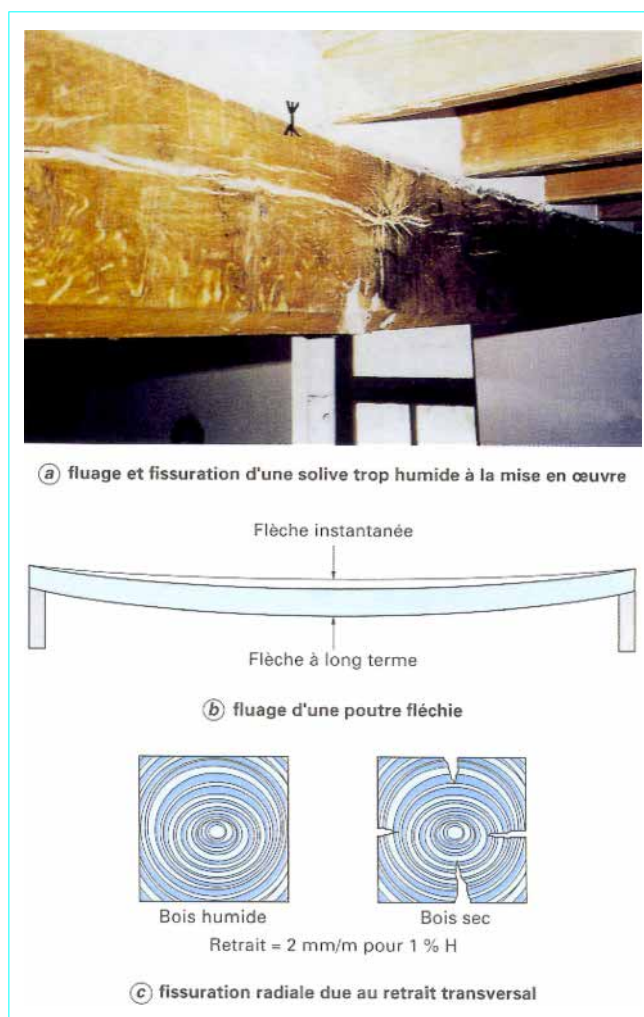


Figure 2 – Déformation et fissuration de solive

La résistance des éléments de charpente et des assemblages à la traction perpendiculaire au fil du bois est faible comparativement à leur résistance à la traction axiale. Par ailleurs, la résistance du bois à la rupture instantanée (ou expérimentale) [2], est supérieure à sa résistance à long terme, sous charges permanentes par exemple. Il s'agit en quelque sorte d'une lente propagation de microfissures qui finissent par atteindre la taille critique à partir de laquelle leur propagation s'accélère brusquement. Au-delà d'un seuil de chargement permanent de 50 % de la charge de rupture instantanée, la durée de vie se situe entre quelques centaines d'années et quelques minutes. La dispersion de la résistance à la rupture du bois se traduit alors par une dispersion bien plus accentuée des durées de vie. La résistance à la rupture du bois sous la combinaison d'un chargement permanent de taux supérieur à 50 % et d'un chargement variable de courte durée est elle aussi diminuée, mais de manière moins prononcée. On trouve dans l'Eurocode 5 des coefficients de réduction qui traduisent l'influence de la durée de chargement sur la résistance du bois.

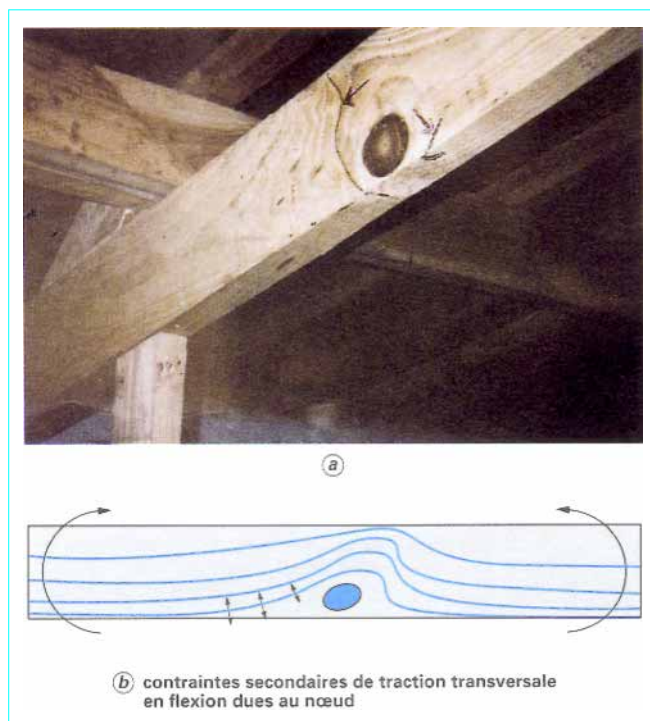


Figure 3 – Rupture de panne causée par un nœud

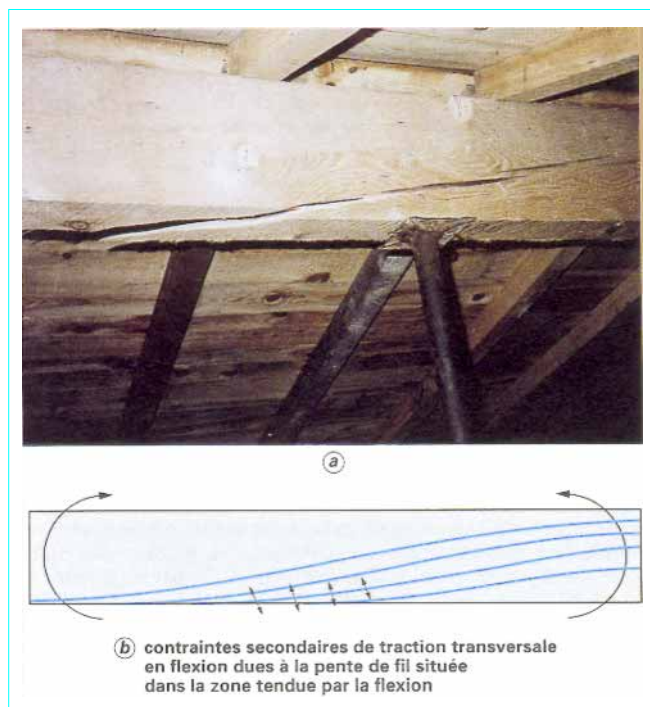


Figure 4 – Rupture de panne causée par l'inclinaison du fil



Figure 5 – Rupture différée d'un entrain de ferme

La présence de nœuds de grande taille, de pente de fil, d'entailles, d'éléments d'assemblage, est susceptible de créer localement des contraintes de traction transversale dépassant le seuil fatidique des 50 % de la contrainte de rupture instantanée.

