TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

Réf. : **TBA1817**

Les différents types de charpentes en bois

Date de publication :
01 octobre 2012

Cet article est issu de : **Construction | Techniques du bâtiment : l'enveloppe du bâtiment**

Pour toute question :
Service Relation clientèle -
Techniques de l'Ingénieur
Pleyad 1 - 39, bd Ornano
93200 Saint-Denis

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **28/03/2016**
Pour le compte : **7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Les différents types de charpentes en bois

I – Charpentes en bois traditionnelles	TBA1817 -	2
II – Charpentes en bois industrielles	—	2
III – Les charpentes en lamellé-collé	—	3
IV – Charpentes de conception « plane »	—	3
A. Poutres	—	3
B. Fermes	—	3
V – Structures spatiales	—	5
A. Principe des structures spatiales	—	5
B. Réseaux plans ou bidimensionnels	—	6
C. Réseaux tridimensionnels ou réticulés	—	6
D. Structures plissées	—	7
E. Structures à simple courbure	—	8
F. Structures à double courbure	—	11
1. Coupole	—	12
a) Ossature nervurée	—	12
b) Ossature en résille	—	12
c) Résille lamellaire	—	13
d) Ossature en treillis	—	14
2. Paraboloïdes hyperboliques	—	14
a) En voile mince	—	15
b) En résille	—	16
G. Surfaces libres	—	17

Les charpentes se décomposent en trois sous-familles :

- *Les charpentes en bois traditionnelles sont constituées de pièces de bois (généralement triangulaires) nommées « fermes » et sont réunies par d'autres pièces de bois plus petites (souvent horizontales), dénommées « pannes », ces dernières servant de support à la couverture.*
- *Les charpentes en bois industrialisées à fermettes sont des éléments légers préfabriqués. Ils sont rapprochés les uns aux autres, et prêts à poser. Cette technique est couramment utilisée dans les maisons individuelles.*
- *Les charpentes en bois lamellé-collé sont une technique moderne d'aspect décoratif utilisée pour les grandes portées. Une charpente de type lamellé-collé est constituée de poutres composées d'éléments minces assemblés par collage. De façon plus précise, le « lamellé-collé » consiste à assembler par collage (colles thermodurcissables, urée-formol...) des lamelles de bois superposées et disposées de manière à ce que leur fil soit parallèle. Les types de bois employés sont principalement des résineux (sapin, épicéa...). Les charpentes en lamellé-collé sont légères (environ 550 kg/m^2) et autorisent de grandes portées. Cette technologie permet la réalisation de très grandes pièces de charpente, de bâtiments à l'architecture audacieuse et esthétique.*

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

I - Charpentes en bois traditionnelles

Contrairement aux fermettes, la charpente traditionnelle permet d'utiliser le volume de cette dernière en aménageant des plafonds rampants.

Pour aménager ces combles, il faut prévoir une hauteur de mur supplémentaire (pour les toits à faible pente), ou bien des ouvertures de type « chien assis », par exemple).

Composition de la charpente traditionnelle – Elle se compose d'un nombre de pièces de bois assemblées les unes avec les autres, formant l'ossature de la charpente.

De forme généralement triangulaire, elles sont dénommées fermes. Celles-ci sont reliées par des pièces horizontales dénommées pannes.

Les bois utilisés dépendent de la portée de la construction. Généralement de grosses tailles, ces pièces sont fabriquées par un charpentier.

Ce dernier établit un plan à grande échelle afin de concevoir les assemblages qui se dérouleront sur le chantier.

Précision et contrôle – La charpente traditionnelle nécessite une conception précise et un calcul sur le dimensionnement des pannes.

En l'absence d'un tel dispositif, la toiture risque de se déformer et entraîner de graves défauts d'étanchéité.

Les points à contrôler sont les suivants :

– la section des pannes (elle dépend de la portée et des charges) ;
– l'humidité du bois (15 % d'humidité est un taux correct) ;
– l'exécution.

Rareté de la charpente traditionnelle – La charpente traditionnelle en bois se fait de plus en plus rare.

Recherchée dans le cadre de travaux de réhabilitation, elle est remplacée par les « fermettes » dites charpentes industrielles.

Il existe néanmoins une charpente intermédiaire dite « traditionnelle industrialisée ». Celle-ci est réalisée en petites ou moyennes séries et peut être préfabriquée et livrée en gros volume.

Bois massif – La charpente traditionnelle se caractérise donc essentiellement par le recours à l'usage de bois massifs sous forme de moyennes ou fortes sections (de 50 × 100 mm à 300 × 400 mm).

Entrent dans cette famille, au sens large, s'ils utilisent des bois massifs, les ouvrages suivants :

– les poutres maîtresses, enrayures, linteaux et solivages ;
– les pannes, chevrons, faux arbalétriers, arêtiers ;
– les colombages de murs ;
– les treillis assemblés en juxtaposition (moisement) par pointes, boulons ou organes spéciaux.

Dans une acception plus étroite, on considère comme charpentes traditionnelles les charpentes de combles ou de halls (fermes sur mur ou portiques) caractérisées par des assemblages à profils complémentaires (embrèvements, tenons-mortaises, enfourchements, mi-bois, etc.).

La conception et le dimensionnement des charpentes traditionnelles sont régis par les Codes de calcul généraux de charpente bois en vigueur.

Essences utilisées – Ce sont souvent des résineux (sapin, épicéa, pin sylvestre, douglas), mais aussi, pour des structures de prestige ou exposées aux intempéries, des bois durs (chêne, châtaignier ou tropicaux divers).

Taille des pièces – La fabrication des charpentes traditionnelles se caractérise par la nécessité d'un taillage précis des pièces de bois pour permettre leur assemblage.

Ces opérations de taille, classiquement réalisées à l'aide d'outils manuels, puis mécanisés, tendent à être faites à l'aide de machines à commande numérique associées à une informatique de conception, dessin et fabrication (CFAO).

Cette évolution conduit, pour cette technique de charpente, à une amélioration de sa compétitivité qui s'était dégradée face à la concurrence de systèmes économiques (charpentes industrialisées, poutres composites).

II - Charpentes en bois industrielles

Par opposition aux charpentes traditionnelles, la fermette est constituée d'éléments en bois (ferme légère) peu espacés.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

Standardisation – La fermette est un ouvrage préfabriqué en usine qui a la dimension de la maison.

Les fermettes sont issues d'un procédé américain des années 1950, permettant de pré-fabriquer des charpentes bon marché avec des bois de faible section. Un procédé de triangulation permet d'obtenir une grande solidité de l'ensemble.

Les fermettes sont étudiées pour supporter 150 kg/m^2, soit à la fois la couverture et un plafond en plaques de plâtre.

L'avantage principal d'une charpente en fermettes est son coût et sa facilité de pose. De plus, les bois de faible section sont quasiment traités à cœur.

Assemblage des fermettes – Les fermettes sont assemblées par collage, par boulonnage ou par des connecteurs légers tels que les tôles embouties avec des pointes, permettant la fixation des pièces par un clouage.

Contreventement – Un soin devra être apporté au niveau des déformations susceptibles de s'appliquer à cet ouvrage telles que :

– une erreur de calcul sur le dimensionnement et l'espacement entre les fermettes ;
– l'absence de contreventement.

Pour ce faire, il y a lieu de prévoir un contreventement voire une consolidation par des pièces de bois, empêchant la déformation horizontale.

De plus et afin d'éviter une déformation latérale des pièces de la charpente, il sera nécessaire de prévoir des éléments en bois rigidifiant la structure.

Cette pièce s'appelle V« antiflambage ».

III - Les charpentes en lamellé-collé

Les lamellé-collé sont constitués de poutres en arc (jusqu'à 130 m sans appuis intermédiaires) ou de poutres droites.

Ce sont des planchettes aboutées en lits collés, de 15 à 50 mm d'épaisseur selon le rayon de courbure des poutres à réaliser.

Elles sont réalisées en résineux (sapin et épicéa).

Elles peuvent être composites, c'est-à-dire avec des membrures en bois massif associées à des contreplaqués ou autres panneaux dérivés du bois constituant les âmes des poutres en des goussets d'assemblage.

Durée de montage – En règle générale, on compte environ cinq jours pour un montage traditionnel contre une journée dans le cas de fermettes.

Durabilité d'une toiture – La toiture, partie la plus exposée de la maison, doit être régulièrement surveillée, révisée ou refaite. Une charpente de qualité peut, pour sa part, durer plusieurs siècles.

IV - Charpentes de conception « plane »

La charpente classique est constituée de systèmes reportant les charges en des points fixes, régulièrement espacés selon deux directions planes appelées « portée » et « travée » (ou entraxe).

La plupart des toitures des constructions anciennes ou actuelles sont formées de surfaces planes agencées selon des combinaisons simples : dalles horizontales, toitures à deux pentes, toitures à quatre pentes, etc.

Les éléments constructifs travaillant à la flexion sont les éléments poutres (panne, chevron...) et les fermes. Ils sont disposés sous forme de systèmes unidirectionnels, bidirectionnels ou tridirectionnels.

A. Poutres

Les poutres en bois s'utilisent très diversement dans le bâtiment. La poutre pleine sur deux appuis travaille à la flexion.

L'ensemble classique est la panne qui supporte les chevrons ou les panneaux de couverture. Disposée à l'aplomb ou à dévers, la panne est sollicitée en flexion simple ou déviée. Les pannes à l'aplomb sont très couramment employées dans l'habitat et en général pour des pentes de toiture faibles ou moyennes (S 450).

Leurs dispositions dans l'espace déterminent différents systèmes, par exemple :

– système linéaire et à juxtaposition longitudinale;
– système diagonal ;
– système radial ;
– système à diagonales croisées ;
– système diagonal et ramifié.

