

Charpentes en bois

Conception

par **Philippe CRUBILÉ**

Ingénieur de l'École Supérieure du Bois

Chef de la Section Charpente au Centre Technique du Bois et de l'Ameublement

1. Propriétés physiques du bois.....	C 2 440 — 2
1.1 Conductivité thermique	— 2
1.2 Résistance au feu.....	— 2
1.3 Résistance et protection contre les attaques biologiques.....	— 2
1.4 Résistance aux agressions chimiques	— 2
2. Propriétés mécaniques des bois et matériaux dérivés.....	— 2
2.1 Bois massifs	— 2
2.2 Bois lamellés-collés.....	— 4
2.3 Panneaux contreplaqués.....	— 5
2.4 Panneaux de particules	— 5
2.5 Lamibois.....	— 6
3. Technologie et calcul des assemblages.....	— 6
3.1 Assemblages traditionnels	— 6
3.2 Assemblages mécaniques des systèmes moisés.....	— 6
3.3 Goussets en contreplaqué et connecteurs métalliques	— 7
3.4 Collage.....	— 8
3.5 Aboutage.....	— 9
4. Systèmes constructifs.....	— 9
4.1 Charpente traditionnelle	— 9
4.2 Treillis moisé	— 10
4.3 Treillis et fermes à goussets ou connecteurs	— 11
4.4 Fermes, poutres et portiques composites	— 12
4.5 Arcs et poutres en bois lamellé-collé.....	— 13
4.6 Solutions diverses	— 14
Pour en savoir plus.....	Doc. C 2 440
Caractéristiques de matériaux employés.....	Form. C 2 442

Une bonne utilisation du bois dans les ouvrages travaillant n'est possible que si l'on tient compte, à tous les niveaux, de la plus fondamentale de ses caractéristiques : une anisotropie extrêmement accusée. Cela conduit pratiquement à considérer, dans de très nombreux cas, le bois comme étant constitué de deux matériaux différents dont les comportements doivent être examinés successivement. Ces écarts existent, bien qu'à des degrés divers, pour chacune des constantes physiques ou mécaniques que le concepteur peut être amené à utiliser.

Il est cependant indispensable, dans la conception d'un ouvrage travaillant, de tenir compte de certaines propriétés physiques ou physicochimiques susceptibles d'influer sur les conditions d'exploitation de l'ouvrage, sa sécurité et sa pérennité.

1. Propriétés physiques du bois

1.1 Conductivité thermique

Le tableau 1 en [Form. C 2 442] donne quelques coefficients de conductivité thermique qui interviennent fréquemment dans les calculs d'isolation.

1.2 Résistance au feu

En raison de sa faible conductivité, du caractère isolant du charbon produit par sa combustion, de l'insensibilité relative de ses caractéristiques mécaniques à la température et de l'absence pratique de dilatation thermique, le bois est sans doute le matériau dont le comportement dans un incendie est le plus sain et surtout le mieux *prévisible*.

En effet, exposée au feu, une pièce de bois se décompose progressivement en produisant des gaz combustibles et le résidu solide qu'est le charbon. Il participe donc à l'apport de chaleur et ce en fonction de la surface exposée, donc de son *taux de division* (surface exposée/volume) qui correspond à la section de ladite pièce.

Cependant l'évolution de cette carbonisation est extrêmement régulière, elle se produit à une vitesse constante pour chaque essence : 0,35 mm/min pour du chêne, 0,6 à 0,7 mm/min pour les résineux courants de construction (sapin, épicéa, pin sylvestre), de sorte que l'on peut mettre en évidence un *front de carbonisation*, qui reste parallèle à la surface initiale de combustion de la pièce, et au-delà duquel les caractéristiques physiques et mécaniques sont pratiquement intactes.

Il en résulte que la stabilité au feu d'une structure en bois peut être calculée aisément et avec une bonne précision en utilisant des équations de réduction linéaire des sections résiduelles efficaces des pièces, en fonction du temps, de la forme :

$$x_t = x_0 - 0,07t$$

avec x_t (cm) cote résiduelle efficace,
 x_0 (cm) cote initiale,
 t (min) temps écoulé depuis le début de l'incendie,
 pour les bois résineux.

Pour ce qui concerne la *réaction au feu* (inflammabilité), elle est fonction, comme nous l'avons dit précédemment, des sections d'utilisation ou des épaisseurs dans le cas de panneaux en matériaux dérivés du bois, et le classement de la pièce en dépendra étroitement.

● Classement forfaitaire de réaction

Cette notion de réaction au feu n'intervient guère au niveau des pièces de structure en raison du faible rapport surface/volume qu'elles présentent en général. Elle ne prend tout son sens que dans les cas d'utilisation en grandes surfaces (plafonds, cloisons, agencements), pour lesquels on peut envisager une ignifugation qui améliore le classement initial de réaction au feu du matériau mais pas la stabilité au feu qui, elle, ne dépend que de la section ou de l'épaisseur (cf. [C 3 283]).

Cette méthode de calcul de stabilité au feu n'est utilisable que dans la mesure où certains assemblages faisant appel à des pièces métalliques ne risquent pas de compromettre prématurément la stabilité d'ensemble de la structure. Il est souvent possible, lorsque ces assemblages sont en petit nombre et très localisés (cas de nombreux ouvrages en lamellé-collé, par exemple), de prendre des dis-

positions constructives évitant la ruine en cas de défaillance de ceux-ci, par exemple en recourant à des profils qui permettent un transfert direct (bois sur bois ou bois sur maçonnerie) des efforts.

Le DTU P 92-703 (BF 88) fixe la méthode de justification de la résistance au feu des structures en bois.

1.3 Résistance et protection contre les attaques biologiques

Matériaux d'origine biologique, le bois et ses dérivés sont susceptibles d'être attaqués par des insectes xylophages et par certains champignons (pourritures).

Il convient, à ce sujet, de garder présents à l'esprit les principes fondamentaux suivants :

a) la meilleure protection préventive contre les attaques biologiques consiste à respecter les *conditions d'hygiène* du bois, à savoir : assurer une ventilation suffisante des pièces et toujours éviter, dans la mesure du possible, les atmosphères confinées et les dispositions risquant de provoquer des condensations fréquentes au niveau des bois ;

b) la résistance naturelle des bois à ces attaques est extrêmement variable en fonction de l'essence et constitue un critère fondamental de choix dans les cas difficiles ;

c) la protection des pièces principales à l'aide de produits insecticides et fongicides adéquats est rendue obligatoire par la réglementation française dans la quasi-totalité des cas et pour la plupart des composants en bois utilisés dans le bâtiment.

1.4 Résistance aux agressions chimiques

La plupart des essences ont une grande inertie chimique et présentent, en général, une insensibilité très largement suffisante aux atmosphères corrosives susceptibles d'être rencontrées (dans les installations industrielles, par exemple).

Dans certains cas extrêmes (tanneries, par exemple), il pourra être intéressant d'optimiser ce choix. On consultera les documents correspondants du Centre Technique du Bois et de l'Ameublement.

2. Propriétés mécaniques des bois et matériaux dérivés

2.1 Bois massifs

2.1.1 Caractéristiques

En raison de son anisotropie, le bois ne peut être correctement défini que par la connaissance des caractéristiques mécaniques dans chacune des trois directions principales de sa structure (figure 1) : direction axiale (parallèle aux fibres), direction tangentielle (perpendiculaire aux fibres et parallèle aux cernes d'accroissement), direction radiale (perpendiculaire aux fibres et perpendiculaire aux cernes d'accroissement).

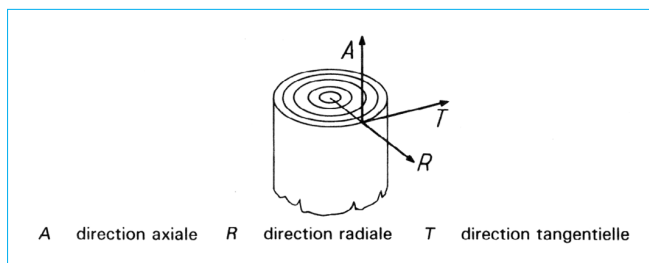


Figure 1 – Directions principales de la structure du bois

Dans la pratique courante, les caractéristiques mécaniques tangentielles et radiales (en général assez voisines) sont confondues et considérées globalement comme caractéristiques *transversales*.

La plupart des valeurs desdites caractéristiques sont établies à l'aide d'essais normalisés. Elles sont extrêmement variables en fonction de l'essence considérée et, dans une large mesure, en fonction de leur provenance (lieu et conditions de croissance de l'arbre). Les valeurs utilisées sont rappelées par le tableau 2 en [Form. C 2 442].

Une pratique intéressante, mais de moins en moins courante, consistait à définir, à titre de comparaison, à partir des contraintes de rupture selon les diverses sollicitations, des *cotes de qualité* de la forme σ/ρ et des *cotes spécifiques* de la forme σ/ρ^2

avec σ contrainte de rupture,
 ρ masse volumique.

On peut dire cependant que la résistance mécanique des bois est d'autant plus élevée que leur masse volumique est grande.

Le tableau 3 en [Form. C 2 442] donne quelques exemples des valeurs de résistances moyennes relevées avec des échantillons d'essences très diverses.

2.1.2 Qualité technologique

On distingue ainsi la qualité réelle, *pratique*, des bois faisant partie d'un lot bien défini destiné à un ouvrage.

Cette qualité ou ce *classement* sera fonction des inévitables défauts et altérations présents sur les pièces concernées, et permettra de leur attribuer, faute d'essais, des valeurs de résistances forfaitaires, nécessairement plus basses, bien entendu, que celles que l'on peut mesurer sur de petits échantillons sans défaut.

Le classement des bois peut être effectué par un examen visuel, la présence de défauts sur une pièce conduisant, en fonction de leur importance et de leur groupement, à un déclassement plus ou moins important de celle-ci.

Les critères de classement des bois de construction, actuellement en vigueur en France, sont donnés par la norme NF B 52-001 qui définit trois catégories. Cette norme est actuellement en révision. Des définitions plus conformes aux nécessités actuelles sont intégrées aux prescriptions techniques de certaines *marques de qualité* contrôlées par le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (marques *CTB-Charpente Industrialisée* et *CTB-Sciage*). Une norme européenne existe également au stade expérimental.

Il faut noter, enfin, que l'on assiste au développement d'une technique de classement automatique, fondée sur la bonne corrélation statistique existant entre la contrainte de rupture en flexion des pièces de bois et leur module d'élasticité en flexion ; ce fait permet de procéder à une mesure industrielle dudit module (assimilable à un essai non destructif), et conduit à une utilisation plus économique et plus fiable du matériau.