Il est souhaitable que les critères de classement des bois prennent suffisamment en considération ce risque particulier.

Les principales précautions à prendre sont le tri des bois et la vérification de la conception des assemblages d'après l'expérience de leur comportement *in situ* [1], et au besoin par la voie expérimentale.

2.4 Rupture d'assemblage

L'assemblage de la figure 6a est l'assemblage du poinçon sur l'entrain d'une ferme latine traditionnelle. L'assemblage s'est ouvert, le poinçon s'est fissuré, et la suspente métallique s'est engravée dans le dessous de l'entrain ; cette rupture est due à une erreur de conception.

L'erreur a été d'attacher les diagonales situées de part et d'autre du poinçon sur l'entrain, ce qui eut pour effet de surcharger la suspente de l'entrain sur le poinçon bien au-delà de sa capacité (figure 6b).

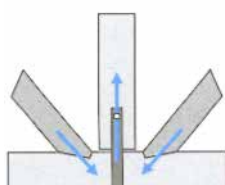
La disposition constructive correcte qui consiste à attacher les diagonales sur le poinçon est indiquée figure 6c, elle évite de surcharger la suspente de l'entrain.

2.5 Dégradations d'origine biologique

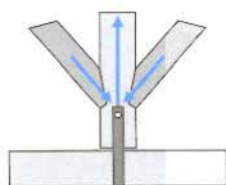
Le plancher en résineux de la figure 7 a subi l'attaque d'un insecte spécialisé dans les essences résineuses : le capricorne. L'extrémité de la poutre en chêne très ancienne de la figure 8 a été dégradée par un autre insecte spécialisé dans les feuillus : le lyctus. Les larves de ces insectes demeurent pendant plusieurs années à l'intérieur du bois, où elles creusent des galeries pour se nourrir, avant de sortir pour se reproduire. Les dégâts causés par les insectes s'accroissent avec le temps, leur cycle de reproduction étant de cinq à sept ans dans les conditions normales. Les précautions à prendre pour prémunir les charpentes contre ces attaques sont de traiter les bois résineux par des produits spécifiques, et de purger l'aubier des bois de chêne.



(a) erreur de conception de l'assemblage des diagonales centrales d'une ferme latine



(b) mauvaise disposition des diagonales



(c) assemblage correctement conçu

Figure 6 – Rupture d'assemblage

Les éléments de la charpente de la figure 9 sont au bord de l'effondrement. Cette charpente est en service depuis cinquante ans, les infiltrations qui se sont produites à travers la couverture ont créé peu à peu les conditions d'humidité favorables au développement d'un champignon lignivore, la mérulle. Il n'est resté finalement de choix qu'entre des réparations considérables ou le remplacement du bâtiment. Le traitement préventif des bois, la surveillance et l'entretien des toitures, sont des précautions indispensables à leur conservation.



Figure 7 – Plancher ancien en résineux attaqué par des capricornes



Figure 8 – Poutre très ancienne superficiellement dégradée par le lyctus

Les pieds de poteaux de la figure 10 sont situés à l'extérieur du bâtiment. Ils ont été exposés à la pluie, qui a fourni l'humidité nécessaire au développement de la mérulle. Ces pieds de poteaux ont été traités par injection de bore afin de stopper l'attaque de la mérulle, et protégés de l'humidité par un capotage. La durabilité effective des bois réputés naturellement résistants (cœur de pin sylvestre) ou des bois traités spécialement à cet effet dépend beaucoup des conditions climatiques locales et de leur exposition aux intempéries. Dans les situations exposées, la protection des bois par capotage ventilé est une bonne précaution.



Figure 9 – Pannes et croix de contreventement en phase finale de dégradation par la mérule



Figure 10 – Pieds de poteaux extérieurs traités par injection de bore et protégés

3. Charpentes légères

La pathologie des charpentes légères dont les portées sont inférieures à 20 m concerne entre autres les charpentes en fermettes, les structures en caisson, ou encore les constructions en ossature bois.

3.1 Flambement de fermettes

On recense 80 sinistres de fermettes par an, soit 1 % du total de la construction. Sur les 170 sinistres de charpentes en fermettes analysés lors de l'enquête [3], 66 sont dus au flambement transversal, ce phénomène étant à l'origine de 10 effondrements sur un total de 14. Ces cas de flambement constituent l'exemple d'une série de sinistres réglementaires.

Le cas de flambement de fermettes de la figure 11 est typique. Les règles professionnelles de conception et de calcul qui furent applicables jusqu'à la publication du DTU 31.3 en mai 1995 ont été respectées, la mise en œuvre n'est pas en cause. L'erreur d'appréciation du mode de flambement transversal qui est à l'origine de ce sinistre est en effet imputable aux règles professionnelles elles-mêmes [4].

Ces règles reposaient sur l'hypothèse d'un mode de flambement à nœuds fixes correspondant à des longueurs de flambement ℓ_f très courtes, égales à l'entre-axes e_1 des liteaux de couverture (≈ 30 cm) dans les cas où la stabilité de la charpente était reprise par la maçonnerie des pignons (figure 12a) ou bien à l'entre-axes e_2 des fermettes (de 60 cm à 120 cm) dans les cas où la stabilité de la charpente était due à son contreventement (figure 12b). Cette hypothèse erronée était basée sur l'idée que l'intersection des liteaux avec les fermettes et les dispositifs de stabilité constituaient des points fixes.

En réalité, ces intersections ne sont pas des points fixes, car les nombreux assemblages cloués qu'ils comportent ne sont pas rigides, ils subissent des glissements élastiques ou même plastiques (figure 13). De la souplesse est ainsi introduite dans les dispositifs de stabilité, de sorte que l'on se trouve confronté à des phénomènes de flambement en milieu élastique (figure 14). Ce flambement est d'autant plus redoutable que le bâtiment est long et que la distance entre stabilités est grande. L'effondrement montré sur la figure 15 s'est produit sur un bâtiment commercial long de 30 m, sous charges permanentes, deux ans après sa construction.