Dès que la portée augmente, la hauteur nécessaire s'accroît et la poutre à treillis (poutre triangulée) ou la poutre à sous-titrant métalliques remplace alors la poutre à âme pleine. Selon la portée nécessaire, on peut distinguer deux grands types d'éléments :

• Les fermes ayant une portée allant de 10 à 60 m (fermes delta, portiques, treillis sous-tendus).

• Les arcs courbes permettant de très grandes portées (40 à 150 m et plus).

B. Fermes

La ferme triangulée, appelée parfois latine ou romaine, a été inventée et utilisée dès le 1er siècle après J.-C. par les charpentiers romains. En raison du caractère traditionnel de ces charpentes, une dénomination définitive de chacun des éléments constitutifs a été adoptée.

Avec cette technique, la liaison d'éléments rectilignes compose un triangle indéformable. Elle permet d'augmenter la distance que peut franchir une poutre devant supporter une toiture (on admet que le palais Donatien, construit à cette époque, avait une largeur de 30 mètres). L'utilisation de tels éléments est typique des charpentes à deux versants symétriques, à deux rampants ou à deux pans.

La morphologie d'une ferme peut être responsable, entre autres, d'un type de charpente à deux versants symétriques (*cf.* Fig. 1), mais il existe diverses formes de fermes.

Ferme simple – La ferme simple est composée de deux arbalétriers dont les bases sont réunies par un entrait, lui-même soutenu en son centre par un poinçon en bois ou une aiguille en métal (*cf.* Fig. 2).

Ferme latine – Ce système est destiné aux combles non habitables (*cf.* Fig. 3).

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

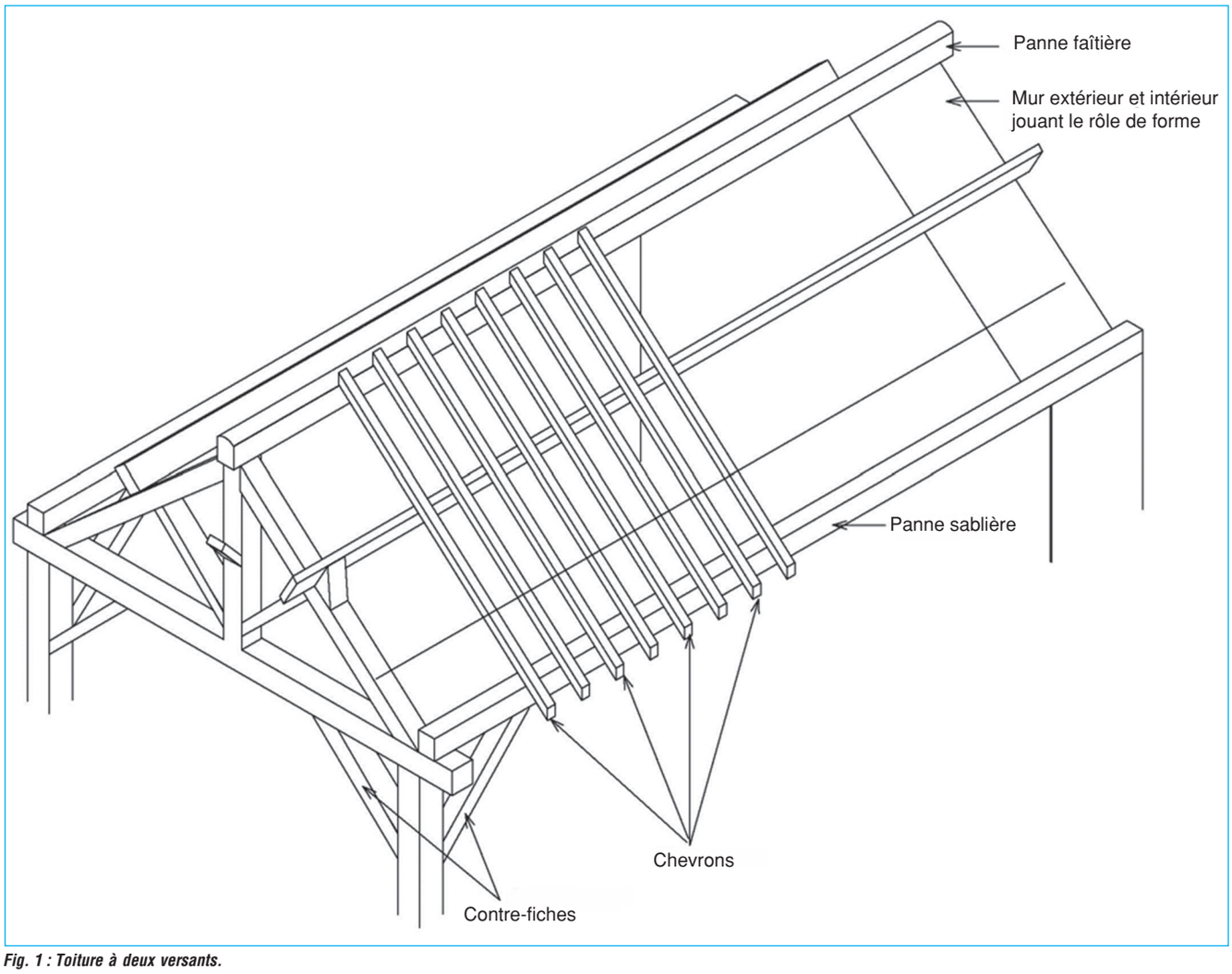


Fig. 1 : Toiture à deux versants.

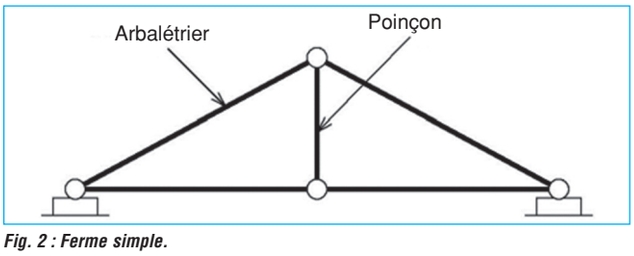


Fig. 2 : Ferme simple.

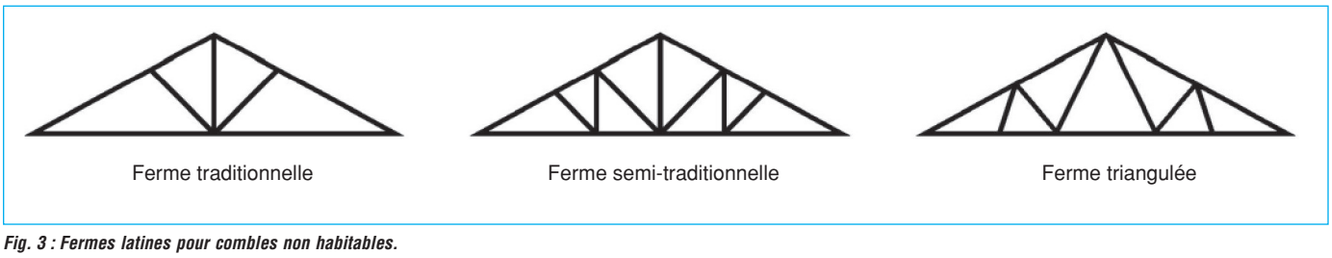


Fig. 3 : Fermes latines pour combles non habitables.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

La ferme à contre-fiches d'une pratique encore courante est une charpente en bois où les contre-fiches sont assemblées par tenon-mortaise dans le poinçon (*cf.* Fig. 4).

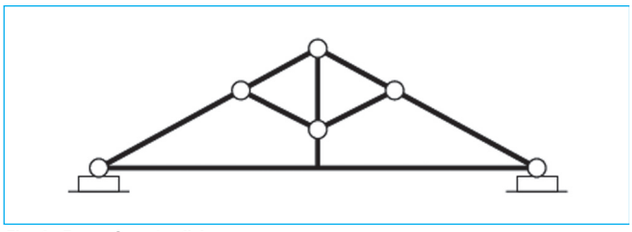


Fig. 4 : Ferme à contre-fiches.

La ferme latine « semi-traditionnelle » est une évolution vers la ferme triangulée mais elle comporte un poinçon carré et un arbalétrier simple.

Ferme pour combles habitables – Suivant le volume et l'architecture exigés, on recourt à différents types de fermes :

• Ferme à entrait retroussé ou en « A ».

• Ferme sur blochets.

• Ferme boiteuse.

• Ferme à la Mansart (généralement imposée par le maître d'œuvre ou le maître d'ouvrage car très spécifique).

• Ferme « à la Palladio » adaptée à l'habitat.

Ferme moderne – La ferme est un système porteur à trois articulations. Elle évolue vers l'intégration d'éléments de sous-tension qui allègent la charpente et offrent de nombreuses possibilités :

• Ferme constituée de poutres sous-tendues par des câbles métalliques (*cf.* Fig. 5) ;

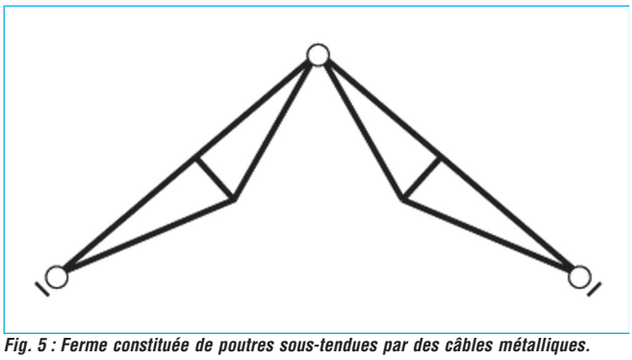


Fig. 5 : Ferme constituée de poutres sous-tendues par des câbles métalliques.

• Ferme à la Polonceau, à entrait retroussé (*cf.* Fig. 6).