D'autres équipements sont en cours de développement ou en phase d'expérimentation industrielle ; ils sont le plus souvent fondés sur une *analyse morphologique* des planches (comparable à la méthode de classement visuel) et font appel à la mesure automatique (et à l'interprétation informatisée) de divers paramètres tels que la masse volumique, les pentes de fil, la dimension et la position des nœuds, le module d'élasticité axial dynamique, etc.

2.1.3 Contraintes admissibles

Les *Règles de conception et de calcul des charpentes en bois* (Règles CB 71) établissent les contraintes admissibles sur la base d'un coefficient de sécurité de 2,75 (ou de 3 pour les règles simplifiées).

Le tableau 4 en [Form. C 2 442] résume les principales valeurs de calculs utilisables pour les bois massifs et lamellés-collés, résineux, de catégorie II (seule classe de qualité couramment utilisée actuellement). Ces valeurs sont données pour un taux d'humidité moyenne des bois de 15 %.

Il est à noter que les contraintes admissibles doivent être réduites lorsque l'on prévoit que ce taux sera supérieur à 15 %. Le tableau 5 en [Form. C 2 442] donne les coefficients correcteurs à appliquer pour les bois résineux.

Enfin, pour les pièces en bois massif seulement, dans le cas des sollicitations en flexion, les valeurs des tableaux 4 et 5 doivent être corrigées pour toutes les pièces d'une hauteur différente de 15 cm (tableau 4 en [Form. C 2 442]).

2.1.4 Comportement rhéologique

La rhéologie du bois est assez complexe dans sa théorie. On peut résumer sommairement les faits comme suit.

Le domaine d'élasticité du bois, pour les sollicitations axiales (traction, compression et flexion) de courte durée s'étend pratiquement jusqu'aux contraintes de rupture.

Lorsque les contraintes sont maintenues dans le temps, le phénomène de *fluage* intervient. Celui-ci est d'autant plus marqué que les contraintes sont élevées et que l'humidité du bois est forte. Bien que ce phénomène ait tendance à s'atténuer considérablement avec le temps et à se stabiliser dans la pratique, il est extrêmement difficile de lui assigner expérimentalement une limite asymptotique. On est donc en face d'un comportement viscoélastique ou de *plasticité différée*.

L'effet de fluage est considéré comme nul pour des valeurs de contraintes inférieures au vingtième environ des contraintes de rupture.

Ces faits ont permis d'établir des règles assez simples qui se traduisent, au niveau du calcul des structures, de la façon suivante :

- définition de *modules d'élasticité* utilisables dans les cas les plus courants et pour les charges temporaires (moins de trois mois consécutifs et moins de la moitié du temps) ;
- définition d'un ensemble de *coefficients de fluage* dépendant des niveaux de contraintes, de l'humidité moyenne des pièces et de la variation de celle-ci. Ces coefficients sont applicables pour les niveaux de contrainte supérieurs au cinquième de la contrainte admissible $\bar{\sigma}$ et pour les charges de longue durée (plus de trois mois consécutifs ou plus de la moitié du temps). Ils sont utilisés dans les calculs comme multiplicateurs des déplacements ou diviseurs des modules d'élasticité (tableau 7 en [Form. C 2 442]).

2.1.5 Modules d'élasticité

Des modules d'élasticité sont définis pour chacun des types de sollicitations énumérés précédemment, au moyen d'une formule

qui les lie à la contrainte admissible correspondante et qui, dans la réglementation actuelle, est de la forme $E = K\sqrt{\sigma}$ (cf. tableau 4, en [Form. C 2 442]).

2.1.6 Limites élastiques conventionnelles

En raison de ce comportement rhéologique, il est impossible de définir expérimentalement la limite de la phase élastique du bois (sauf dans le cas de la compression transversale). Une limite élastique *conventionnelle* a donc été établie afin de permettre une certaine normalisation des méthodes de justification. Cette limite doit surtout être considérée comme une contrainte admissible extrême, utilisable, par exemple, dans les méthodes de calcul *aux états-limites*.

Les limites élastiques conventionnelles se déduisent des contraintes admissibles par un jeu de coefficients multiplicateurs dépendant de la sollicitation (cf. tableau 4 en [Form. C 2 442]) :

– traction axiale	2,25
– flexion statique	1,75
– compression axiale	1,50
– cisaillement axial	
– traction transversale	

2.1.7 Approche probabiliste de la sécurité

Quoi qu'il en soit, il convient de préciser (bien que cela n'apparaisse encore nulle part dans la réglementation en vigueur) qu'une approche statistique de la résistance des bois en dimensions d'emploi et en fonction de leur classement est pratiquée en France (comme dans certains autres pays).

Cette approche s'appuie sur des essais de flexion en nombre (100 à 200 pièces par section et par classe de qualité) qui permettent de définir la *contrainte caractéristique de flexion*, valeur des 5 % d'exclusion inférieure des contraintes de rupture en flexion pour le lot de référence et dans les conditions d'essais (normalisation à venir).

Cette valeur est proposée comme nouvelle définition des classes de qualité de bois pour usages structurels, quelle que soit la méthode de classement utilisée.

2.2 Bois lamellés-collés

2.2.1 Caractéristiques

On appelle ainsi des pièces reconstituées à partir d'éléments (*lamelles*) d'assez faibles sections, aboutés (§ 3.5) et recollés entre eux *à fil parallèle* de façon à obtenir des sections plus importantes, multiples des premières (figure 2).

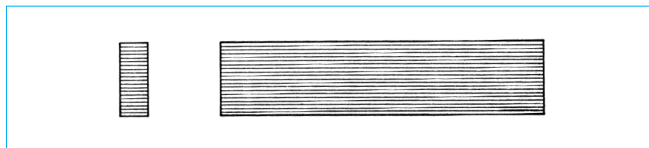


Figure 2 – Élément lamellé-collé de poutre droite

Cette technique présente de nombreux avantages qui viennent s'ajouter à ceux du bois lui-même :

- la section et la longueur des éléments finals ne sont plus limitées par les dimensions des pièces initiales, ce qui permet en outre de revaloriser certains sciages de faibles sections ;
- on peut, au moment du collage effectué sur gabarit, obtenir des formes courbes à peu près quelconques, ce qui permet de recourir à des solutions constructives particulièrement intéressantes tant sur le plan mécanique (arcs par exemple) qu'esthétique ;
- en outre, le processus de fabrication incorpore nécessairement une phase de tronçonnage des sciages initiaux, qui permet l'élimination des défauts naturels, et une phase de reconstitution, qui conduit à une distribution aléatoire des défauts résiduels à l'intérieur du produit fini ; il en résulte une amélioration des contraintes moyennes de rupture sous sollicitations axiales et une réduction encore plus nette des écarts statistiques. Cela a permis, du point de vue réglementaire, d'attribuer aux éléments de structures en bois lamellé-collé des contraintes admissibles légèrement supérieures à celles des bois massifs de qualité équivalente à celle des lamelles constitutives.

Le tableau 4 en [Form. C 2 442] indique les valeurs de calcul admises par les Règles CB 71 pour les pièces lamellées-collées. Les coefficients concernant les hauteurs différentes de 15 cm ne sont pas applicables pour les bois lamellés-collés.

La fabrication des éléments lamellés doit respecter certaines *règles de lamellations* (figurant dans les Règles CB 71) que nous résumons ci-après :

- largeur maximale des lamelles : 25 cm ;
- épaisseur maximale des lamelles : 5 cm ;
- section maximale des lamelles : 40 à 70 cm² selon les essences (70 cm² dans le cas des résineux couramment utilisés) ;
- rayon de courbure minimal : 160 fois l'épaisseur d'une lamelle.

Du point de vue des valeurs de calcul, il faut tenir compte des notions de section efficace et de qualité technologique utile :

- la *section efficace* en un point donné est celle qui est définie par l'ensemble des lamelles d'une pièce, qui ne sont pas interrompues par l'extrados ou l'intrados de la pièce à moins de 2 m de ladite section (figure 3) ;
- la *qualité technologique utile* d'une pièce, lorsqu'elle n'est sollicitée qu'en flexion pure ou combinée de compression, est la qualité des seules lamelles des quarts extérieurs de sa hauteur. Les valeurs de calcul de cette qualité de bois sont utilisables pour la totalité de la pièce. Il est admis que la moitié centrale de la hauteur peut être de la classe de qualité immédiatement inférieure (figure 4).

2.2.2 Choix des constituants

La conception des ouvrages en bois lamellé-collé s'appuie en général, comme nous venons de le voir, sur les caractéristiques du sapin (abîes) et de l'épicéa (picéa). D'autres essences des zones tempérées ou tropicales peuvent être utilisées sous réserve que leur collage puisse être réalisé correctement, ce qui suppose un examen préalable des points suivants :

- rétractibilité (elle doit être faible ou moyenne) ;
- masse volumique (elle ne doit pas être trop élevée : au-delà de 600 à 700 kg/m³, des difficultés importantes peuvent être rencontrées) ;
- résilience ;
- compatibilité chimique avec la colle.

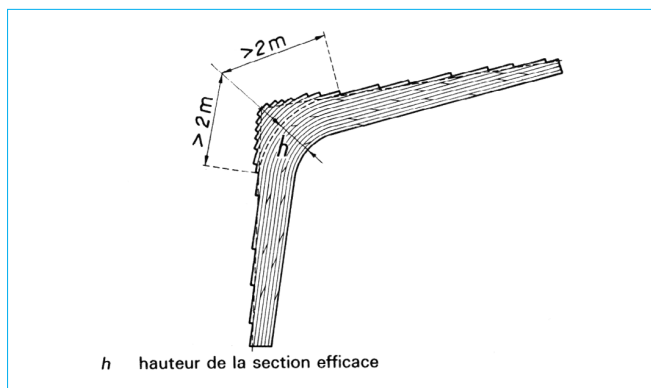


Figure 3 – Section efficace de calcul d'une pièce lamellée-collée

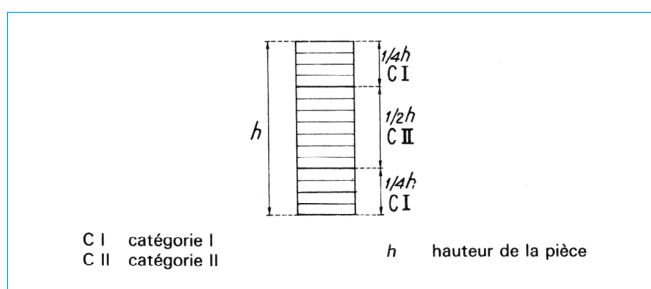


Figure 4 – Qualité technologique utile d'une pièce lamellée-collée

Parmi les essences possibles et dont les niveaux de prix peuvent être admis dans certains cas, nous citerons :

- essences des régions tempérées : douglas (pin d'Orégon), épicéa, hêtre, pin sylvestre, sapin, western hemlock, mélèze ;
- essences tropicales ou équatoriales : framiré, ilomba, limba (ou fraké), olon, avodiré, bossé, ozigo, sipo.