Figure 11 – Flambement réel de fermettes

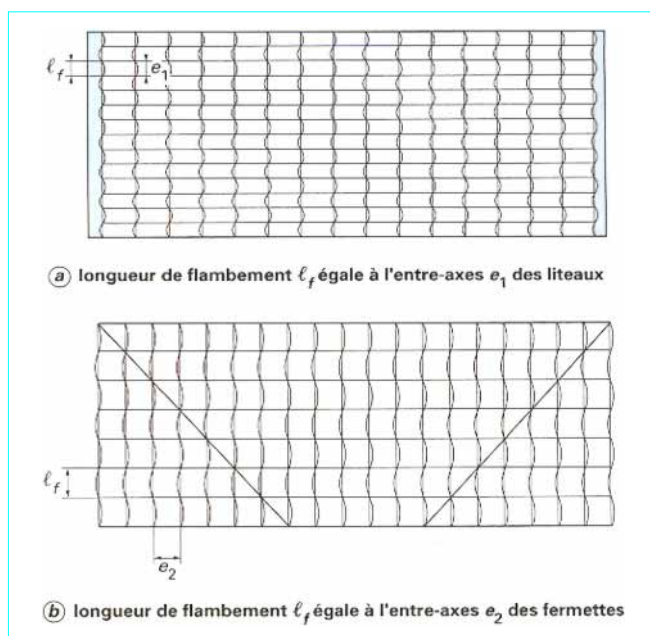


Figure 12 – Flambement réglementaire des fermettes avant DTU 31.3

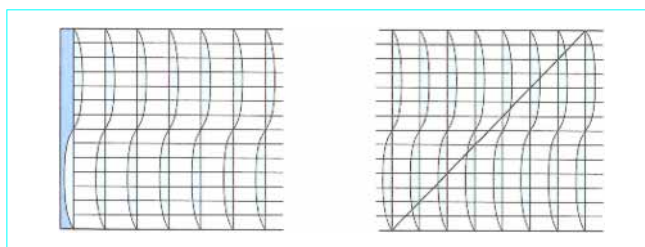


Figure 14 – Exemples de longueurs de flambement réellement observées *in situ*



Figure 15 – Effondrement d'une charpente en fermettes sous charges permanentes, deux ans après sa construction



Figure 13 – Glissement et arrachement des pointes aux joints de liteaux

De nouvelles dispositions constructives comportant la mise en œuvre, sous les versants de toitures, de diagonales de contreventement continues, de lisses filantes aux nœuds de triangulation des arbalétriers, d'entretoises entre les pieds de fermes, l'emploi de bois plus épais au-delà de 12 m de portée, complétées par des longueurs de flambement de calcul plus raisonnables, ont été adoptées par le nouveau DTU 31.3 (figure 16).

3.2 Décalage d'appuis de poutrelles

La poutrelle brisée de la figure 17 est un pied de ferme de maison individuelle. Cette ferme est constituée de deux arbalétriers, formés chacun d'une poutrelle triangulée à membrure bois et diagonales métalliques. L'extrémité de la membrure inférieure de l'un des arba-

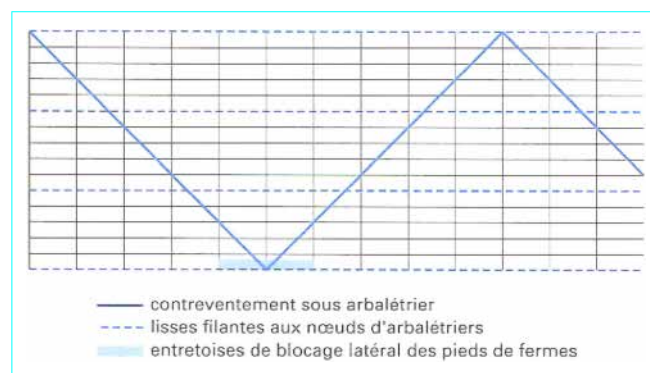


Figure 16 – Dispositions antiflambage du DTU 31.3

létriers s'est rompue, ses diagonales métalliques ont été arrachées. L'appui de cette poutrelle est éloigné du nœud de triangulation, ce qui induit un moment secondaire défavorable. Cette erreur de conception est à l'origine de la rupture. L'utilisation de ces poutrelles est plus délicate que celle des éléments de charpente traditionnelle, elle nécessite l'étude des détails constructifs.

3.3 Déversement de portique

Le portique de la figure 18 est constitué d'éléments composés à partir d'une nouvelle sorte de contreplaqué à fil parallèle (*Laminated Veneer Lumber*) d'origine finlandaise. La traverse est composée de deux épaisseurs de 36 mm de LVL clouées l'une sur l'autre. Les poteaux sont formés par des caissons cloués dont les flancs sont également constitués par du LVL. Le déversement résulte ici de l'insuffisance de densité du clouage réunissant les deux plaques de LVL composant la traverse et constituant les flancs des poteaux. Ce défaut a pour effet de les assouplir en flexion transversale et en torsion, et par voie de conséquence de les exposer au déversement. Les nouveaux matériaux dérivés du bois sont plus performants, mais leur emploi exige en contrepartie une meilleure définition des détails d'assemblages et une fabrication plus soignée qu'à l'ordinaire.



Figure 17 – Rupture de poutrelle à membrures bois



Figure 18 – Déversement de portique en LVL (*Laminated Veneer Lumber*)

3.4 Instabilités de maisons à ossature bois

La maison à ossature bois de la figure 19 est maintenue par des étais. Les murs des façades et des pignons du rez-de-chaussée penchent vers l'extérieur. Il s'agit sans aucun doute de l'absence de tout le dispositif de liaison. Un tel dispositif des murs périphériques au plancher et aux versants de toiture est absolument nécessaire à la stabilité de l'ensemble de la construction.

Les décombres de la figure 20 sont ceux d'une maison en ossature bois qui s'est effondrée la veille de la remise des clefs, à la suite d'une rafale de vent à 90 km/h. Il s'agit là encore d'un défaut de conception de la stabilité d'ensemble de la construction. Le contreventement de la charpente en fermettes était certainement insuffisant, tant dans le plan des arbalétriers que dans celui des entrails.

Ces expériences malheureuses montrent que la conception et la construction des maisons à ossature bois ne sont pas un jeu d'enfants, elles requièrent la compétence de professionnels.



Figure 19 – Instabilité des murs d'une maison à ossature bois



Figure 20 – Effondrement d'une maison à ossature bois

4. Charpentes en lamellé-collé

Le taux annuel de sinistres courants des charpentes en lamellé-collé est de l'ordre de 0,1 % en nombre d'après le Tableau A (en [Doc. C 2 450]), et de 0,3 % en coût.

Cette statistique ne tient pas compte des sinistres les plus coûteux.

Le tableau 1, qui reprend les éléments donnés par Ph. Crubilé [5], détaille les causes de ces sinistres.

4.1 Autocintrage de reins de portiques

Le faîtage de la salle de sports de la figure 21a, dont l'ossature principale est constituée de portiques à reins courbes en bois lamellé-collé, s'est abaissé de 30 cm. Cette déformation ne résulte ni d'une surcharge, ni du fluage. Elle a été causée par l'augmentation de la courbure des reins des portiques, résultant du retrait transversal subi par le bois au cours du séchage qui suit la mise hors d'eau et le chauffage de la salle. Ce phénomène d'autocintrage est connu depuis peu. Dans les cas où le respect des gabarits de jeu sont exigés, l'autocintrage peut être préjudiciable à l'utilisation de ces salles en compétitions.