• Ferme mixte bois-métal (*cf.* Fig. 7).

Dans ces différents exemples, les éléments (hormis les poutres) peuvent être en bois ou en métal.

La disposition des éléments permet aussi de constituer des fermes libérant le comble, par exemple la composition radiale (*cf.* Fig. 8).

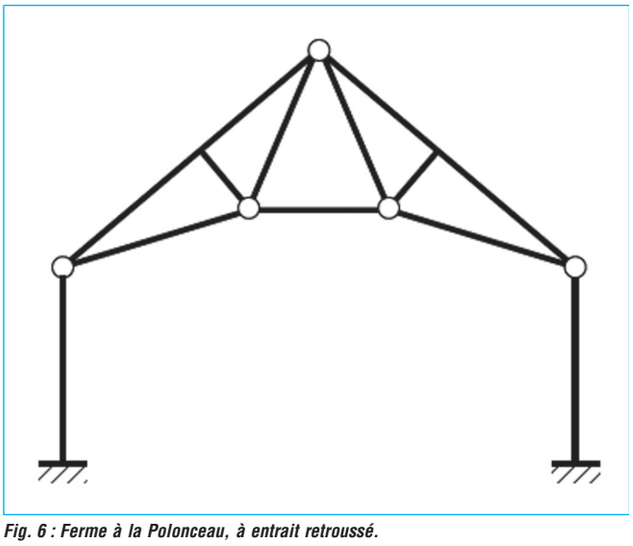


Fig. 6 : Ferme à la Polonceau, à entrait retroussé.

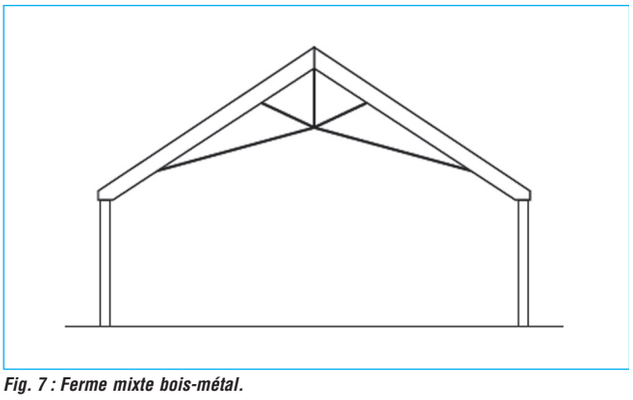


Fig. 7 : Ferme mixte bois-métal.

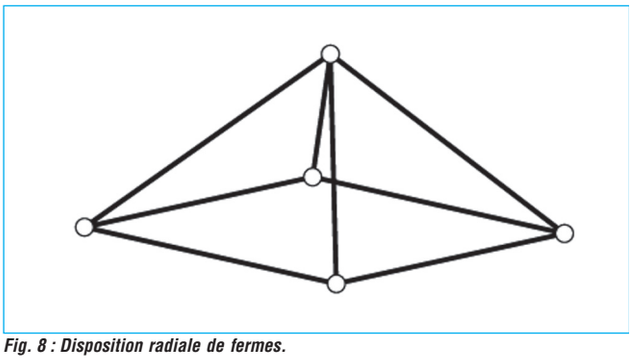


Fig. 8 : Disposition radiale de fermes.

V - Structures spatiales

A. Principe des structures spatiales

Tous les éléments de ces structures sont solidaires en toutes directions. L'utilisation de la forme géométrique permet une économie de matière. Ainsi, lorsque les portées transversale et longitudinale d'une couverture sont d'égale importance, il est plus efficace d'utiliser des poutres portant dans les deux sens. Si les liaisons solidarisent deux réseaux de poutres, le système forme une résille bidimensionnelle.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

Les charges appliquées, réparties dans les deux directions, le seront d'autant plus également que la maille se rapproche du carré.

Pour construire des toitures de moyenne et de grande portée, il est courant de superposer des grilles bidirectionnelles, liaisonnées entre elles. Ces structures sont appelées tridirectionnelles.

B. Réseaux plans ou bidimensionnels

Les surfaces planes continues peuvent être réalisées à partir de réseaux croisés bidirectionnels ou tridirectionnels, matérialisés dans l'espace par des poutres assemblées entre elles.

Ces poutres peuvent être triangulées ou à âme pleine. La conception des nœuds d'assemblage doit alors s'adapter à chaque technique (par exemple : tubes métalliques ronds soudés).

Ces réseaux peuvent être illustrés par les systèmes à gril :

- Gril de poutres orthogonal (*cf.* Fig. 9) ;

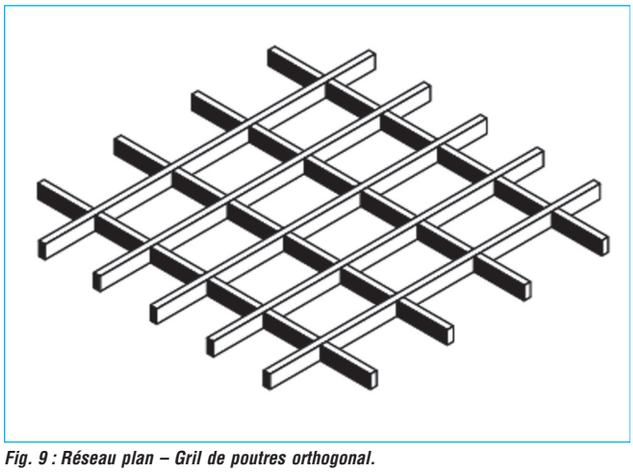


Fig. 9 : Réseau plan – Gril de poutres orthogonal.

- Gril de poutres biais (*cf.* Fig. 10) ;

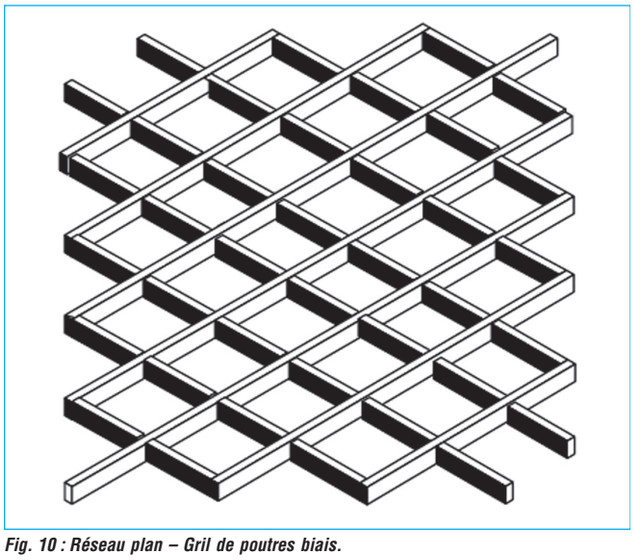


Fig. 10 : Réseau plan – Gril de poutres biais.

- Gril à trame triangulaire (*cf.* Fig. 11) ;

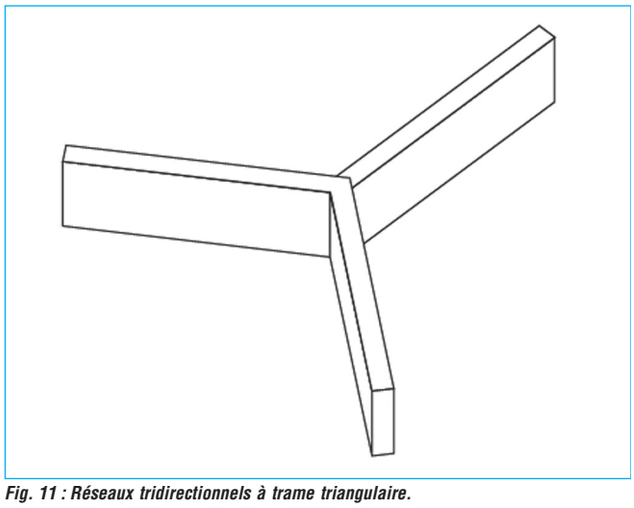


Fig. 11 : Réseaux tridirectionnels à trame triangulaire.

- Gril à trame pentagonale (*cf.* Fig. 12).

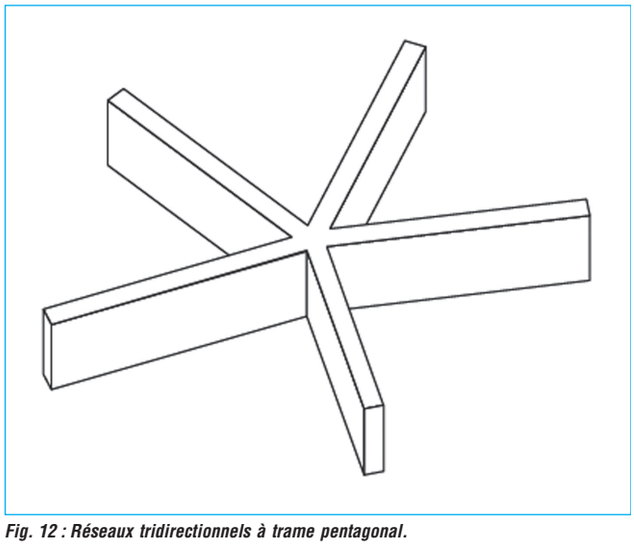


Fig. 12 : Réseaux tridirectionnels à trame pentagonal.