Le choix des colles sera fait essentiellement en fonction des conditions d'exploitation hygrothermique de la structure.

Le tableau 8 en [Form. C 2 442] résume ces conditions.

2.3 Panneaux contreplaqués

2.3.1 Caractéristiques

Les panneaux contreplaqués sont des éléments de faible épaisseur (5 à 25 mm en pratique), constitués de *plis* minces (0,3 mm à 4 ou 5 mm) obtenus par tranchage ou par déroulage et recollés entre eux à *fil croisé* (généralement à 90°).

À de très rares exceptions près, ils sont constitués d'un nombre impair de plis, le pli central étant dénommé *âme*.

On définit un sens longitudinal, parallèle au fil des plis externes, et un sens transversal, perpendiculaire à celui-ci.

Les panneaux peuvent être constitués d'essences différentes pour les plis externes et internes. La nature et l'épaisseur des différents plis définissent la *composition* du panneau.

Les essences les plus utilisées pour le contreplaqué à fonctions mécaniques sont l'okoumé, le pin d'Orégon (Canada), le pin maritime (France), le bouleau, le hêtre. Les dimensions disponibles sont,

en largeur, de l'ordre de 120 à 150 cm (122 et 150 cm notamment) ; en longueur, de 240 à 310 cm environ (244, 250 et 305 cm essentiellement) ; des longueurs plus grandes peuvent être obtenues exceptionnellement par la technique du *scarfage* (joint collé en sifflet).

La présentation dimensionnelle et les performances mécaniques de ce matériau rendent son utilisation intéressante dans de nombreux types de structures (goussets de fermes, âmes de poutres et de portiques).

D'une façon générale, les caractéristiques mécaniques des panneaux contreplaqués sont déduites directement de celles des essences ayant servi à leur fabrication.

2.3.2 Contraintes admissibles

La méthode la plus généralement admise consiste à affecter au panneau une contrainte admissible, fonction de l'essence utilisée et proportionnelle à l'épaisseur totale des plis de fil parallèle à la sollicitation. Dans le cas de la flexion, on peut prendre la somme des moments quadratiques des plis de fil parallèle à la direction de flexion et leur affecter la contrainte admissible de l'essence utilisée.

2.3.3 Modules d'élasticité en traction

En l'occurrence, il est admis d'utiliser un module déduit de celui de l'essence ayant servi à la fabrication.

Dans le cas d'une sollicitation dont la direction fait un angle de 45° avec les deux directions de fil, on affecte cette valeur du coefficient 1/3.

2.3.4 Modules d'élasticité en flexion

Il sera calculé en fonction de l'épaisseur et de la position des plis de fil parallèle à la sollicitation, en utilisant les modules des bois massifs correspondants (tableau 4 en [Form. C 2 442]) et en négligeant l'effet des plis transversaux (cf. Règles CB 71). À défaut, on peut utiliser pour les contreplaqués une valeur globale (en MPa) de l'ordre de :

- 4 000 pour l'okoumé ;
- 6 000 pour le pin maritime (sens longitudinal) ;
- 3 000 pour le pin maritime (sens transversal) ;
- 8 000 pour le bouleau (sens longitudinal) ;
- 4 000 pour le bouleau (sens transversal).

Lorsque l'emploi est prévu en atmosphère humide ou avec une exposition partielle aux intempéries, on choisira des contreplaqués *extérieurs* dont les collages présentent une tenue très supérieure (fabrications titulaires de la marque *CTB-X*, par exemple).

2.4 Panneaux de particules

Les panneaux de particules, obtenus par découpage du bois en particules de quelques millimètres, et réagglomérés sous presses à l'aide de résines synthétiques en très faibles quantités, se présentent en panneaux d'assez grandes dimensions (360 × 170 cm et 410 × 183 cm, par exemple). Les caractéristiques mécaniques, nettement plus faibles que celles des panneaux contreplaqués, donnent à ce matériau une vocation principalement de remplissage ; mais, en raison de son coût de production assez bas et des épaisseurs assez importantes qu'il présente (jusqu'à 45 mm), il est économiquement intéressant de l'exploiter dans les utilisations en flexion, en tant que support de couverture ou support de plancher.

Du fait des taux de fluage relativement élevés et des modules d'élasticité variant en fonction inverse des épaisseurs de fabrication, le calcul en flexion des éléments en panneaux de particules est très délicat, et il est préférable d'indiquer des tables d'épaisseurs nécessaires en fonction des charges et des portées. Nous extrayons, dans le tableau 9 en [Form. C 2 442], des valeurs relevées dans le DTU n° 31-2.

2.5 Lamibois

En France, on désigne par ce terme un type de matériau dérivé du bois qui a vu ses premières réalisations aux États-Unis sous la désignation commerciale *Microlam* puis en Finlande sous la désignation (également commerciale) de *Kertopuu*. Le principe de réalisation de ce matériau est identique à celui du bois lamellé-collé (collage à fil parallèle) mais la particularité provient de l'utilisation de placages minces (2 à 5 mm) de bois (obtenus par déroulage, tranchage plan ou tranchage circulaire à rayon constant) au lieu de planches sciées.

Ce produit, plus coûteux par unité de volume que le lamellé-collé, nécessite des installations de production très lourdes (d'une organisation voisine de celles produisant le contreplaqué) mais permet d'atteindre des performances mécaniques élevées et homogènes qui semblent orienter son emploi vers des éléments de faibles sections entrant par exemple dans la constitution de produits composites tels que des poutres en I.

3. Technologie et calcul des assemblages

Les assemblages constituent toujours les points faibles de la construction. Il faut donc donner un soin particulier à leur conception et à leur exécution. On tiendra compte, à cet effet, des prescriptions générales ci-après :

- ajuster les pièces de façon précise et sans jeu ;
- vérifier soigneusement toutes les fatigues locales : efforts longitudinaux dans les barres ; efforts transversaux ; accorder une attention toute particulière à la possibilité de rupture des pièces par cisaillement (distance entre boulons, longueur libre à l'avant ou à l'arrière de l'assemblage, où sont susceptibles de se développer des contraintes de cisaillement) ;
- la résistance du bois à la traction transversale étant très faible, éviter ce genre de sollicitation, ou prévoir des agencements s'opposant aux ruptures possibles du bois ;
- d'une manière générale, éviter dans les pièces principales les modes d'assemblage qui obligent à pratiquer des entailles ou mortaises réduisant leur section totale de plus de 1/3, ou amenant à sectionner des fibres dans les zones soumises à des contraintes de traction.

3.1 Assemblages traditionnels

Ce sont des assemblages *bois sur bois*, qui font surtout intervenir les résistances à la compression (axiale ou transversale). Les plus connus sont les assemblages dits à tenons et mortaises, à embrèvement, à entailles, à clés, à chevilles. On les rencontre dans tous les types anciens de charpente, qui étaient d'ailleurs conçus de manière à les utiliser seuls.

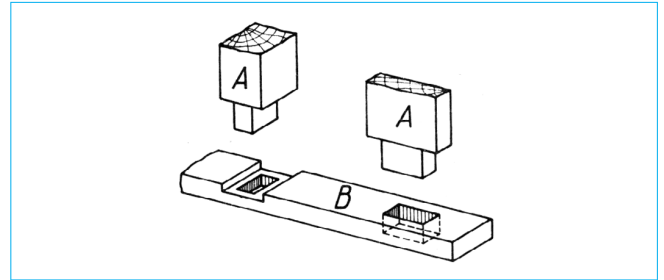


Figure 5 – Assemblages à tenons et mortaises

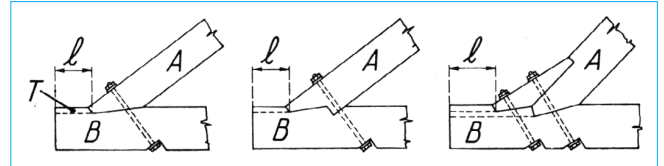


Figure 6 – Assemblages à embrèvement

3.1.1 Tenons et mortaises

Une pièce A vient buter contre une pièce B d'axe perpendiculaire ; A supporte une compression axiale, B une compression transversale (compression en général *localisée*) (figure 5). La *section d'appui* doit être suffisante pour que la contrainte de sécurité à la compression transversale ne soit pas dépassée. L'équarrissage de A est donc déterminé par cette dernière, et non par la contrainte de compression axiale qu'elle supporte.

3.1.2 Embrèvement

Une pièce A vient buter contre une pièce B, d'axe oblique par rapport à A ; A supporte une compression axiale (figure 6) B est soumise de ce fait à une compression transversale et une compression longitudinale qui détermine en même temps une contrainte de cisaillement sur le *talon* T en arrière de l'assemblage. Celui-ci doit avoir une longueur suffisante, ℓ .

3.1.3 Réalisation et calcul

Ces assemblages doivent être réalisés de telle sorte que les pièces soient bien ajustées, sans jeu, et portent exactement sur toute la section d'appui (épaulements et fonds des mortaises).

Le calcul en est simple : vérifier que les contraintes à la compression transversale et au cisaillement, notamment, ne dépassent pas les contraintes de sécurité. La longueur du talon doit être respectée le cas échéant.

Ces assemblages conduisent à de forts équarrissages des pièces, en raison de ce qui précède et des fortes entailles qui diminuent la *section nette* des pièces travaillantes.

3.2 Assemblages mécaniques des systèmes moisés

3.2.1 Caractéristiques

Contrairement au cas des assemblages traditionnels dans lesquels on crée une liaison *bois sur bois* par exécution de profils

complémentaires sur des pièces situées dans un même plan, le moisement des pièces (doublage de certaines barres) permet d'assembler *latéralement* des pièces juxtaposées, mais fait nécessairement appel à des pièces intermédiaires généralement métalliques (pointes, aiguilles, broches, boulons et organes complémentaires du boulonnage) qui seront sollicitées en cisaillement par l'effort d'assemblage.

Le principe de fonctionnement et de calcul est le même, qu'il s'agisse de pointes, de broches ou de boulons. Dans chaque cas, le diamètre desdits organes constitue le paramètre essentiel à partir duquel sont évalués les écartements minimaux à respecter entre chaque organe, parallèlement et perpendiculairement au fil du bois, l'éloignement minimal des bords chargés (sollicités en traction) ou non chargés, ainsi que la charge admissible par organe.