Tableau 1 – Causes des sinistres survenus dans des charpentes en lamellé-collé (d'après [5])

Type de cause	Nombre	Cause	Déformations et fissurations	Ruptures et effondrements	Total
Conception	16	Sous-dimensionnement	5	0	5
		Fluage	5	0	5
		Flambement	2	0	2
		Assemblages	0	4	4
Fabrication	11	Mauvais collage	11	0	11
Mise en œuvre	5	Action du vent	0	3	3
		Charge de neige	0	1	1
		Traction transversale	0	1	1
Lacunes réglementaires	21	Autocintrage	4	0	4
		Couronnes de boulons	9	0	9
		Poutres courbes	2	1	3
		Accumulation d'eau	2	3	5
Total	53		40	13	53

L'allure des portiques à reins courbes est représentée sur la figure 21b, ainsi que la déformation concomitante à l'affaissement du faîtage. D'après l'analyse présentée par G. Lyot [6], le retrait transversal a pour effet de rapprocher l'intrados de l'extrados des reins des portiques, alors que les variations des longueurs des arcs correspondants sous l'effet du retrait longitudinal sont négligeables (figure 21c). C'est ce qui provoque l'augmentation de leur courbure, et par voie de conséquence l'affaissement du faîtage. On peut éviter ces désordres moyennant un meilleur séchage préalable des lamelles et une correction anticipée des déformations d'autocintrage prévisibles par le calcul.

4.2 Fissuration de poutres courbes

Les poutres courbes sont soumises à des contraintes de traction transversale accompagnant leur flexion. Ce type de poutres a constitué une source de pathologie importante ; dans les années 70 et 80, de nombreux cas de fissuration semblables à celui de la figure 22 ont été relevés. Il s'agit de ruptures différées qui se sont produites au bout de quelques années de service. Ces sinistres en série sont à l'origine de la notion de « sinistres réglementaires » [1]. Il a en effet été constaté que la contrainte de rupture à long terme en traction transversale était égale à la moitié de la contrainte admissible donnée par les règles CB 71. Une première mesure de sauvegarde a été de réduire la valeur de cette contrainte admissible de 0,6 à 0,4 MPa.

Cette erreur réglementaire témoigne de l'ignorance des effets d'échelle et, à un moindre degré, des effets de durée de chargement, qui régnait à l'époque de leur rédaction. Ce problème s'est manifesté pareillement dans d'autres pays. Des recherches spécifiques ont été consacrées à ces effets dans le cadre de la préparation de l'Eurocode 5.

L'effet d'échelle est particulièrement prononcé dans le cas des poutres courbes, puisque la contrainte de rupture instantanée en traction transversale d'une éprouvette en résineux de quelques mm² de section est de 3,6 MPa [7], alors que pour un arc à l'échelle 1/2 la résistance instantanée chute à 0,9 MPa, soit quatre fois moins. Dans le cas d'un arc en vraie grandeur qui s'est fissuré sous charges permanentes au bout de 8 années de service, la contrainte de rupture en traction transversale sous charges permanentes n'est plus que de 0,3 MPa. L'effet d'échelle se traduit approximativement par une première réduction de résistance de facteur 6, et l'effet de durée de chargement par une seconde réduction de facteur 2. Le facteur de réduction final est de 12.

L'effet d'échelle s'explique à partir d'une approche qui fait dépendre la contrainte de rupture d'un volume de bois donné soumis à une répartition de contraintes définie, de la probabilité de trouver dans ce volume un défaut de taille critique susceptible d'initier la rupture. C'est la théorie du maillon le plus faible de Weibull.

La valeur des contraintes de traction transversale, qui se calcule facilement dans le cas des poutres courbes, échappe au calcul dans bien des cas, comme par exemple celui des assemblages, où leurs effets peuvent se manifester de manière insidieuse.

Dans un souci de sécurité, la valeur actuelle de la contrainte admissible du bois en traction transversale a été ramenée à 0,2 MPa. Des renforcements par tiges transversales en métal ou en fibre de verre scellées à la résine sont envisageables, certaines règles étrangères comme les DIN les imposent.

Les réparations consistent en l'injection de résine dans la fissure, associée à la mise en place de tiges de renfort transversales scellées ; c'est le cas de la poutre de la figure 22.

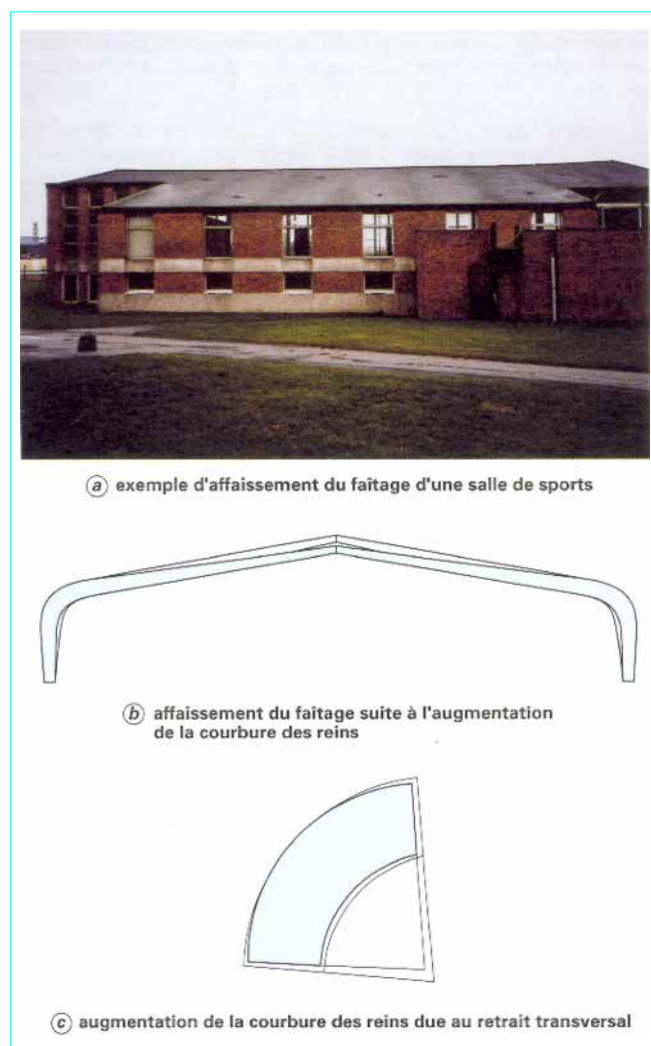


Figure 21 – Autocintrage de reins de portique



Figure 22 – Réparation de poutre courbe fissurée

4.3 Autres cas de fissuration

Un autre cas de fissuration provoquée par les contraintes de traction transversale et les contraintes de cisaillement est illustré par la figure 23 [8]. Les pieds de ces arcs en lamellé-collé à inertie rapidement variable comportent des lamelles tranchées, ils sont situés à l'extérieur. Leur exposition aux intempéries favorise la fissuration. Une conception correcte de ces pieds d'arcs voudrait que leur inertie varie plus doucement, et aussi qu'ils soient situés à l'intérieur du bâtiment.