C. Réseaux tridimensionnels ou réticulés

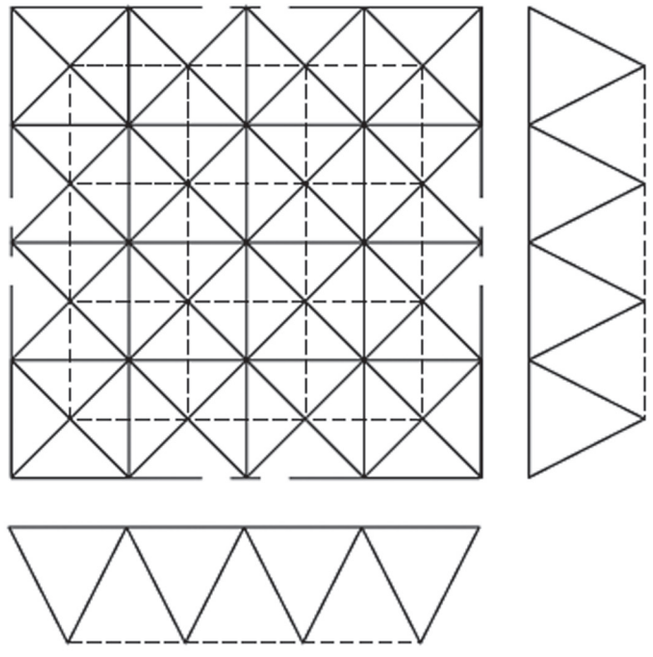
Lorsque les réseaux plans sont tridimensionnels, ils sont constitués soit par deux grilles bidirectionnelles superposées et une triangulation spatiale (souvent dits « réticulés » ou « à double nappe »), soit par un réseau de poutres triangulées et inclinées qui se croisent suivant deux ou trois directions :

- Les poutres se croisent suivant deux directions, et les réseaux de membrures sont décalés en plan. Le système se décompose alors en pyramides à base carrée, juxtaposées en plan et opposées les unes aux autres dans l'espace (*cf.* Fig. 13) ;

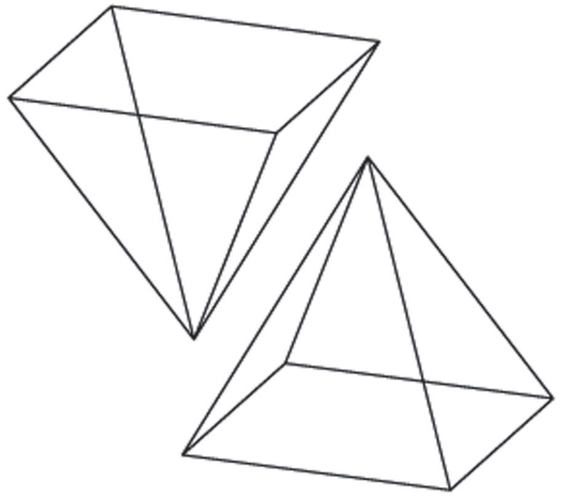
- Les poutres se croisent suivant trois directions. Le système se décompose alors en tétraèdres, c'est-à-dire en pyramides à base triangulaire, juxtaposées en plan et opposées les unes aux autres dans l'espace.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126



(a) Vue en plan et coupe



(b) Pyramides dont la juxtaposition forme l'ensemble du réseau

Fig. 13 : Réseau tridirectionnel à deux directions.

La structure tridimensionnelle (*cf.* Fig. 14) est constituée par la superposition de deux grilles orthogonales identiques, reliées entre elles dans les deux directions par des éléments diagonaux formant dans le plan vertical autant de poutres-treillis.

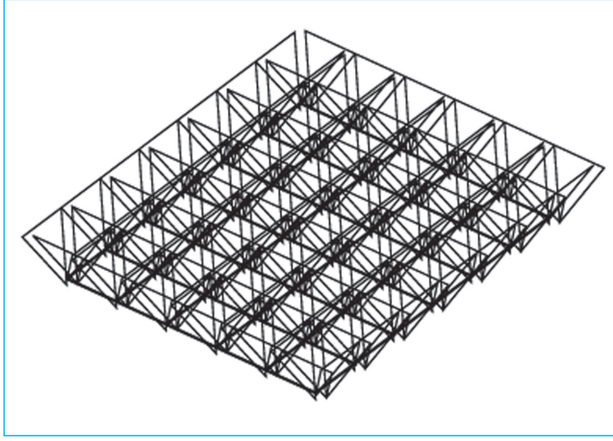


Fig. 14 : Réseau tridirectionnel – Nappe de treillis – Double nappe orthogonale.

Une fois chargée, la nappe supérieure est entièrement en compression, alors que la nappe inférieure ne travaille qu'en traction.

Ce type de structure est relativement simple à réaliser avec des tubes ou de simples cornières en acier.

Le bois ne pose pas de problème si les moyens d'assemblage sont bien conçus.

Les géométries plus complexes qui recourent à l'emploi d'éléments inclinés (et non verticaux) augmentent encore le nombre de liaisons, donc la rigidité. La nappe peut alors être visualisée comme l'assemblage d'éléments pyramidaux. Les liaisons entre les éléments (huit, dix et plus par sommet) ont donné lieu à l'invention d'assemblages brevetés qui génèrent une grande variété de systèmes, aussi bien pour l'acier que pour le bois.

Ces structures, apparemment complexes et composées d'un grand nombre d'éléments, se réduisent en fait, à l'utilisation de peu d'éléments différents : des diagonales, des horizontales et des montants verticaux ayant tous la même longueur et la même section.

Le même principe est utilisé pour des nappes cintrées dans une direction (voûtes) ou deux (dômes géodésiques). Ces structures peuvent couvrir des surfaces importantes avec un poids extrêmement réduit.

D. Structures plissées

Ce principe de conception récente peut s'expliquer avec un exemple simple : si une feuille de papier est posée entre deux appuis, elle fléchit sous son propre poids car il n'y a pas d'inertie, donc pas de rigidité. Après avoir formé une série de plis parallèles dans le sens de la portée, la feuille devient rigide car cette opération a considérablement augmenté son inertie.

Mais lorsque la feuille est chargée, elle a tendance à s'ouvrir pour revenir à son état plan initial. Pour empêcher cette ouverture, un dispositif approprié (tympan, tirants,

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

etc.) permettra de garder une structure spatiale rigide (*cf.* Fig. 15). La surface délimitée par une noue et un arêtier ou faîtage est appelé pli. Cette surface rend la structure plissée autostable face aux efforts extérieurs liés à l'action du vent et ne nécessite pas d'éléments de contreventement isolés ou surajoutés. Grâce à l'encombrement très réduit de ce type de structure, des combles de grandes dimensions peuvent être réalisés.

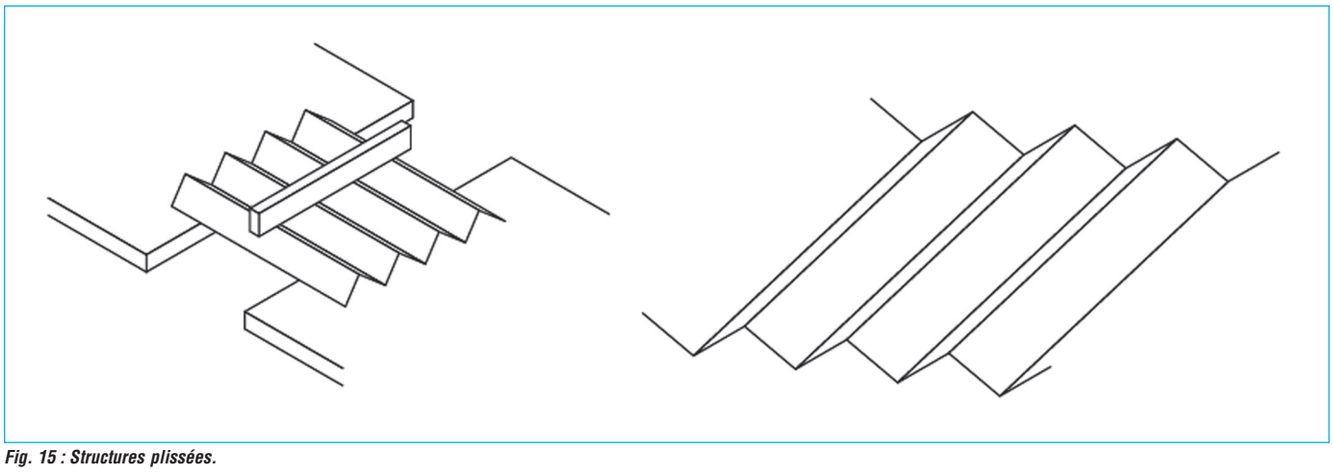


Fig. 15 : Structures plissées.

Les sheds constituent une forme de structures plissées assez traditionnelle (*cf.* Fig. 16) et (*cf.* Fig. 17).

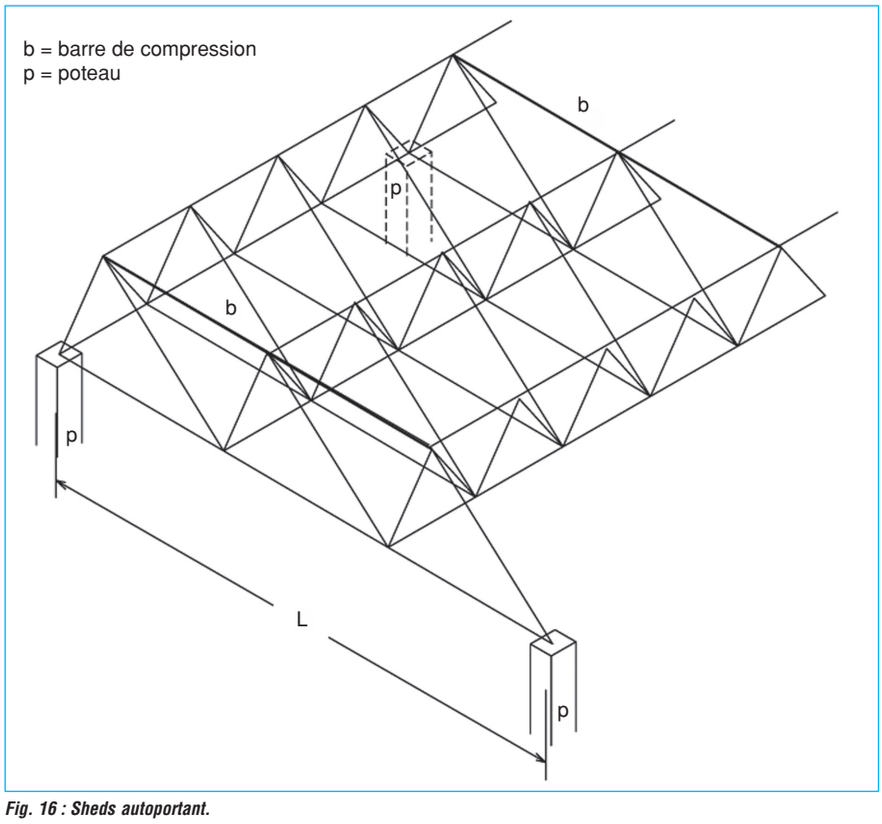


Fig. 16 : Sheds autoportant.