L'épaisseur des pièces assemblées est un paramètre important. Différents cas de cisaillement sont envisagés : cisaillement simple, double, symétrique ou multiple, selon que le nombre de pièces assemblées est de deux, trois, quatre ou plus.

Nous donnons ci-après, à titre indicatif, un récapitulatif des valeurs de charges admissibles des pointes et boulons dans les cas les plus courants, telles qu'elles sont indiquées dans les Règles CB 71. Pour des renseignements plus détaillés et pour les autres cas, on se reportera aux tableaux **10** et **11** du [Form. C 2 442].

Charge admissible des boulons et des pointes

des bois résineux secs :

— simple cisaillement	$F = 80 \varnothing \sqrt{a}$
— double cisaillement	$F = 200 \varnothing \sqrt{a}$
— cisaillement multiple	$F = 160 \varnothing \sqrt{a}$

avec a (cm) épaisseur de la pièce la plus mince,
 \varnothing (cm) diamètre,
 F (daN) effort (ou charge) admissible.

Conditions d'application :

$$\varnothing \leq \frac{a}{11} \text{ pour les pointes}$$

$$\varnothing \leq \frac{a}{6} \text{ pour les boulons}$$

— distance transversale minimale

entre files de	boulons :	3 \varnothing
	pointes :	5 \varnothing

— distance longitudinale minimale

entre deux	boulons :	6 \varnothing
	pointes :	10 \varnothing

— distance longitudinale minimale entre l'about ou le bord chargé d'une pièce et

	un boulon :	6 \varnothing et 10 cm au moins
	une pointe :	12 \varnothing

Dans tous les cas, il faudra veiller à ce qu'un décalage par rapport à la grille théorique de position des clous soit effectué de façon que deux organes consécutifs ne soient pas situés sur la même fibre de la pièce, et réduire les risques de fendage.

3.2.2 Organes complémentaires du boulonnage : goujons, anneaux, crampons

Le point faible d'un assemblage par boulonnage étant toujours la contrainte de compression localisée dans le bois ou la contrainte de cisaillement consécutive, on peut en augmenter considérablement la résistance en accroissant la surface de contact bois-boulon au

moyen, par exemple, d'un goujon, sorte de manchon métallique entourant la tige du boulon au niveau de chaque plan de cisaillement.

Une autre solution consiste à disposer des anneaux ou des crampons qui ne sont pas nécessairement au contact du boulon, mais transfèrent directement les efforts d'une pièce de bois à l'autre.

Dans tous les cas, ces organes nécessitent la présence de boulons afin d'assurer le serrage et le maintien de l'assemblage. Le boulon est donc en fait un organe complémentaire puisque c'est l'anneau, le goujon ou le crampon qui assurent le transfert de la majorité des efforts de cisaillement.

L'utilisation de ces organes est illustrée par la figure 7.

Ces pièces, en fonte ou en acier, fabriquées par des sociétés spécialisées, présentent l'inconvénient d'augmenter le prix de revient et souvent de nécessiter des usinages complémentaires des pièces de bois pour leur mise en place.

Il n'y est donc fait appel que lorsque des efforts particulièrement importants doivent passer dans l'assemblage considéré.

Certains types d'anneaux et de crampons munis de tétons, venus de fonderie ou fabriqués en tôle d'acier dentelée, ne nécessitent pas d'usinage et sont enfoncés dans le bois par le seul effort de serrage des boulons associés. Ils présentent l'inconvénient de ne permettre que des efforts sensiblement plus faibles que les précédents.

On se référera, pour le calcul de ces organes, aux valeurs indiquées par les fabricants ou à des résultats d'essais particuliers.

3.2.3 Assemblages mixtes

On désigne sous ce terme l'utilisation, dans un même assemblage, de boulons et de pointes. Cette solution permet parfois d'obtenir une meilleure *densité* de résistance (résistance par unité de surface) pour un prix de revient assez réduit.

Le calcul théorique consistera à additionner simplement la résistance procurée par chaque type d'organe.

Le rapport optimal semble être de quatre à cinq pointes pour un boulon.

3.3 Goussets en contreplaqué et connecteurs métalliques

Le principe du gousset, qui assemble des pièces de même épaisseur, situées dans un même plan, présente d'importants avantages. En effet :

- les usinages dans les barres sont inexistants ou se réduisent, en about, à de simples coupes droites ;
- le dimensionnement des éléments d'assemblage ne se répercute pas sur les sections des barres, ce qui est toujours le cas pour les assemblages traditionnels et souvent pour les assemblages par moisement.

Le développement de cette méthode d'assemblage est donc actuellement très fort pour les charpentes en bois et se manifeste sous trois formes principales.

3.3.1 Goussets en contreplaqué

Ils peuvent être cloués, collés, collés-cloués ou collés-agrafés. Le recours au collage, plus délicat à contrôler en production et légèrement plus coûteux que le clouage, présente l'avantage de conférer à la structure une rigidité sensiblement supérieure (glissement réputé nul pour les calculs de déformation globale).

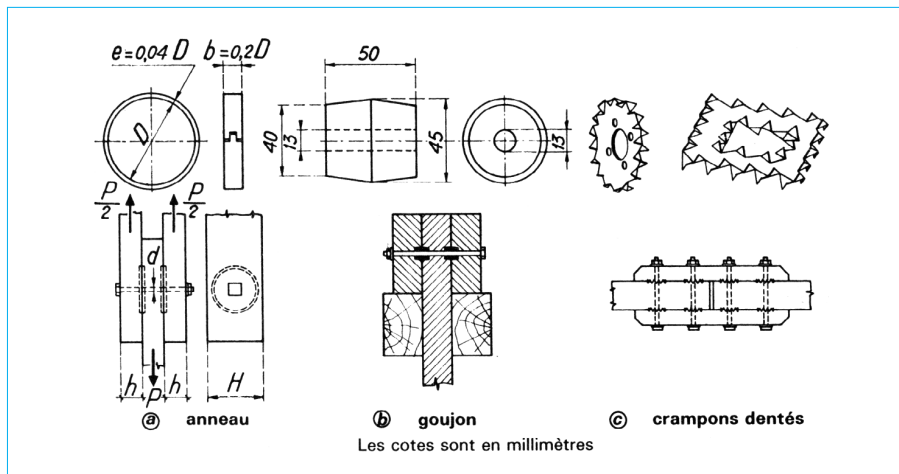


Figure 7 – Organes d'assemblage

Ils sont utilisés pour la réalisation de fermes de portée faible à moyenne (6 à 15 m), de petits portiques (arches à volailles, etc.) et comme assemblage complémentaire sur chantier.

Les tableaux 12 et 13 en [Form. C 2 442] donnent les valeurs des efforts (ou charges) admissibles pour les pointes fixant des goussets en contreplaqué.

3.3.2 Goussets en tôle d'acier pour charpentes lourdes

Ces goussets en tôle épaisse (3 mm et plus), fixés par boulonnage, sont utilisés fréquemment pour les charpentes triangulées de portées intermédiaires (15 m et plus) et constituent la méthode d'assemblage la plus répandue dans les ouvrages en bois lamellé-collé : assemblages d'angles, de clef d'arc, de pied, de joints de transport, etc. Ils sont parfois réalisés, lorsque les formes sont complexes, en fonte d'acier ou d'aluminium.

3.3.3 Connecteurs métalliques

On désigne par ce terme :

a) des goussets en tôle mince galvanisée (0,8 à 1 mm) pré-perçés pour un clouage manuel ou mis en œuvre à l'aide de pistolets cloueurs pneumatiques ;

b) des plaques en tôle d'acier galvanisé, munies de dents (de 6 à 15 mm de longueur) par emboutissage et mises en œuvre à l'aide de dispositifs de pressage très divers que l'on peut rattacher à deux familles :

- les presses à rouleaux fonctionnant en laminoir ;
- les presses alternatives hydrauliques.

Ce type d'assemblage extrêmement économique et performant connaît actuellement en Europe continentale (après l'Amérique du Nord et la Grande-Bretagne) un essor très rapide sur le marché des fermes à faible écartement pour maisons individuelles, et devrait se développer progressivement sur le marché des bâtiments industriels et agricoles.

Le calcul de ce type d'assemblage est fondé le plus souvent sur un effort admissible en décanewtons par centimètre carré de recouvrement de la pièce concernée, parfois sur un effort admissible par dent ou par pointe.

Ces efforts, déterminés par essais pour chaque procédé ou marque commerciale, sont de l'ordre de 5 à 20 daN par centimètre carré.

3.4 Collage

3.4.1 Caractéristique

L'utilisation d'une liaison chimique à haute résistance dans les charpentes en bois a été permise, au début du siècle, par l'apparition des colles à base de caséine qui ont fait, depuis, place aux colles urée-formol et résorcine ou assimilées.

Le niveau de résistance (en traction et cisaillement) de ces colles, constituées d'une résine polymérisable et d'un durcisseur catalyseur, leur permet de reconstituer la cohésion naturelle transversale existant entre les fibres de bois.

Le collage de pièces de bois doit respecter certaines règles fondamentales :

- un collage n'est durable et résistant que si le plan de collage est parallèle ou sensiblement parallèle (jusqu'à 10 % de pente) aux fibres du bois. Au-delà de cette valeur angulaire, la résistance décroît très rapidement et devient insuffisante ;
- un bon collage ne peut être obtenu que sur du bois sec, le taux d'humidité limite dépendant des techniques et des colles utilisées, mais ne dépassant jamais 16 à 18 % ;
- les surfaces à coller doivent être les plus lisses et les plus propres possible ; elles doivent être correctement dressées et rabotées, mais non poncées en principe ;
- une pression doit être assurée pendant la polymérisation : très variable selon la technologie, elle peut atteindre 1,5 MPa mais n'est jamais inférieure à 0,25 MPa ;
- la nature de la colle et son pH doivent être définis en fonction des caractéristiques chimiques du bois : pH, résines, tannins ;
- les colles de charpente doivent supporter l'existence exceptionnelle de joints épais (jusqu'à 0,3 mm environ) en raison des tolérances d'usinage des pièces de bois, ce qui, dans le cas des colles urée-formol, suppose une *plastification* qui leur confère la qualification de *joint épais* ;
- d'une façon générale, un strict respect des recommandations du fabricant est indispensable.

Les applications du collage en charpente sont multiples :

- bois lamellé-collé (§ 2.2 et 4.5) ;
- aboutage par profils à entures multiples (§ 3.5) ;
- fabrication des panneaux contreplaqués (§ 2.3) ;
- fabrication de poutres composites par collage de bois et contreplaqué (§ 4.4).