L'arc de la figure 24a présente une fissuration plus ou moins profonde des plans de collage. C'est le résultat de l'utilisation hâtive de pin sylvestre traité comportant une forte proportion d'aubier humidifié par le traitement (figure 24b).

La prévention de ce type de désordres repose soit sur la sélection de bois sans aubier, soit sur le recours à une opération de séchage et de stabilisation supplémentaire des bois traités, avant collage.

4.4 Charges hydrostatiques

Les toitures plates, ou à faible pente, peuvent être soumises à des charges hydrostatiques qui, bien qu'elles soient la cause de ruptures ou d'effondrements assez fréquents, ne sont pas prises en compte dans la réglementation (figure 25a).

La flexion d'une poutre sous une charge d'eau de hauteur constante peut être instable, car elle produit une flèche qui accroît la charge appliquée ; cet accroissement de charge augmente encore la flèche (figure 25b).



Figure 23 – Pied de poteau avec lamelles tranchées

Lorsque la souplesse de la poutre est excessive (figure 26a), ce processus s'amplifie jusqu'à l'effondrement. Les défauts de collage (figure 26b) et les défauts d'aboutage (figure 26c) peuvent, en affectant la rigidité et la résistance des poutres, en accroître dangereusement la sensibilité aux charges hydrostatiques. Bien que les Règles ne le préconisent pas (on trouve quelques indications dans l'Eurocode 5. Document d'application nationale), il est recommandé de vérifier par le calcul que l'amplification des flèches et des contraintes demeure acceptable. Les défauts de collage et d'aboutage doivent être éliminés par un contrôle de la qualité de la fabrication.

4.5 Assemblages

Les assemblages jouent un rôle important dans la pathologie de la charpente lamellée collée.

Aux angles des portiques, le retrait transversal des poteaux est gêné par la traverse et inversement, c'est ce qui provoque des fissures semblables à celles que l'on voit sur la figure 27. Cela peut être évité par des précautions supplémentaires, un séchage convenable des bois avant collage, un contrôle du collage, et l'adjonction de plaques ou de tiges de renfort collées [9]. Des essais récents mettent en évidence l'influence de la distribution des contraintes de traction transversale et de cisaillement dans les couronnes de boulons [10].

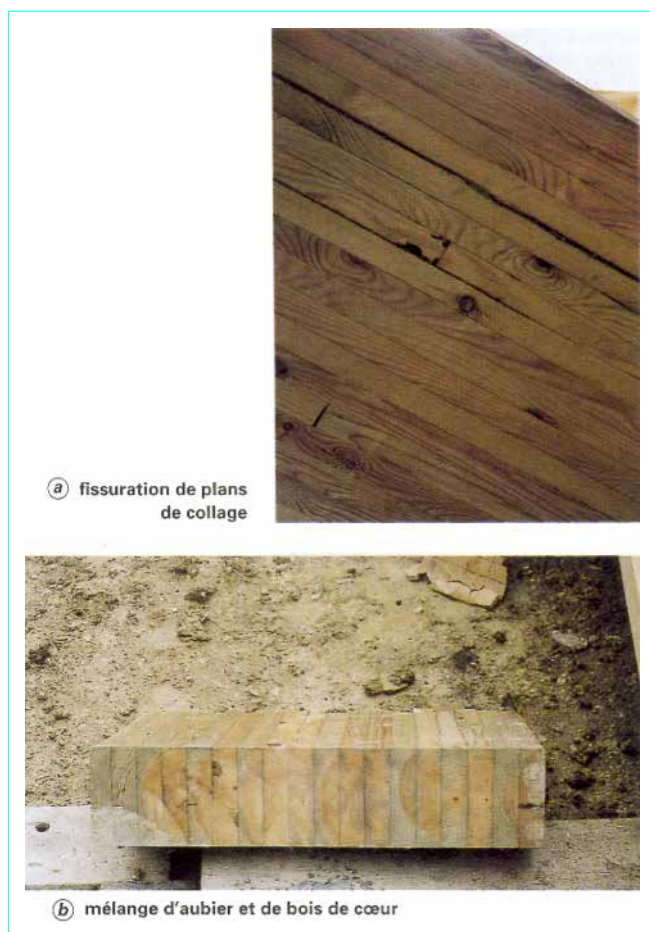


Figure 24 – Fissuration des plans de collage

L'effondrement partiel de la charpente de la figure 28 s'est produit deux ans après sa construction, à la suite d'une chute de neige sans caractère exceptionnel. Le concepteur avait prévu de compléter les éclisses du joint de continuité destinées à reprendre l'effort de flexion en disposant plusieurs anneaux de charpente dans le plan du joint. Ces anneaux ont été omis lors de l'exécution en atelier, leur absence étant par ailleurs visuellement indétectable sur chantier.

La poutre de la figure 29a comporte un joint de transport en son milieu, elle s'est effondrée sous une surcharge de neige à peine supérieure à la normale. Il s'agit d'un sinistre réglementaire dont l'analyse est due à G. Vidon [11]. La reconstruction de cette poutre a été subordonnée à une vérification expérimentale en vraie grandeur. La ruine expérimentale a eu lieu sous un niveau de chargement tout à fait comparable à celui du sinistre ; la figure 29b montre le processus de rupture observé lors de l'essai. La rupture commence par la fissuration du bois dans des plans tangents aux anneaux de charpente qui attachent les extrémités de la poutre aux éclisses. Ces fissures sont initiées par des contraintes de traction transversale induites par la rotation relative entre les extrémités de poutre et les éclisses. Cette rotation provient du glissement des assemblages sous l'action des efforts de reprise du moment de flexion. La rupture des bois en traction axiale se produit ensuite à l'extrémité des éclisses, ce qui entraîne l'effondrement final.

Il est préférable d'éviter de placer de tels joints dans les zones où la capacité de flexion des éléments est sollicitée à plein. Des améliorations peuvent être apportées à ce type d'assemblages par le biais de la réduction de la rigidité des éclisses au droit du joint. On doit néanmoins considérer que l'appréciation précise de la sécurité de ces assemblages nécessite leur expérimentation en vraie grandeur.