Les structures plissées sont facilement exécutées à l'aide de matériaux à base de bois et conduisent à des charpentes très élégantes. La figure suivante présente différentes formes de structures plissées en rayons (*cf.* Fig. 18).

E. Structures à simple courbure

C'est l'une des plus anciennes formes courbes connues, puisque directement dérivée de la voûte, issue de l'arc.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

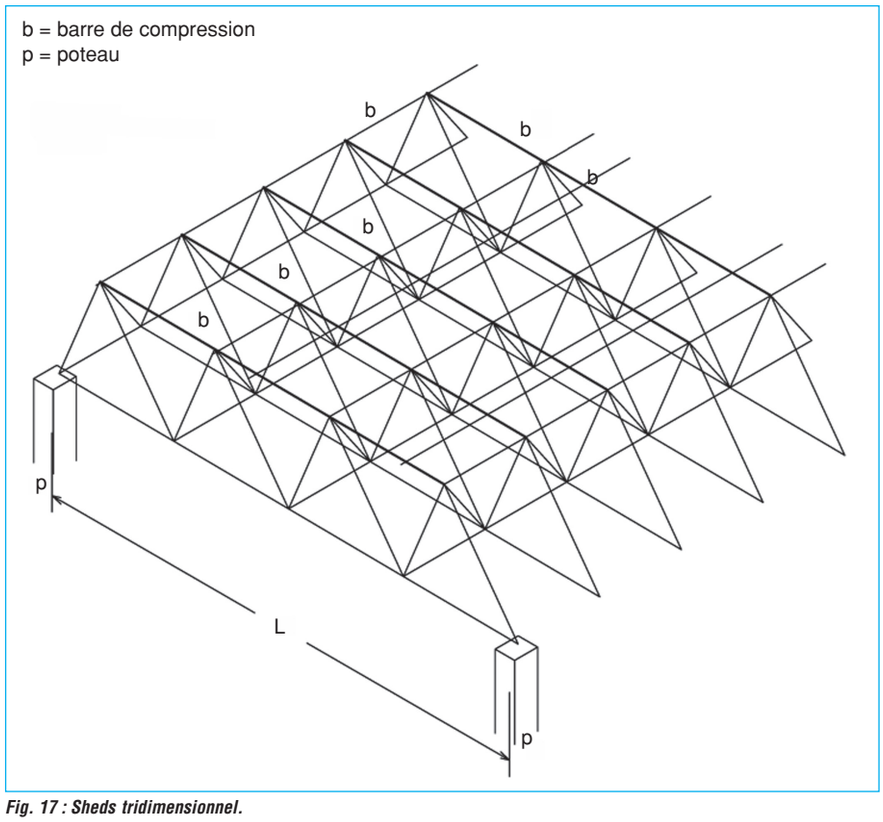


Fig. 17 : Sheds tridimensionnel.

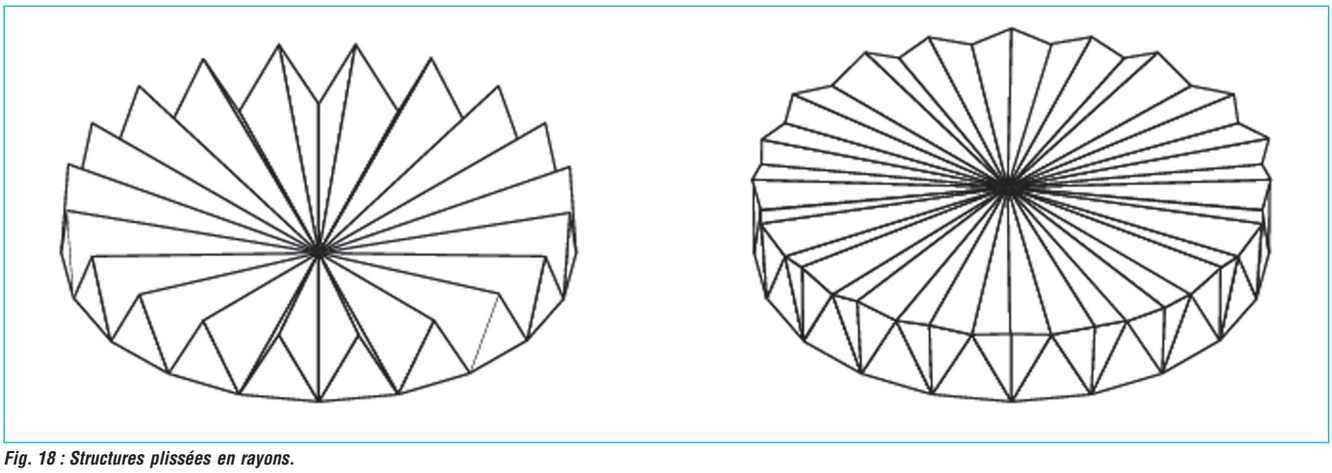


Fig. 18 : Structures plissées en rayons.

Cylindre à directrice circulaire ou elliptique – C'est la forme la plus fréquente en construction. Il s'obtient en déplaçant une droite (génératrice) parallèlement à elle-même le long d'une directrice (courbe : cercle, ellipse). La directrice peut avoir d'autres formes : si le terme cylindrique évoque en général le cylindre circulaire, ce n'est qu'une des formes possibles.

Voûtes courtes et voûtes longues – On les distingue à leur comportement statique différent. Le critère est le rapport de la portée (P) à la travée de ses appuis (T) (*cf.* Fig. 19) :

– lorsque T > 2P, le cylindre est dit long ;
– lorsque P > 2T, le cylindre est dit court.

La voûte cylindrique circulaire a donné naissance aux sheds cylindriques. Ils permettent de franchir de grandes portées tout en assurant un éclairement régulier aux halls ainsi réalisés (*cf.* Fig. 20).

Des combinaisons et des intersections de ces formes permettent de couvrir des plans variés (*cf.* Fig. 21). Les raccords de ces formes peuvent se faire suivant une voûte d'arête ou une voûte de cloître qui, lorsqu'elles sont en bois s'exécute avec :

• Des tympans transversaux porteurs, réalisés par des fermes en bois collées ou assemblées selon la portée.

• Des rives longitudinales rigides, réalisées par un appui continu sur le gros œuvre ou par des poutres placées dans le sens de la travée quand la coque doit être détachée du sol. Dans cette hypothèse, la coque cylindrique courte sera préférée, du fait de l'importance des efforts reçus sur l'élément de rive.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

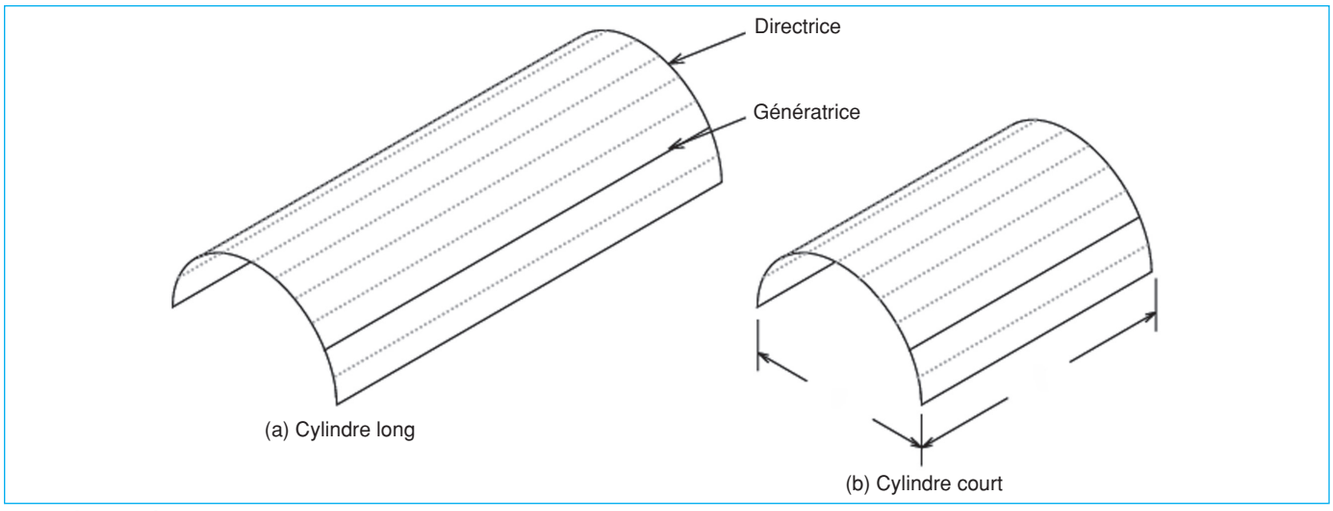


Fig. 19 : Structures à simple courbure 1.