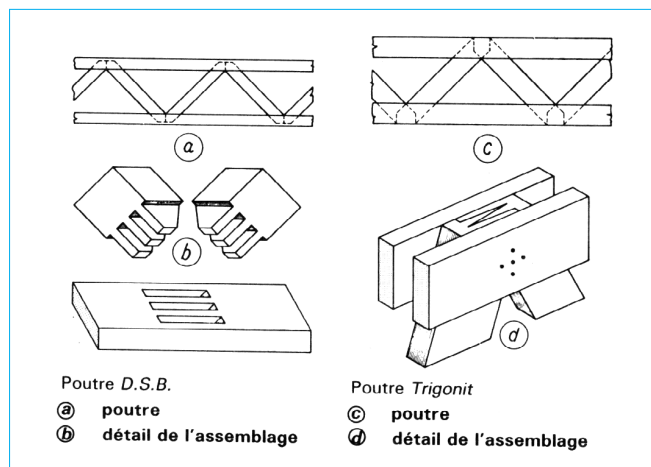


Figure 8 – Assemblage de treillis

3.4.2 Assemblage de treillis

Cette utilisation, qui consiste à appliquer le principe des entures multiples (ou *doigt de gant*) à des pièces non coaxiales n'est utilisé que dans certains procédés de préfabrication industrielle de poutres droites en treillis (figure 8).

3.4.3 Assemblage d'angle de portique

Ici encore, c'est le principe des entures multiples en coupe d'onglet qui est employé, la particularité résidant dans la taille des entures (jusqu'à 15 ou 20 cm de profondeur) qui est appropriée aux fortes sections des éléments en bois lamellé-collé.

3.4.4 Calcul des assemblages collés

La résistance utile des plans de collage est généralement évaluée à :

- 1,2 MPa en cisaillement ;
- 0,6 MPa en traction transversale,

compte tenu d'un coefficient de sécurité théorique de 3.

Cependant, ces valeurs sont modulées en fonction des types d'application, de la nature des colles, de la fiabilité des technologies employées, et nous renvoyons pour cela aux paragraphes correspondants (§ 2.2 ; 2.3 et 3.5).

3.5 Aboutage

L'aboutage consiste à assembler par collage bout à bout, coaxialement, deux ou plusieurs pièces de bois de même section de façon à obtenir un élément de plus grande longueur.

Cela est réalisé grâce à l'exécution (à chaque extrémité des pièces à assembler) d'un profil de dents trapézoïdales dont les flancs ont une pente inférieure à 10 % par rapport à l'axe géométrique de la pièce (figure 9).

L'usinage, l'encollage et le pressage sont confiés à des chaînes automatisées qui représentent un investissement assez lourd. Un contrôle strict de la fabrication est indispensable.

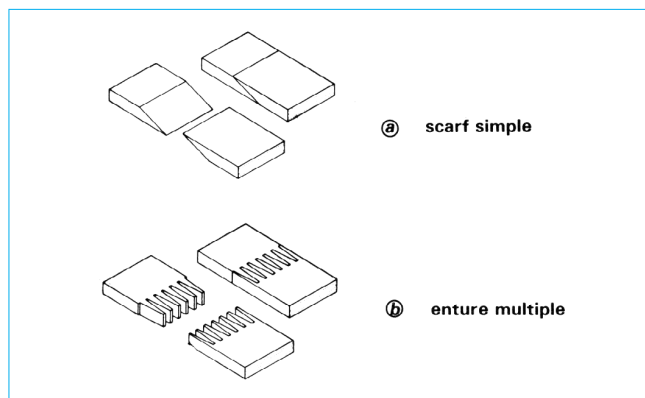


Figure 9 – Aboutage

Les applications de cette technologie en charpente sont les suivantes :

- amélioration de la qualité technologique et augmentation des longueurs des bois bruts par purge préalable des défauts et aboutage ;
- préparation des lamelles constitutives des pièces lamellées-collées de grande longueur ;
- préparation des membrures dans certaines fabrications de poutres composites (§ 4.4).

● **Résistance utile** : sur le plan des principes, la résistance d'un aboutage doit être telle que celui-ci ne constitue pas un point faible dans la pièce obtenue. Cette performance, relativement aisée à atteindre industriellement dans le cas des essences résineuses légères, l'est d'autant moins que la résistance naturelle de l'essence employée est plus élevée.

4. Systèmes constructifs

Le recours aux trois formes principales du bois : bois massifs, bois lamellé-collé, panneaux de contreplaqué, combiné au choix des différentes méthodes possibles d'assemblage, permet une extrême variété dans la conception des structures portantes en bois dont nous allons examiner les principaux types.

4.1 Charpente traditionnelle

Les assemblages traditionnels de charpente (§ 3.1), malgré les exemples de belles charpentes anciennes qu'ils ont permis de construire, présentent des inconvénients majeurs qui ne permettent plus de les considérer comme satisfaisants. Ils constituent des systèmes *déformables*, sensibles aux efforts dissymétriques ou latéraux (action du vent, tassement des appuis, etc.) :

- ils font appel à des *assemblages bois sur bois*, entaillant profondément les pièces ;
- ils ne sont pas *facilement calculables*. Il en résulte des *équarissages élevés* des pièces constitutives, conduisant à une consommation de bois nettement supérieure à celle qui serait strictement nécessaire.

La figure 10 montre les types les plus courants de fermes traditionnelles : à poinçons et contrefiches (figure 10 a), à entrails obliques (figure 10 b), à entrail retroussé (figure 10 c). Ils permet-

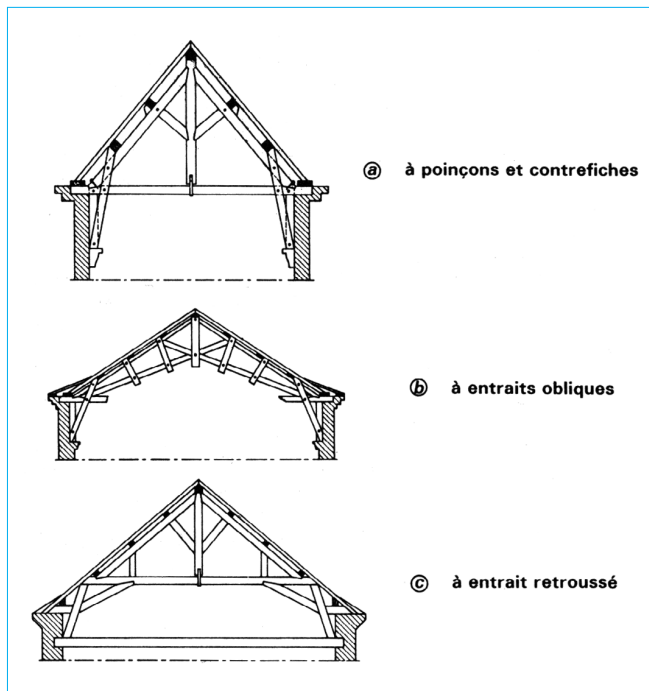


Figure 10 – Types de fermes traditionnelles

tent de couvrir des portées de 3 à 8 et 10 m, avec un espacement entre fermes de l'ordre de 3 à 5 m (4 m est l'espacement courant).

On ne fera appel aux systèmes traditionnels que dans des cas particuliers (combles d'habitations, recherche d'effets décoratifs, restauration d'anciens bâtiments, etc.). Chaque fois qu'il s'agira de bâtiments agricoles ou industriels dont les charpentes ont plus de 6 à 8 m de portée, on aura recours aux systèmes décrits ci-après, qui permettent de réaliser, en même temps qu'une économie de matière, des constructions offrant toutes garanties de stabilité.

4.2 Treillis moisé

Le principe de la composition de *structures triangulées*, à l'aide de pièces alternativement simples et moisées, et permettant de recourir aux méthodes d'assemblage par juxtaposition (§ 3.2), remonte à la fin du siècle dernier et a connu un très important développement au cours de la première moitié de celui-ci. Il est encore très souvent utilisé, en dépit de la vive concurrence des assemblages par goussets (§ 3.3), et plus particulièrement pour les constructions de portée intermédiaire (12 à 25 m).

On cherchera toujours à constituer les fermes de charpente par des systèmes triangulés classiques analogues à ceux utilisés dans la charpente métallique (cf. rubrique *Constructions métalliques* dans ce traité). Nous en donnons les principaux types à la figure 11.

On observera tout particulièrement les recommandations suivantes :

a) le système devra être rigoureusement triangulé, les fibres moyennes des différentes barres aboutissant exactement au centre des nœuds correspondants, les charges et réactions d'appui étant appliquées uniquement aux nœuds (figure 12) ;

b) si ces conditions ne sont pas remplies, on prendra en considération les efforts secondaires provenant de la non-convergence des

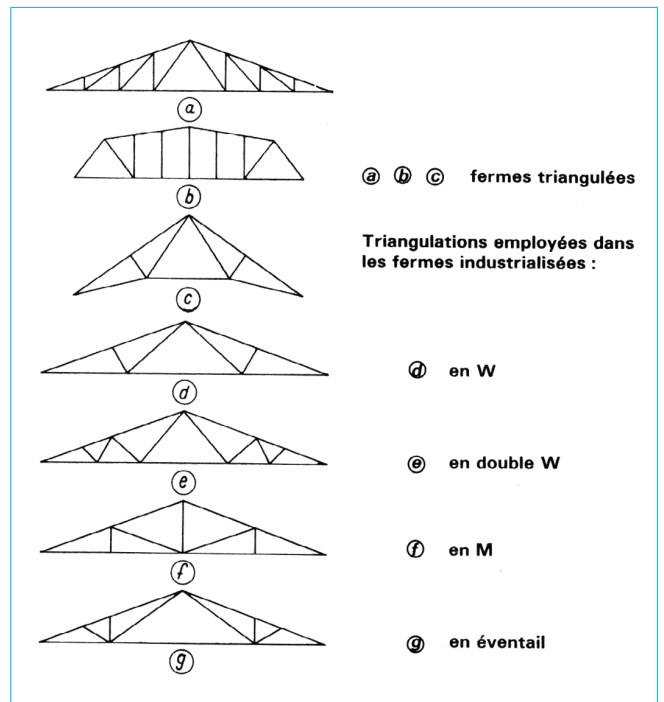


Figure 11 – Schémas de fermes triangulées

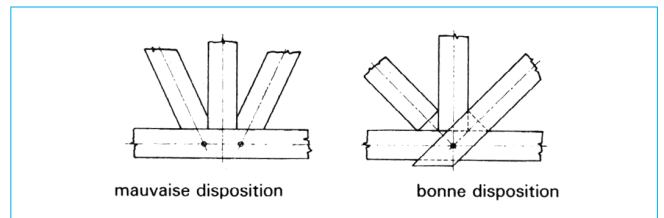


Figure 12 – Nœud de charpente

barres ou de l'application de charges dans l'intervalle entre nœuds ; ces efforts secondaires peuvent devenir très importants. Par exemple, pour une excentricité de l'effort de $1/3$ de la largeur de la barre, la fatigue peut être doublée ;

c) on conduira les calculs statiques en partant d'hypothèses bien définies, conformes à la réalité. On fera appel notamment aux calculs hyperstatiques chaque fois que cela sera nécessaire (appuis fixes) (cf. rubrique *Résistance des matériaux* dans ce traité) ;

d) on accordera une attention particulière à la réalisation des appuis (appuis à rouleaux, à rotules, à encastrement, etc.), de manière à les faire correspondre aussi exactement que possible aux hypothèses de calcul ;

e) de même, on s'attachera à réaliser des assemblages logiques, capables de supporter les efforts demandés aux barres, en traction et en compression.