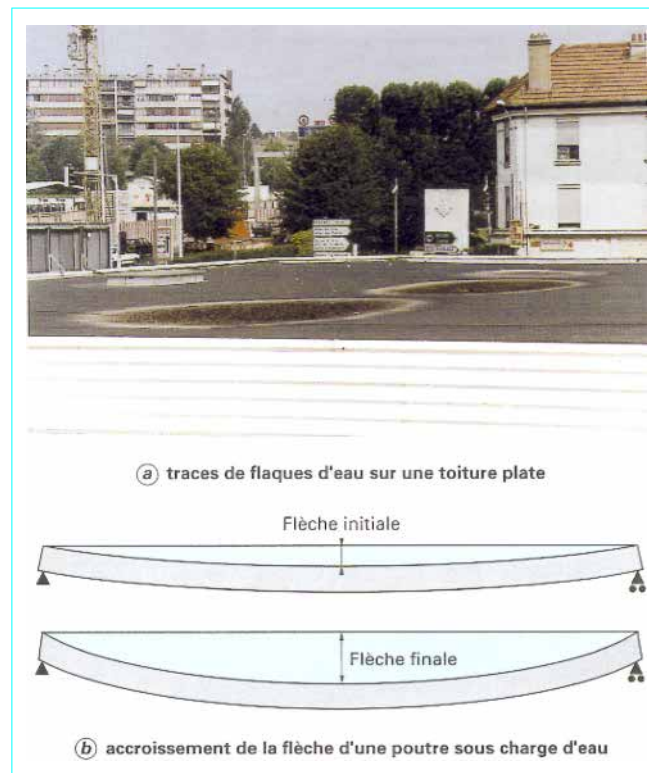


Figure 25 – Effets dus aux charges hydrostatiques



(a) effondrement de poutre
à la suite d'une pluie d'orage



(b) défaut de collage ; poutre
identique à celle de la figure 26a



(c) défaut d'aboutage affectant une poutre identique
à celle de la figure 26a

**Figure 26 – Défauts pouvant accroître la sensibilité
aux charges hydrostatiques**

La rupture d'assemblage de la figure 30 a provoqué l'effondrement complet de la charpente d'une salle de congrès, fort heureusement inoccupée. Il s'agit d'une rupture différée qui s'est produite sous charges permanentes, deux mois seulement avant la fin de la période de garantie décennale, soit presque dix ans après la construction. Les expertises n'ont pas relevé de sous-dimensionnement. Il est fort possible qu'il s'agisse d'un sinistre réglementaire, car l'absence des surcharges de neige de calcul habituelles peut avoir pour conséquence d'exposer cet assemblage au risque de rupture différée. Les coefficients de correction pour les durées de chargement, qui sont données dans l'Eurocode 5 peuvent être utiles dans bien des cas.

4.6 Ancrages

L'avent de stade de la figure 31a a été emporté par une rafale de vent, par suite de la rupture en chaîne de ses fixations.

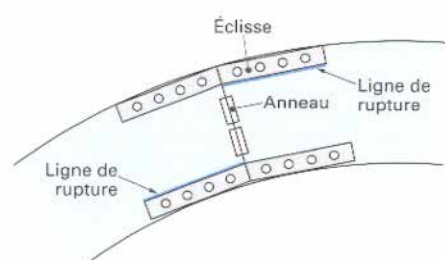
On voit sur le détail de la figure 31b, que les fixations des poutres de l'avent en tête des poteaux sont réalisées par des boulons placés près de l'intrados de ces poutres. Leur disposition est conforme aux règles CB 71. Sous l'action du vent qui tend à soulever l'avent, cette



Figure 27 – Assemblage d'angle de portique fissuré



**Figure 28 – Effondrement partiel de la charpente
d'une salle de sports**



disposition génère les contraintes de traction transversale locales, situées dans un plan parallèle au fil du bois, à la hauteur du boulon supérieur de l'attache. La fissuration de ce plan a entravé la rupture des attaches de ces poutres.

Une saine conception de ce type d'attache consiste à éloigner les boulons de la rive inférieure afin d'atténuer les contraintes locales de traction transversale.

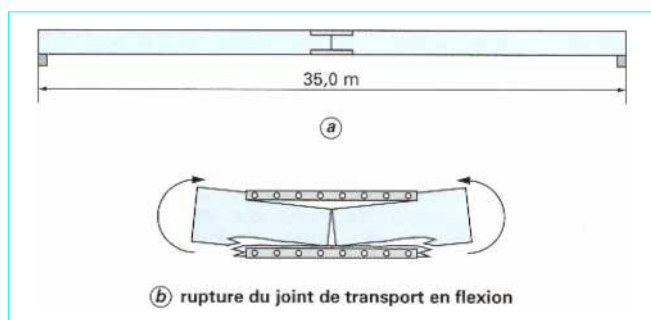


Figure 29 – Poutre en lamellé-collé avec joint de transport

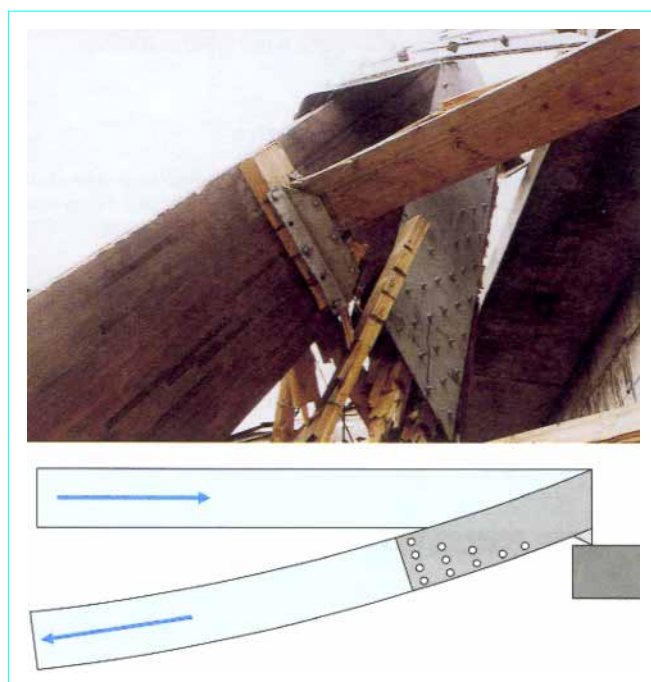


Figure 30 – Effondrement d'une charpente par rupture différée d'assemblage

La fissure qui affecte le pied de poteau de portique de la figure 32 résulte d'une mauvaise conception de la ferrure d'ancrage dont les boulons sont disposés verticalement dans l'axe du poteau. Cette disposition gêne la rotation du pied de portique, et tend à fendre le bois. Le contact du pied de poteau avec le sol est par ailleurs une cause certaine de dégradation par les champignons.