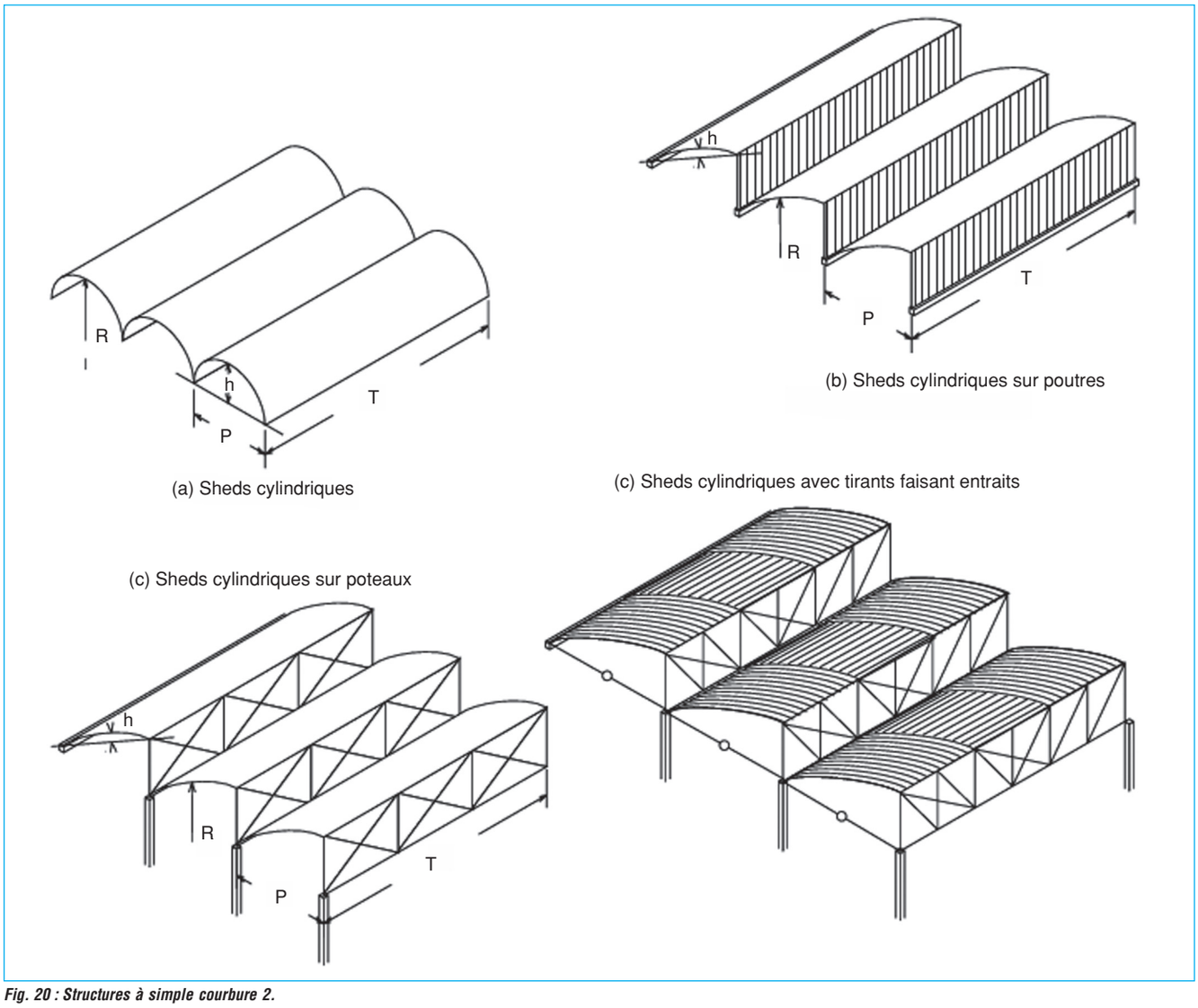
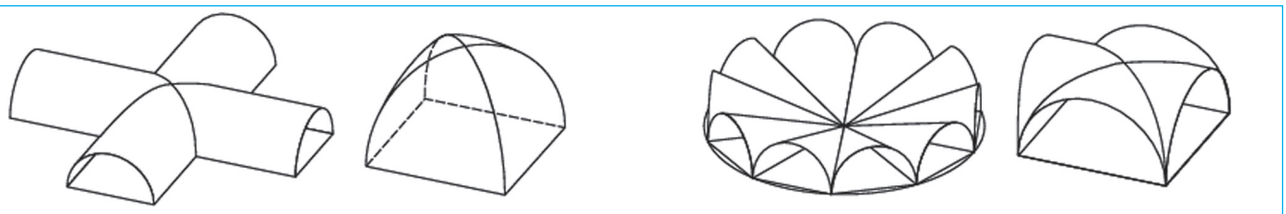


Fig. 20 : Structures à simple courbure 2.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126



(a) Voûtes croisées (b) Coques coniques disposées en rayons

Fig. 21 : Combinaison de voûtes.

La voûte, exécutée entre ces éléments, est généralement constituée d'un voile mince (superposition, sur une forme, de lits de planches diversement orientés liés par clouage, par agrafage ou grâce à une résille).

Ce type de voûte s'adapte très bien à la préfabrication partielle de ses éléments. Les éléments préfabriqués du voile mince sont conçus selon la même technologie. Il faut alors prévoir un mannequin de manutention pour éviter les déformations lors de la manutention et de la pose. Il est aussi préférable de rigidifier ces éléments avec une structure secondaire qui permettra leur manutention directe. Après assemblage de l'ensemble, cette ossature servira de résille spatiale.

La jonction des éléments doit être très soignée, afin d'assurer la transmission des efforts d'un élément à l'autre. Un joint coulé en béton peut être très efficace.

F. Structures à double courbure

L'emploi de surfaces à double courbure se justifie par leurs caractéristiques statiques exceptionnelles, résultant de leurs caractéristiques géométriques.

Sous un chargement quelconque, les structures en voile plissé ou en coques cylindriques tendent à se déformer et à revenir à une surface plane. Pour s'opposer à ce phénomène, il faut prévoir des tympans, des tirants, des butées, etc. D'où l'idée de créer des surfaces à double courbure capables d'intégrer naturellement ces « butées » dans la forme de la structure :

• La double courbure avec courbure principale de même sens permet un effet spatial de voûte. L'élément travaille essentiellement en compression et subit un phénomène d'instabilité : le flambement. Ce phénomène ne peut être éliminé que si une liaison s'oppose aux déformations dues à la compression.

• La double courbure avec courbures principales inverses. En chaque point de la surface, une courbe concave et une courbe convexe se croisent en s'opposant. La déformation de l'une annule alors automatiquement celle de l'autre.

Cette composition permet d'alléger au maximum la structure. Ainsi, lors de la réalisation de voiles minces ou de résilles spatiales tendues, les efforts les plus importants ne sont pas ceux de la pesanteur mais ceux dus au soulèvement du vent. Le poids mort d'un voile mince en bois et de sa couverture peut descendre à 25 kg/m².

Les principales formes utilisées sont :

• Les surfaces de rotation (*cf.* Fig. 22), obtenues en faisant tourner une génératrice (arc de cercle ou courbe plane) autour d'un axe situé dans son plan. La coupole est la plus ancienne de ces structures ;

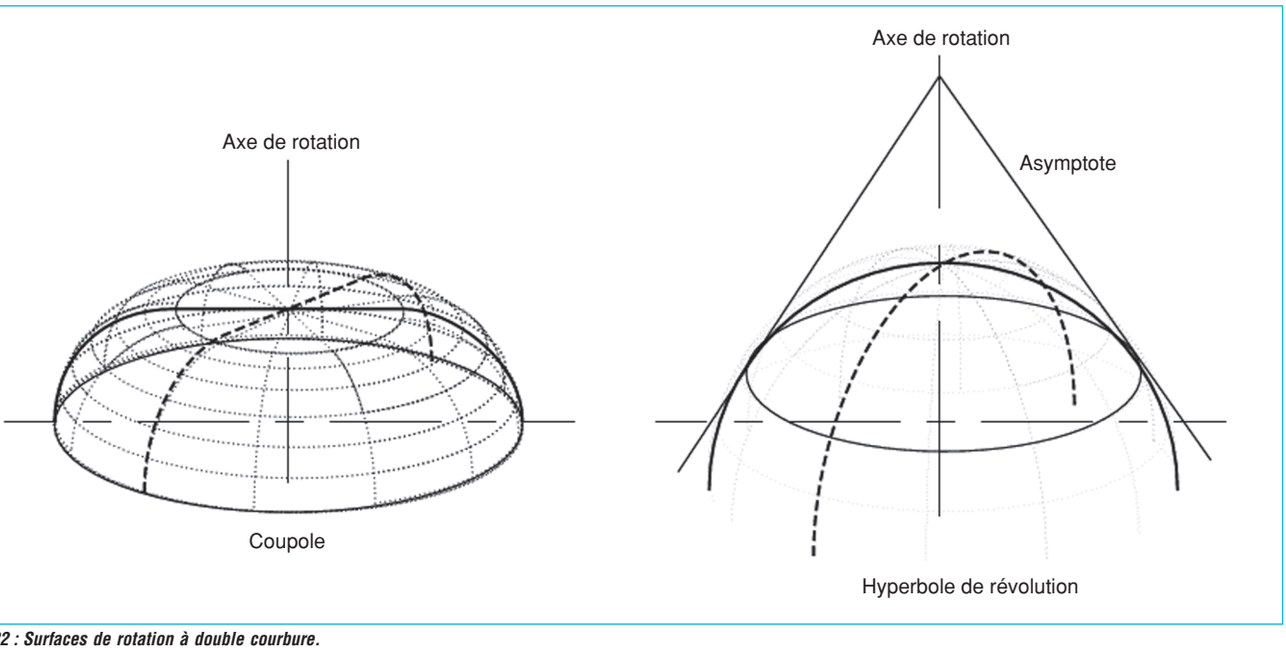


Fig. 22 : Surfaces de rotation à double courbure.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