Nous donnons une série de dessins de fermes triangulées (figure 13) montrant les dispositifs le plus généralement utilisés dans la pratique. Les nœuds principaux (sommets, appuis, etc.) y sont spécialement étudiés. Les modes d'attache des barres, notamment au sommet de la ferme et aux appuis, la disposition des pièces autour des nœuds, suivant qu'elles sont tendues ou comprimées,

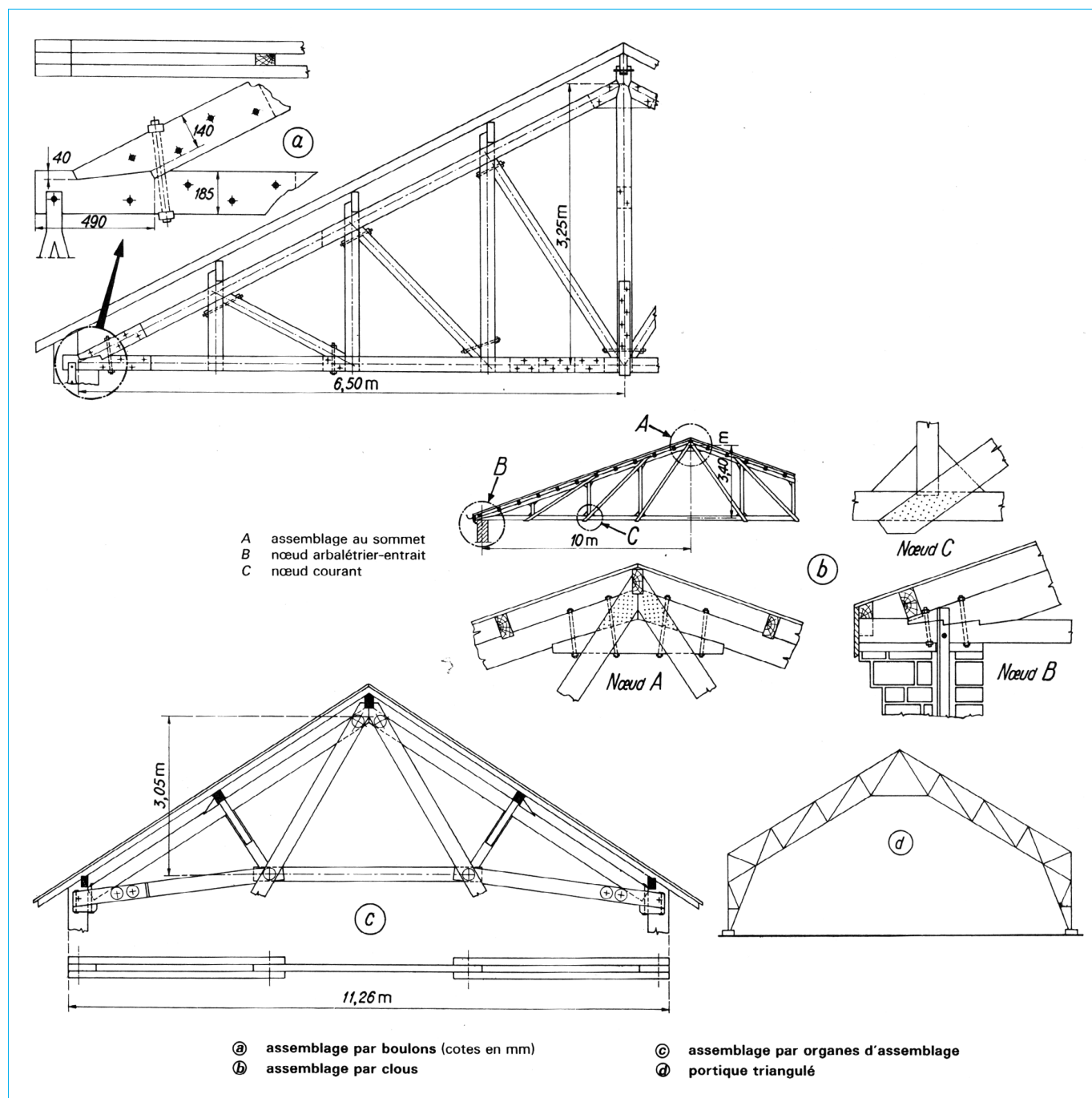


Figure 13 – Fermes triangulées. Exemples d'assemblages

posent dans chaque cas particulier des problèmes différents. Les exemples donnés permettront de traiter la plupart des cas de la pratique.

Les systèmes triangulés permettront de réaliser des fermes de toutes portées jusqu'à 20 m environ. Le calcul devra en être fait très soigneusement.

4.3 Treillis et fermes à goussets ou connecteurs

La technique des goussets en contreplaqué et des *connecteurs* métalliques pour l'assemblage des charpentes en bois (§ 3.3) per-

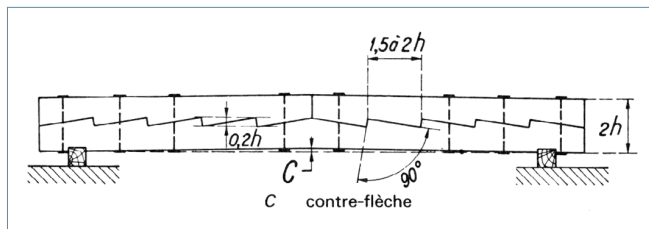


Figure 14 – Assemblage à crémaillère

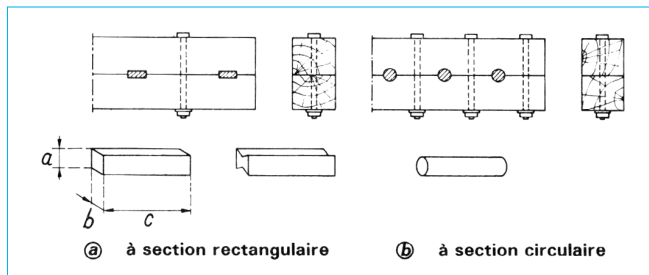


Figure 15 – Assemblage à clavettes

met une rationalisation considérable de la conception, de la fabrication en série et du levage des fermes ou poutres, ainsi qu'une optimisation des sections de bois.

Très largement utilisée actuellement pour la réalisation des charpentes préfabriquées pour combles perdus et pour combles habitables de maisons individuelles ou d'édifices de faible portée, cette technologie présente également un très grand intérêt pour les constructions de portées supérieures (jusqu'à 30 m et parfois plus). Dans ces derniers cas, si la recherche de l'économie est primordiale, on adopte, le plus souvent, la formule de fermes à écartement moyen (1 à 2 m suivant les types de couverture), préfabriquées en deux éléments jumelés et reposant sur une sablière en acier ou en béton qui assure la descente de charge, plutôt que la formule de l'arc ou portique complet en treillis dont le transport et le levage sont plus complexes.

4.4 Fermes, poutres et portiques composites

On qualifie de *composite* un élément ou un ensemble constitué de pièces multiples, éventuellement de matériaux différents : bois et contreplaqué, par exemple.

N'entrent dans cette définition ni les éléments lamellés-collés (§ 2.2 et 4.5) ni les poutres, dites *agglomérées*, à *crémaillère* (figure 14) ou à *clavettes* (figure 15), qui correspondent à une technologie maintenant périmée et que nous n'illustrons ici que pour mémoire.

Il faut cependant indiquer que des pièces lamellées-collées peuvent remplacer des pièces massives dans la constitution des éléments composites modernes.

Le principe le plus fréquemment mis en œuvre consiste à dissocier, dans le cas des utilisations en flexion, les fonctions de résistance aux moments d'une part, aux efforts tranchants d'autre part, en reportant le maximum de matière au niveau des fibres extrêmes de la pièce, comme on le fait dans le cas des profilés métalliques en I ou en H, et en ne conservant, pour résister aux efforts de cisaillement, au niveau de la fibre neutre qu'une *âme* de faible épaisseur.

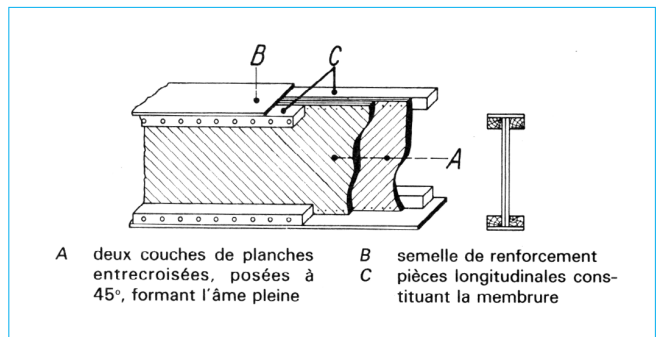


Figure 16 – Poutre composée à âme pleine

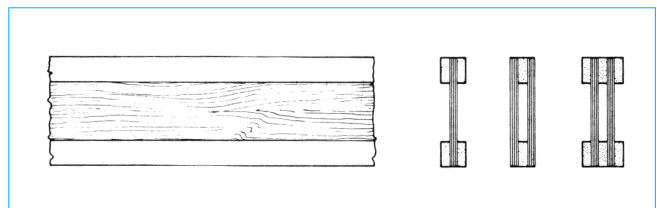


Figure 17 – Poutre à âme en contreplaqué

Ainsi furent constitués jadis des éléments dits *IPN bois*, à l'aide de trois pièces massives, deux constituant les membrures, une l'âme, assemblées longitudinalement par entures multiples collées.

La solution traditionnelle la plus répandue consistait néanmoins, pour la réalisation de poutres importantes, à constituer des âmes *en treillis jointif* ou *en parquet* à l'aide de planchettes jointives en deux lits croisés et inclinés à 45° par rapport à l'axe de la pièce.