L'assemblage de pied de poteau de portique de la figure 33 est correctement conçu du point de vue mécanique mais, étant placé à l'extérieur où il est exposé à l'humidité, il a été fortement dégradé par des champignons. L'eau ruisselle le long du poteau, s'infiltre dans le sabot d'ancrage, y stagne, les champignons s'installent et gagnent peu à peu le poteau. Il est préférable d'éviter l'exposition des bois lamellés collés à l'extérieur des bâtiments. Lorsque c'est inévitable, il convient de concevoir des ferrures d'ancrage comportant des ouvertures, de sorte que l'eau n'y soit pas piégée et que l'air puisse y circuler.

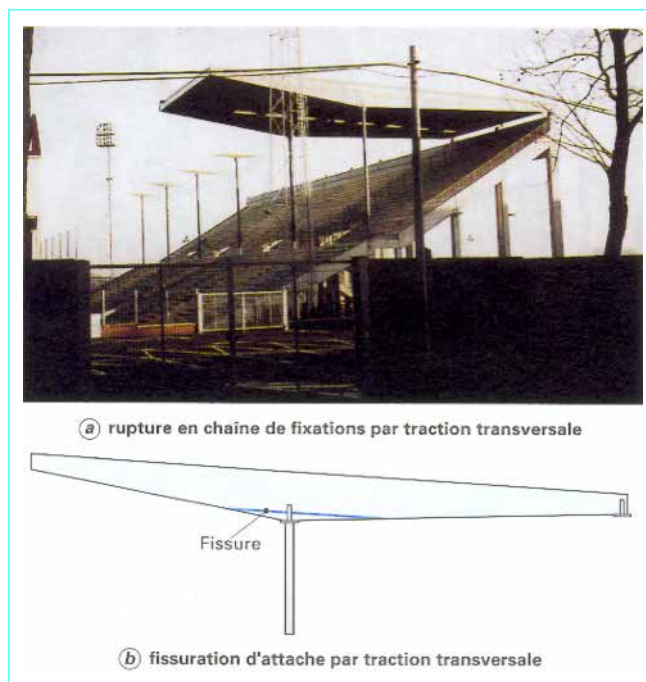


Figure 31 – Rupture de fixations



Figure 32 – Fissure en pied de poteau de portique bloqué en rotation

L'utilisation de peinture au lieu de lasure microporeuse est un facteur aggravant qui ralentit l'évaporation de l'eau de ruissellement qui s'infiltre à travers les craquelures du film étanche.

4.7 Montage

Le flambement spectaculaire de la figure 34 s'est produit en cours de montage, le haubannage de chantier étant insuffisant.



Figure 33 – Attaque de champignons



Figure 34 – Flambement en cours de montage

5. Causes exceptionnelles et accidentelles

Lorsque les sinistres résultent d'actions extérieures exceptionnelles ou accidentelles, il est en général malaisé de démêler parmi les causes vraies ou supposées la part des actions de celle de la conception. La question du dépassement des actions réglementaires de calcul par les actions climatiques exceptionnelles, ou par les actions accidentelles, est souvent l'objet de controverses.

5.1 Chutes de neige exceptionnelles

L'effondrement de la moitié de la toiture d'une grande surface commerciale (figure 35a) s'est produit à la suite des chutes de neige exceptionnelles de décembre 1990 dans la région lyonnaise. Sa cause mécanique se trouve dans le mauvais positionnement du joint cantilever, placé trop près de l'appui central de la poutre à deux travées qui constitue l'élément porteur principal de cette toiture (figure 35b). La capacité de rotation de ce joint cantilever, réalisé comme indiqué par la figure 35c, est très limitée par construction. Ne pouvant pas répondre à la demande de rotation résultant de la surcharge exceptionnelle de neige, il s'est bloqué. Les contraintes locales de traction transversale qui en ont résulté ont initié une

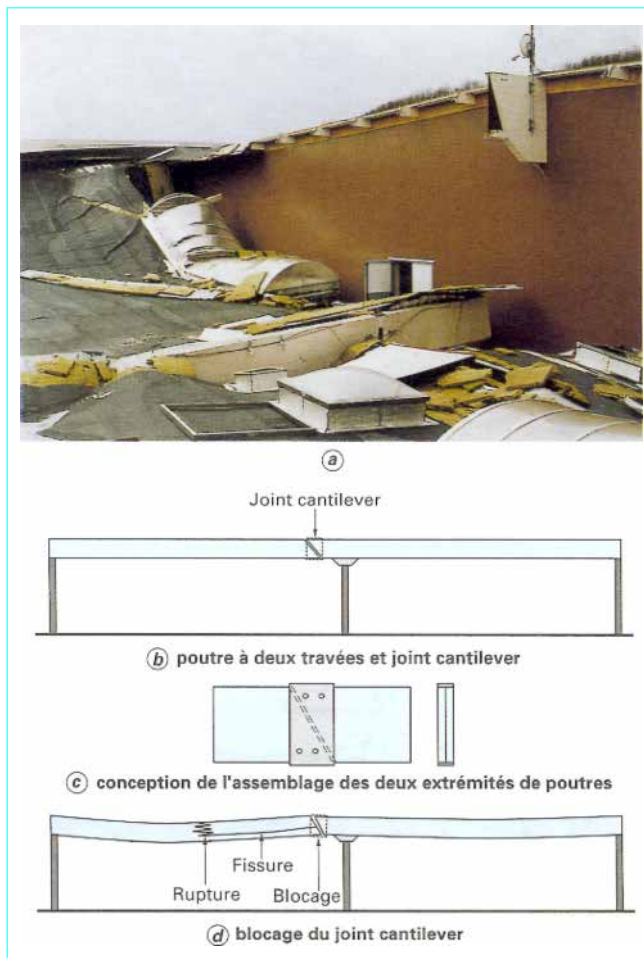


Figure 35 – Effondrement sous surcharge de neige causé par la rupture du joint cantilever mal positionné

fissure située au quart inférieur de la poutre ; cette fissure s'est propagée vers la partie centrale réduisant ainsi la hauteur résistante de la poutre, et déclenchant la rupture finale de flexion qui a provoqué l'effondrement final de la travée (figure 35d).

La réponse correcte à cette difficulté réside soit dans la réalisation d'un joint comportant un axe de rotation, soit dans la recherche de la position optimale pour laquelle la rotation relative des extrémités des poutres est nulle ou négligeable, c'est-à-dire la position du point du moment nul d'une poutre identique continue (sans joint). Une charpente presque identique à celle-ci, due au même constructeur, et située à proximité, n'a subi que de faibles dommages, le joint cantilever de conception identique ayant été placé à la bonne distance de l'appui central.