• Les surfaces de translation, résultat du déplacement d'une génératrice courbe parallèlement à elle-même et suivant une directrice courbe. La courbure de la directrice et de la génératrice sont de même sens (*cf.* Fig. 23) ;

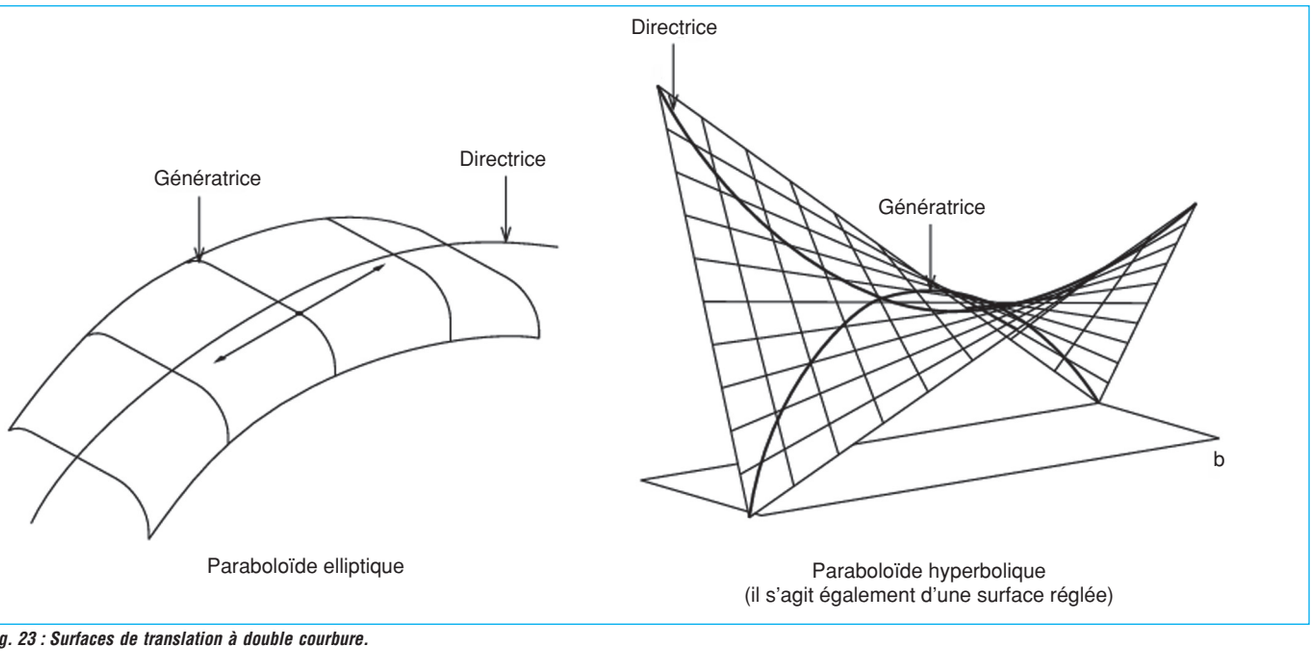


Fig. 23 : Surfaces de translation à double courbure.

• Les surfaces réglées, engendrées par le déplacement d'une génératrice droite parallèlement à elle-même et sur deux directrices non parallèles dans l'espace.

1. Coupole

La coupole est la plus ancienne des surfaces à double courbure connue. C'est une surface à double courbure et à courbures principales de même sens. La plus répandue est la sphère, bien que la parabole y soit également employée comme génératrice. Leur diamètre atteint 100 m avec des arcs en bois lamellé-collé.

Pour la réalisation des coupoles, le bois massif en lamellé-collé offre plusieurs possibilités techniques : l'ossature nervurée, l'ossature en résille, la résille lamellaire et l'ossature en treillis.

a) Ossature nervurée

C'est la solution constructive la plus simple, mais pas la plus légère. Elle consiste à matérialiser les arcs méridiens de la sphère en la découpant en tranches. Cette coupole nervurée fait l'objet d'une classification (*cf.* Fig. 24) ;

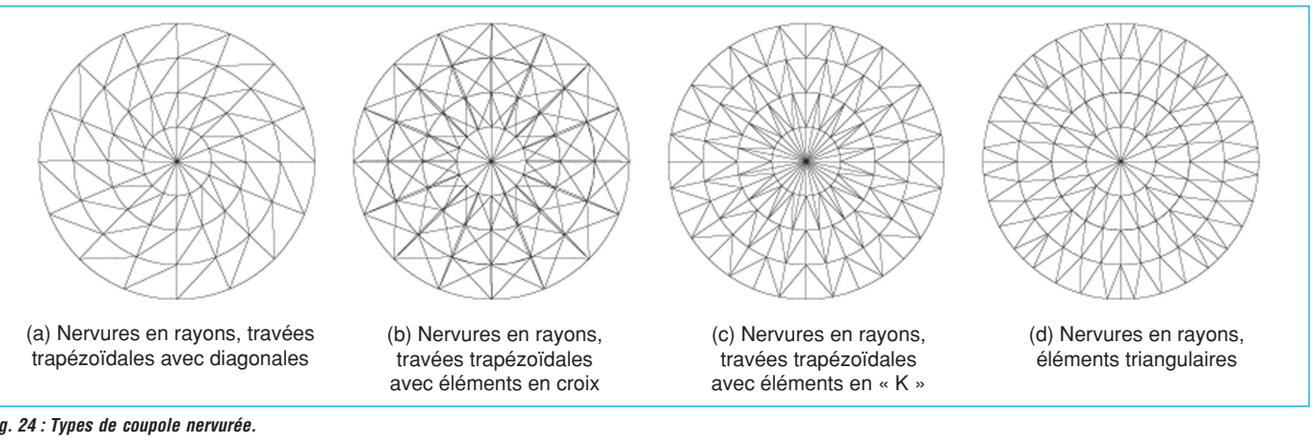


Fig. 24 : Types de coupole nervurée.

b) Ossature en résille

L'ossature en résille (courbe) est réalisée en découpant la surface en facettes et en courbes puis en les assemblant correctement (encastrement). Chaque tranche de la sphère est délimitée par deux parallèles et nécessite des barres de longueurs différentes. Pourtant, les ossatures avec le plus grand nombre de barres identiques sont choisies de préférence.

Dans les coupoles géodésiques, on emploie une combinaison de triangles et de pentagones. Dans les coupoles en résille, on recourt à un réseau triangulé formé de barres articulées.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

On a ainsi la possibilité de réaliser plusieurs types de réseaux, selon la méthode de partition choisie (*cf.* Fig. 25) :

• Partition triangulaire selon un réseau tridirectionnels. Cette solution permet la préfabrication d'un grand nombre d'éléments qui sont assemblés entre eux par des assemblages mécaniques. Mais il reste à la périphérie un certain nombre de triangles dissemblables qui doivent être traités au cas par cas.

• Partition triangulaire selon un réseau concentrique dans lequel les sommets des triangles identiques sont délimités par des parallèles. La triangulation complète de la surface convient mieux aux ouvrages de très grande portée. Ainsi, une coupole de 160 m de portée a été réalisée aux États-Unis suivant le procédé « Varax-dome ».

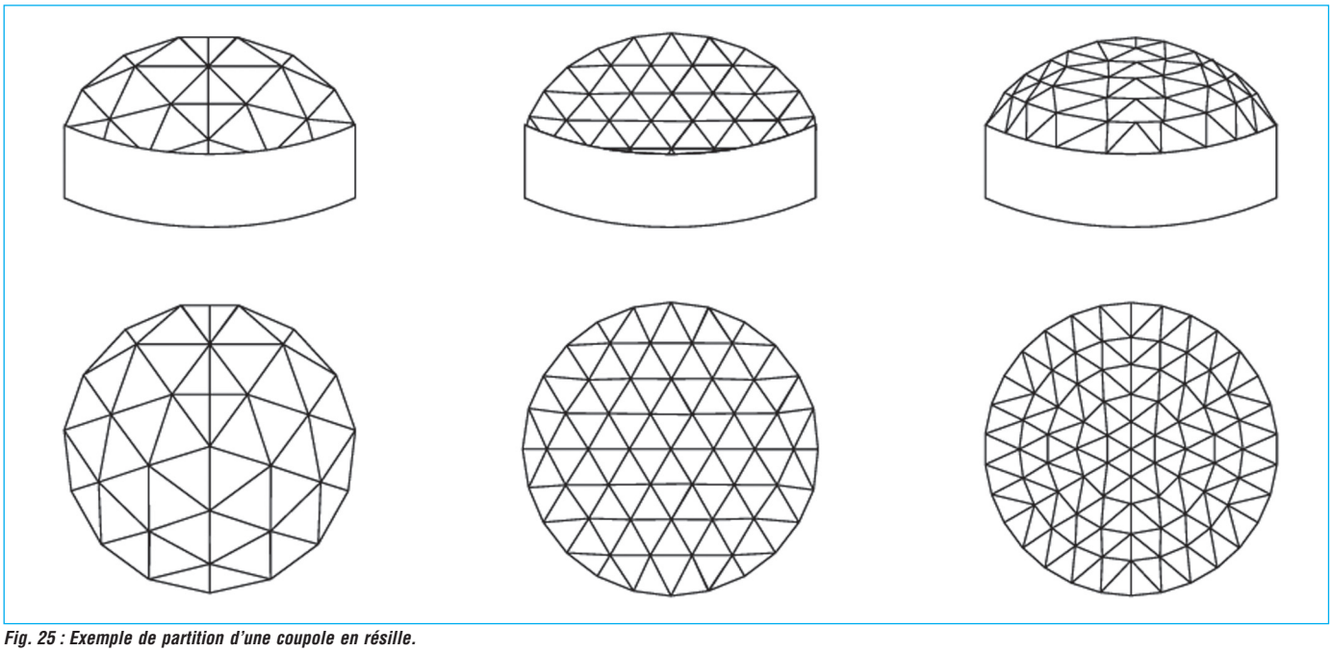


Fig. 25 : Exemple de partition d'une coupole en résille.

c) Résille lamellaire

Cette technique de construction s'applique aussi bien aux structures à simple courbure qu'aux surfaces à double courbure. Dans ce cas, elle détermine des plans losangés courbes, créant ainsi une résille parfois nommée « lamellaire » dont l'équilibre spatial est maintenu, par exemple, par un voile mince (*cf.* Fig. 26). Le voile remplit la fonction de couverture ou de support de couverture.