Des membrures hautes et basses étaient ensuite rapportées en rives de l'âme et assemblées par clouage, ou collage et clouage (figure 16).

La forme moderne pour la réalisation de ce type de poutre consiste en une âme constituée d'une simple feuille en panneau contreplaqué, assemblée également par clouage ou, pour un meilleur rendement, par collage et clouage (figure 17).

Ces deux techniques permettent la réalisation de poutres à hauteur variable (donc à inertie variable), de fermes ou de portiques fonctionnant en arcs. Quelques essais ont été faits en remplaçant le panneau contreplaqué par un panneau de particules (§ 2.4). Toutefois, le taux de fluage de ce type de panneau conduit à épaissir l'âme et ne permet guère de dégager, pour l'instant, un intérêt économique quelconque.

Afin d'améliorer l'esthétique des structures réalisées ainsi que leur résistance à l'effet de déversement, la configuration en I peut être remplacée par une configuration *en caisson*, les pièces en contreplaqué étant rejetées à l'extérieur des membrures (figure 18).

Dans tous les cas, des raidisseurs transversaux doivent être disposés entre les membrures afin de réduire les risques de déversement.

Lorsque le nombre de membrures constituant la semelle haute ou la semelle basse est assez élevé (trois ou plus), celles-ci peuvent être interrompues (sans grande perte de résistance) afin de permettre l'utilisation de pièces de bois moins longues que la poutre. Il convient alors d'en tenir compte dans le calcul de la poutre et de s'assurer d'un décalage convenable des discontinuités d'une membrure à la suivante (20 à 30 fois l'épaisseur d'une membrure).

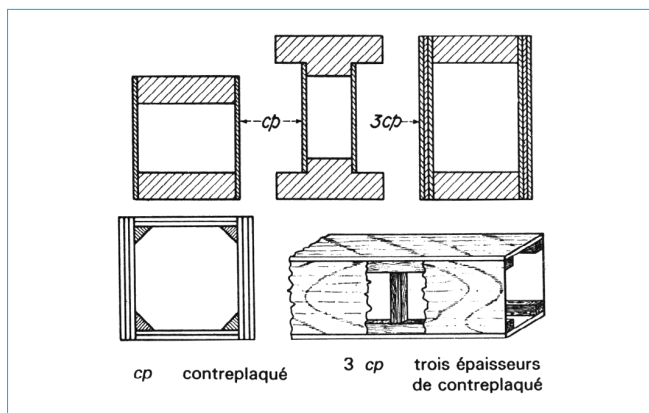


Figure 18 – Poutres en caisson exécutées en contreplaqué

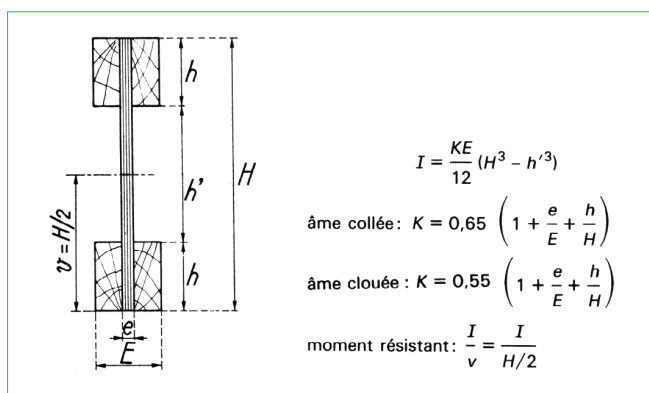


Figure 19 – Calcul d'inertie transversale des poutres en I ou fermes composées à âme en contreplaqué

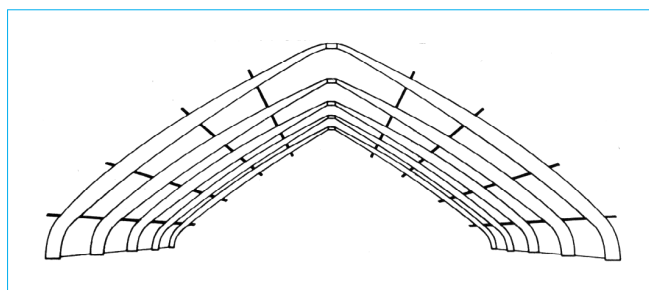


Figure 20 – Arc à trois articulations pour bâtiment à destination de silo (portée de 50 à 70 m)

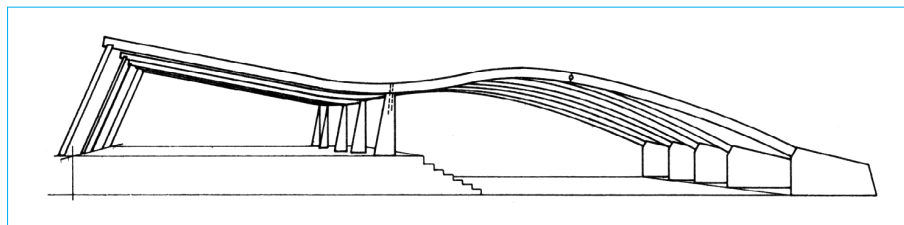


Figure 21 – Structure pour hall de sport : arcs de section constante ; moises sur appuis par les poutres droites (portée de 20 à 40 m et plus entre appuis)

La meilleure solution, sur le plan mécanique, consiste cependant à préparer des membrures de longueur égale à celle de la poutre au moyen d'un aboutage préalable (§ 3.5).

Une variante de ce type de poutre, déposée sous la marque *Wellsteg*, consiste en une âme en contreplaqué, ondulée longitudinalement et assemblée par collage dans une rainure (également ondulée) pratiquée dans chacune des deux semelles en bois massif. La particularité de ces poutres réside dans l'absence de raidisseur (du fait de l'ondulation de l'âme) et, surtout, dans la technique de fabrication en continu qui a été développée pour leur production.

Le calcul de l'inertie des éléments composites, en I ou en caisson, consiste à les considérer comme un élément massif d'encombrement égal, dont on calcule l'inertie, puis à en soustraire l'inertie des vides internes et enfin à affecter le résultat d'un coefficient réducteur expérimental qui permet de tenir compte, en particulier, du mode d'assemblage (figure 19).

4.5 Arcs et poutres en bois lamellé-collé

La lamellation et le collage de bois permettent, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.2, la réalisation de pièces de très fortes sections, à inertie variable, éventuellement courbes et de grande longueur. Cette possibilité, jointe aux caractéristiques de résistance au feu, d'inertie chimique, de légèreté, de rapidité, de mise en œuvre et de fabrication, ouvre au bois lamellé-collé un nombre croissant de marchés dans des domaines aussi divers que les bâtiments industriels et agricoles (figure 20), les bâtiments sportifs (stades couverts, salles de sports, patinoires, piscines, etc., cf. figure 21), culturels, commerciaux, cultuels.

Le plus grand nombre de ces réalisations se rattache, du point de vue du fonctionnement mécanique, à deux familles que nous distinguons arbitrairement : les poutres et les arcs.

4.5.1 Poutres

Les poutres, droites ou courbes, isostatiques ou hyperstatiques sont souvent associées à des infrastructures (mur, voiles, portiques ou poteaux) en béton et à des éléments secondaires en bois (pannes, contreventements) ou en acier (tirants, contreventements, pièces d'assemblage).

En raison de la souplesse géométrique intrinsèque de ce matériau et du fait de sa préfabrication *sur mesure*, des audaces architecturales sont possibles sans crainte d'augmentation importante des sujétions de fabrication ou du prix de revient.

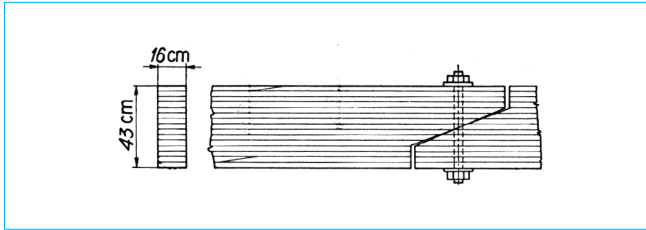


Figure 22 – Poutre droite lamellée avec articulation

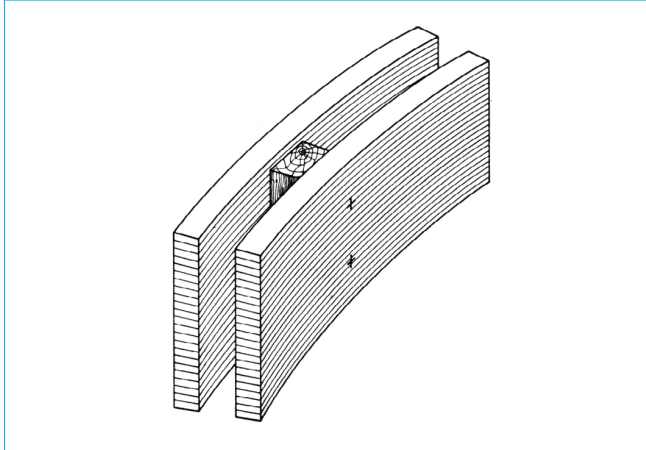


Figure 23 – Arcs jumelés lamellés-collés pour grande portée

Le type de section le plus généralement utilisé est rectangulaire (figure 22). Toutefois, lorsqu'une économie ou un allègement sont particulièrement souhaités, des sections en I ou, à l'inverse, en caisson peuvent être retenues. Dans le premier cas, on constituera en premier lieu l'âme, d'épaisseur plus faible et de hauteur variable en fonction des variations d'inertie nécessaires, puis on recollera en extrados et en intrados deux semelles plus larges, généralement de hauteur constante, constituées de trois ou quatre lamelles.

Dans le cas du caisson, on préfère généralement une technique se rapprochant de celle du jumelage (figure 23) et consistant à réassembler transversalement deux pièces possédant chacune une hauteur égale à la hauteur totale de la pièce définitive, en intercalant entre elles une fourrure haute et une fourrure basse affleurant l'extrados et l'intrados. Les pièces ainsi obtenues, peu sensibles au déversement, ont un comportement mécanique très voisin de celui d'une pièce pleine de même encombrement.

4.5.2 Arcs

Dans le cas des arcs (figure 24) qui peuvent d'ailleurs être considérés comme des cas particuliers de poutres, la technologie est identique, mais le mode de fonctionnement, particulièrement adapté au matériau, permet d'atteindre des portées considérables avec une importante économie de matière.

Des poutres libres de l'ordre de 100 à 110 m ont pu être réalisées sans difficultés majeures et les exemples de réalisation entre 25 et 80 m sont innombrables à l'heure actuelle.