5.2 Cyclones

Les ancrages des figures 36a et b ont été rompus par l'ouragan qui a dévasté la Bretagne et la Normandie en octobre 1987, ils appartenaient à une importante construction en lamellé-collé abritant un marché aux bestiaux qui a été entièrement soufflée.

L'arc en lamellé-collé de la figure 36c a été brisé par ce même ouragan, il appartenait à une salle de sports, qui fut elle aussi complètement détruite.



a) rupture de fixation sur ferrure d'ancrage



b) rupture de soudure de platine



c) arc en lamellé-collé brisé

Figure 36 – Ruptures dues à l'ouragan de 1987



Figure 37 – Rives de toitures arrachées par l'ouragan Hugo
(photo F. Issaly)



Figure 38 – Charpente en lamellé-collé après un incendie

En cas de soulèvement dû au vent, les reins des portiques sont sollicités en traction transversale, de la même manière que les poutres courbes sous charges descendantes.

Les angles et les rives de toitures sont particulièrement exposées en cas de tempête, comme le montre la figure 37. Cette photographie a été prise après le passage de l'ouragan Hugo sur la Guadeloupe en septembre 1989 [12].

Les règles de calcul au vent prévoient des majorations locales en rives de toiture dont il est prudent de tenir compte.

5.3 Feu

Parce qu'il brûle lentement, le bois massif ou lamellé-collé répond bien à l'exigence de sécurité qui vise à permettre l'évacuation des locaux par les personnes présentes en cas d'incendie (figure 38).

Les charpentes légères, dont l'épaisseur est faible, doivent par contre être protégées du feu par un écran protecteur, une ou plusieurs plaques de plâtre par exemple.



(a) effondrement du rez-de-chaussée d'une maison traditionnelle



(b) dislocation du rez-de-chaussée d'une maison moderne

Figure 39 – Dégâts provoqués par le séisme de Kobé en 1995

5.4 Séisme

Contrairement à certaines affirmations, les constructions en bois ne résistent pas naturellement aux séismes. Le séisme qui a frappé la ville de Kobé en janvier 1995 a causé de nombreuses victimes parmi les habitants des maisons en bois, qu'elles fussent traditionnelles comme celle de la figure 39a, ou modernes comme celle de la figure 39b.

À Kobé même et aux environs, là où l'accélération du sol a largement dépassé la valeur de calcul applicable aux petites constructions, les maisons en bois ont été détruites. Par contre, dans les endroits plus éloignés de la faille, comme Osaka et ses environs, là où l'accélération au sol a été comparable à sa valeur de calcul, ces constructions ont bien résisté.

L'absence de transparence du rez-de-chaussée et la régularité en plan font partie des dispositions parasismiques fondamentales.

6. Conclusion

La règle de confidentialité habituellement observée en matière de pathologie de structures a pour effet inverse de rendre indétectable la survenance de séries de désordres, avant que leur accumulation ne les fasse remarquer. C'est par transgression de cette règle que l'on peut atteindre le but recherché, l'image sereine d'un mode de construction très faiblement sinistrant.

L'existence de « sinistres réglementaires » ne doit pas être attachée aux seules règles CB 71. Il n'est pas exclu que l'Eurocode 5, en vertu de son caractère expérimental et malgré son statut européen, puisse comporter des lacunes dangereuses, dont la présence ne pourrait être détectée autrement que par la voie expérimentale.

Pathologie des structures en bois

par **Jean-Pierre BIGER**

Ingénieur de l'École supérieure du bois
Spécialiste en structures bois au Bureau Veritas

Statistiques

Tableau A – Statistiques de sinistres d'après D. Tarrin de l'Agence Qualité Construction (1996)

Type d'ouvrage	Nombre de sinistres entre 5 kF et 1 MF de 1986 à 1994	% en nombre	Coût des sinistres en MF	% en coût
Total de la construction	62 957	100	2 740	100
Total charpente bois	1 976	3	69	2,5
Charpente traditionnelle	1 255	2	37	1,4
Fermettes	644	1	22	0,8
Lamellé-collé	77	0,1	10	0,3

Références bibliographiques

- [1] *Recueil de contributions au calcul des éléments et structures bois*. (première et deuxième parties). – Annales de l'ITBTP, n° 466, juil.-août 1988 et n° 497, oct. 1991.
- [2] HUET (C.), GUITARD (D.) et MORLIER (P.). – *Le bois en structure, son comportement différé*. Annales de l'ITBTP, n° 469, déc. 1988.
- [3] SAGOT (G.). – *Sinistralité des fermettes*. Agence Qualité Construction, nov. 1995.
- [4] BIGER (J.-P.). – *Influence des liteaux sur la stabilité des fermettes au flambement transversal*. Annales de l'ITBTP, n° 497, oct. 1991.
- [5] CRUBILE (Ph.). – *Analyse de pathologies de structures en bois lamellé collé*. Agence Qualité Construction, déc. 1994.
- [6] LYOT (G.). – *Déformations engendrées par le retrait dans les éléments courbes en bois lamellé collé*. Recueil de contributions au calcul des éléments et structures en bois (deuxième partie). Annales de l'ITBTP, n° 497, oct. 1991.
- [7] LE GOVIC (C.), ROUGER (F.), KHEBIBECHE (M.) et FÉLIX (B.). – *Comportement rhéologique et mécanique du bois, étude de la déformabilité et des contraintes ultimes à la rupture*. CTBA, juil. 1988.
- [8] LOBEL (Y.). – *Problèmes de calcul des barres à inertie variable en bois lamellé collé*. Recueil de contributions au calcul des éléments et structures bois (première partie). Annales de l'ITBTP, n° 466, juil.-août 1988.
- [9] VIDON (G.) et TETARD (A.). – *Encastrement poteau traverse par couronnes de boulons*. Annales de l'ITBTP, n° 497, oct. 1991.
- [10] RACHER (P.) et CHENU (E.). – *Étude et influence d'un renforcement en contreplaqué sur les couronnes en lamellé-collé*. CUST (1995).
- [11] VIDON (G.). – *Conception des joints de continuité ; exemples de dispositions constructives*. Annales de l'ITBTP, n° 497, oct. 1991.
- [12] ISSALY (E.). – *Rapport d'examen de la pathologie des constructions suite au passage de l'ouragan Hugo les 16 et 17 septembre 1989 sur la Guadeloupe*. Bureau Veritas.
- [13] *Le séisme de Hyogo-Ken-Nambu (Kobé, Japon) du 17 janvier 1995*. Rapport de mission de l'Association française du Génie parasismique.
- [14] *Structures en bois aux états-limites*. Tomes 1 et 2 : introduction à l'Eurocode 5. Eyrolles (1997).