Le calcul des arcs en bois lamellé-collé est particulièrement simple et fiable, puisque les formules générales de la résistance des matériaux pour le calcul des arcs sont applicables sans précautions

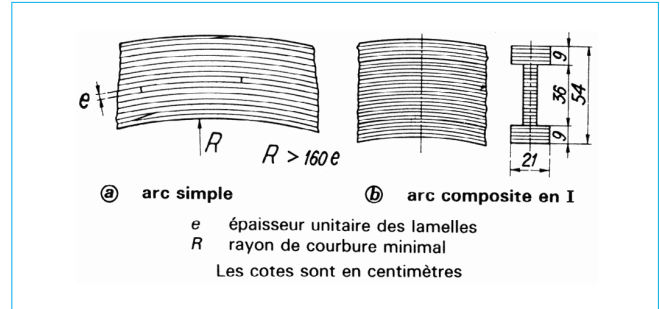


Figure 24 – Arc lamellé (fabrication par encollage sur cintre)

particulières (cf. article *Structures élastiques à plan moyen* [C 2 015] dans ce traité).

Les termes relatifs à la dilatation thermique sont supprimés dans les formules et les termes relatifs aux déformations sous efforts normal et tranchant peuvent être négligés sans inconvénients, du moins au stade des calculs d'avant-projet.

Seuls deux types d'arcs sont pratiquement retenus :

- les arcs isostatiques à trois articulations ;
- les arcs hyperstatiques à deux articulations.

La technique des assemblages fait généralement appel au boulonnage et à l'emploi de goussets latéraux ou axiaux en tôle d'acier ou de boîtiers à rotules pour les pieds et les clefs d'arcs.

Toutefois, la réalisation d'assemblages destinés à transférer des moments de flexion est toujours très délicate et coûteuse, et l'on évite toujours, dans la mesure du possible, de transférer de tels efforts dans un assemblage mécanique de pièces en bois.

Quand, pour des raisons de transport en particulier, le recours à des assemblages est inévitable, on s'efforce de les disposer en des zones de moments nuls ou très faibles sous l'action des charges permanentes, de façon que leur déformabilité ne perturbe pas le fonctionnement d'ensemble.

Une autre solution consiste à réaliser, pour certains assemblages d'angle, des entures multiples collées (§ 3.4 et figure 25) de grandes dimensions.

La rigidité obtenue est supérieure à celle des assemblages mécaniques, mais les limites de résistance conduisent à un léger surdimensionnement des éléments à assembler et la réalisation d'un tel collage est difficile à envisager sur chantier.

4.6 Solutions diverses

Nous citons maintenant certaines solutions qui s'apparentent à l'une des catégories précédentes, mais avec des particularités de fonctionnement importantes, ou qui s'en distinguent totalement.

4.6.1 Treillis tridimensionnels

Il s'agit en l'occurrence de systèmes dans lesquels chaque pièce, fonctionnant essentiellement en traction ou compression, comme dans un treillis plan isostatique, peut cependant être considérée comme appartenant simultanément à deux ou plusieurs treillis plans distincts. Une solution classique fréquemment utilisée en construction métallique (surtout alliage léger) consiste à former deux systèmes orthogonaux de poutres à triangulation du type *Warren* et inclinées alternativement en sens inverse (figure 26).

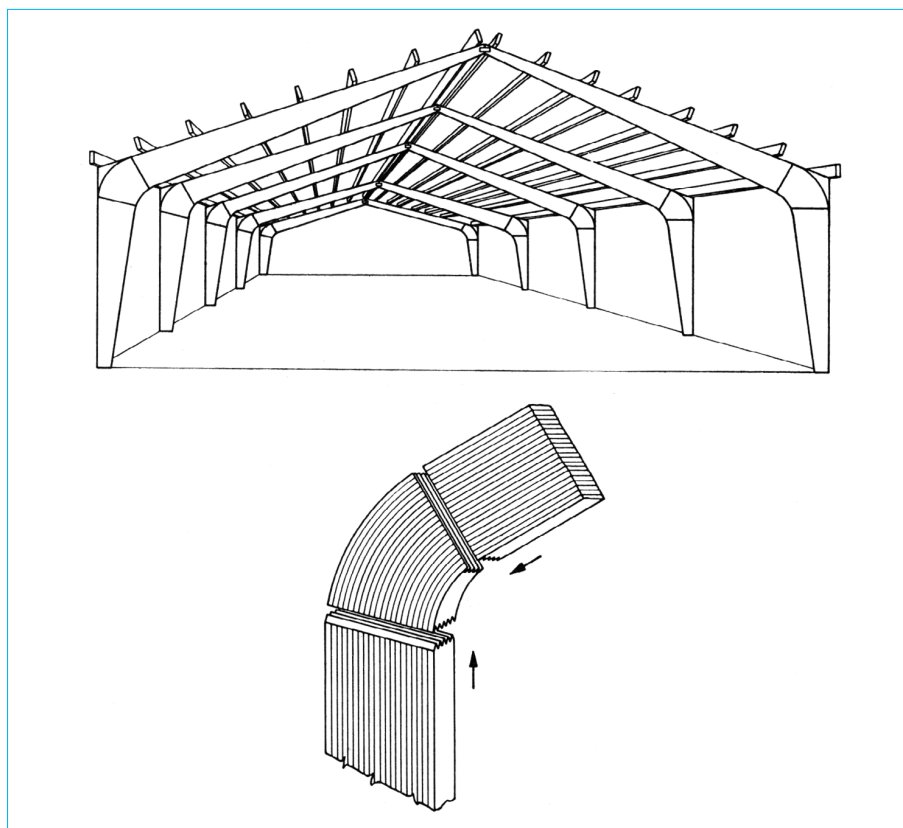


Figure 25 – Hall à usages divers : poutres droites (portée de 10 à 25 m) et détail d'assemblage d'angle à entures multiples

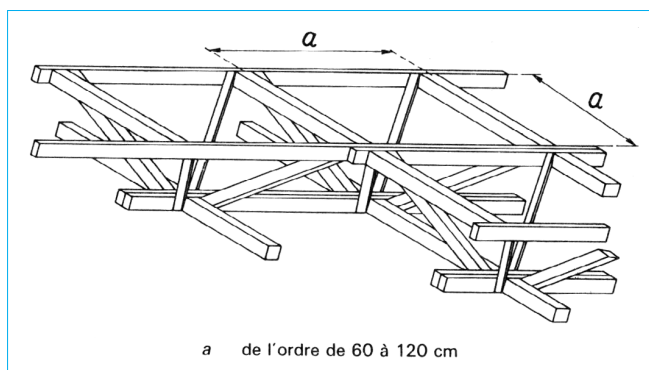


Figure 26 – Treillis tridimensionnel

Quelques ouvrages en bois ont été ainsi réalisés, mais la complexité et le nombre des assemblages sont des éléments assez dissuasifs dans ce cas, et une solution satisfaisante ne pourrait être obtenue que pour une étude approfondie permettant la mise au point d'un assemblage efficace, simple, standardisé et de mise en œuvre rapide.

4.6.2 Poutres croisées

Le principe des poutres croisées consiste à mettre en œuvre, sur des portées égales, deux familles de poutres généralement orthogonales, liées entre elles à chaque intersection, de façon à obtenir un

ensemble ayant globalement un comportement de dalle. Une réalisation intéressante (gymnase de Romainville) existe sous la forme d'éléments de poutres caissons (bois et contreplaqué, cf. § 4.4) de longueur unique, égale au côté de la maille carrée (entr'axe de deux poutres) et assemblés à chaque *nœud* de la maille.

4.6.3 Voiles minces

Les voiles minces (cf. article spécialisé dans le traité Sciences fondamentales), dont le fonctionnement relève de la théorie des coques ou des membranes, peuvent être avantageusement constitués en bois pour la réalisation de portées libres de l'ordre de 15 à 40 m.

Une très grande variété de formes est possible.

Une forme répandue, l'*Hypar* (voile parabolicoïde-hyperbolique à base carrée), peut être réalisée, pour une portée de 20 × 20 m et une couverture continue légère, à l'aide de trois *plis* de planchettes jointives de 15 mm d'épaisseur. Un premier pli est disposé en sous-face, parallèlement à la direction des paraboles. Les deux plis suivants, orthogonaux entre eux, sont disposés à 45° par rapport au premier pli.

L'assemblage entre les différents plis de planches est réalisé in situ, par collage à froid, à l'aide d'un agrafage très dense pour le maintien de la pression de collage et pour participation à la résistance d'ensemble.

Il est à noter que, compte tenu du type de distribution de contraintes dans une telle structure et des variations dimensionnelles du bois en fonction de l'humidité, la stabilité sera en grande partie conditionnée par le respect des *taux d'humidité limites du bois à la mise en œuvre*. En pratique, la construction doit être établie, d'une part sur forme, d'autre part sous abri.

4.6.4 Systèmes à précontrainte ou à armature

L'utilisation de précontraintes dans les ouvrages en bois, très intéressante dans son principe, pose cependant des problèmes technologiques assez délicats à résoudre ; en effet, l'association au bois d'éléments de précontrainte suppose l'existence de liaisons mécaniques discontinues ou chimiques continues (collage).

Dans le premier cas, on se heurte à quelques difficultés relatives au fluage du bois. De bons résultats ont cependant pu être obtenus au moyen de fils de précontrainte type béton.

Une autre possibilité consiste à *armer* (sans créer délibérément de précontrainte) une pièce de bois lamellée-collée en noyant des éléments métalliques (profilés, tubes, feuillards) dans les plans de collages les plus proches des fibres extrêmes.

Des résultats intéressants ont été obtenus au niveau du laboratoire.

4.6.5 Structures mixtes

L'utilisation de matériaux complémentaires dans la réalisation de structures correspond à un légitime souci d'optimisation. Cependant, si l'on connaît un certain nombre de réalisations assez anciennes utilisant des associations de bois et d'acier ou d'alliages légers, l'utilisation systématique de cette ressource est encore assez réduite, bien qu'en développement sensible. Sans considérer toutes les configurations possibles, on peut dire que les pièces tendues d'une structure en bois peuvent souvent être avantageusement remplacées par une pièce de métal, au moins quand un haut niveau de stabilité au feu n'est pas particulièrement recherché.

Cela permet en effet, par la meilleure utilisation de chaque matériau, d'atteindre des rapports résistance/poids ou résistance/prix extrêmement élevés. L'industrie aéronautique a montré l'exemple en utilisant largement, jadis, les combinaisons bois/métal et en continuant à les employer dans quelques cas précis (planchers isolants de cabines, par exemple) ou pour la réalisation de certaines de ses infrastructures aéroportuaires.