Les bordures sont constituées par des éléments porteurs en bois ou par une sablière solidaire du gros œuvre.

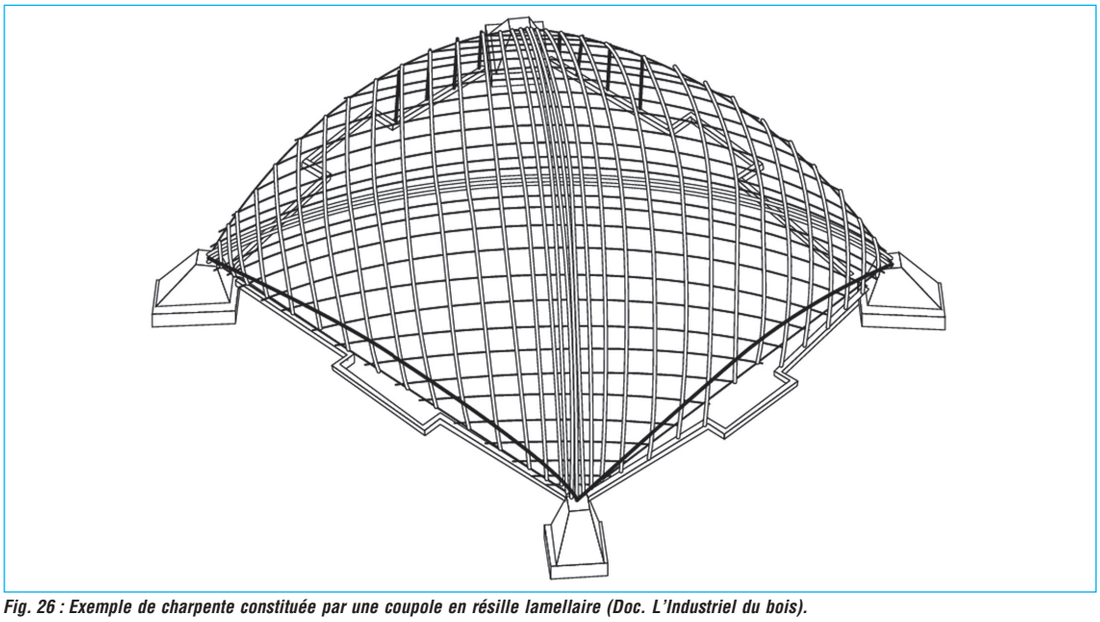


Fig. 26 : Exemple de charpente constituée par une coupole en résille lamellaire (Doc. L'Industriel du bois).

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

d) Ossature en treillis

Les réseaux réticulés sont une solution pour la réalisation de coupoles (*cf.* Fig. 27). Les assemblages sont étudiés afin de ne pas créer de moment de flexion parasite dans les barres. Dans ce cas, le système réticulé à structure fine joue le rôle de coque rigide. Ainsi, une telle coque réticulée, édifiée au Japon, constitue la toiture d'une salle de gymnastique de 64 × 47 m (*cf.* Fig. 28).

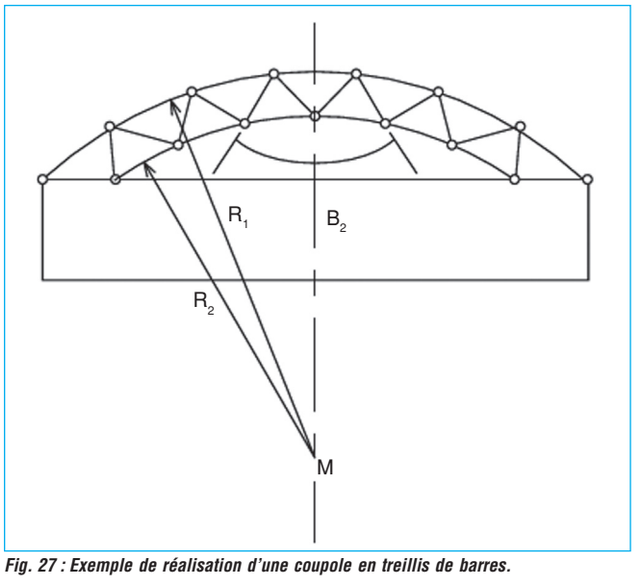


Fig. 27 : Exemple de réalisation d'une coupole en treillis de barres.

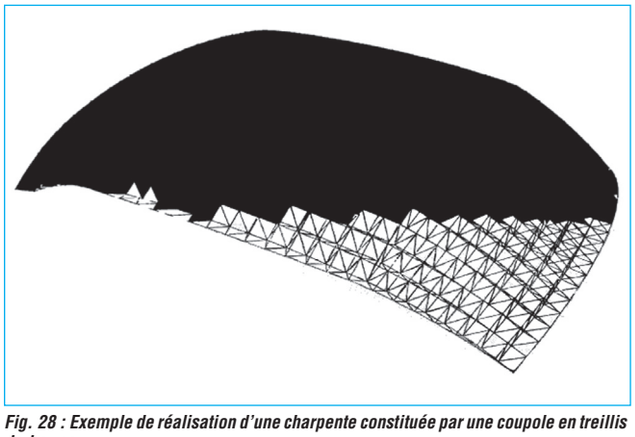


Fig. 28 : Exemple de réalisation d'une charpente constituée par une coupole en treillis de barres.

Conoïdes – Le conoïde est une surface obtenue en déplaçant une droite sur deux génératrices, l'une droite, l'autre courbe (*cf.* Fig. 29). Toutefois, les deux directrices peuvent être courbes, la courbure de l'une étant alors nettement plus accentuée que celle de l'autre.

Le fonctionnement statique de ce système dépend essentiellement des conditions d'appui au droit des rives :

• Si les bords longitudinaux du conoïde reposent sur des éléments continus susceptibles de reprendre des poussées, chaque tranche de voile joue le rôle d'un arc. On obtient alors des efforts de flexion sous les charges pour lesquelles les arcs fictifs ont un profil différent du funiculaire des efforts.

• Si les bords longitudinaux sont libres, son comportement est assez proche de celui d'une coque cylindrique de hauteur variable, et les efforts de flexion ne se développent qu'au voisinage des rives parallèles aux directrices.

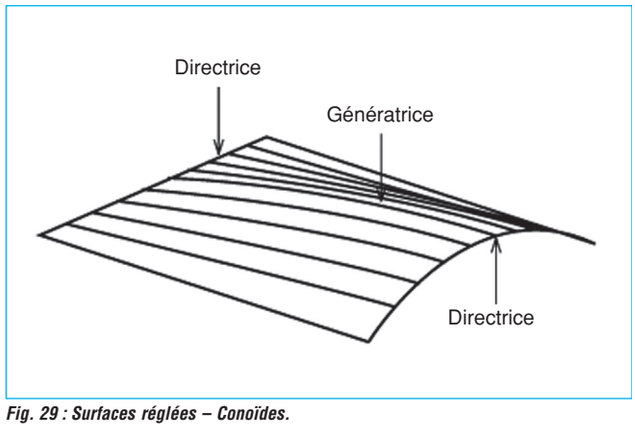


Fig. 29 : Surfaces réglées – Conoïdes.

Les techniques constructives correspondent à celles utilisées pour les coupoles.

L'emploi des conoïdes a été pratiqué dans le cas de couverture de plans rectangulaires, type usines ou tribunes de stade.

2. Paraboloïdes hyperboliques

Cette surface à deux courbures de sens opposés peut être engendrée de deux façons :

– par le déplacement d'une génératrice droite, sur deux directrices droites non parallèles dans l'espace ;
– par translation d'une parabole sur une autre parabole dont le sommet est de sens opposé à celui de la première.

Le paraboloïde hyperbolique a l'aspect d'une selle ayant une hyperbole pour section verticale. Selon le choix des plans d'intersection, il peut couvrir un plan carré, rectangulaire ou losangé, ou un plan curviligne quelconque, dont les rives sont droites ou courbes. Par ailleurs, à partir d'un paraboloïde hyperbolique donné, il existe un grand nombre de combinaisons possibles, notamment pour la couverture d'espaces nécessitant un éclairage zénithal (*cf.* Fig. 30).

Cette double courbure de sens opposé, engendrée par une droite se déplaçant sur deux droites non parallèles dans l'espace, a les avantages constructifs des surfaces réglées : son coffrage est simple du fait que ses génératrices sont des droites (*cf.* Fig. 31).

Son analyse géométrique et statique est simple : elle est composée de paraboles de sens opposés dans ses plans verticaux. Lors des charges verticales, les compressions s'exercent dans les paraboles debout et les tractions dans les paraboles tendues. En chaque point de rive aboutissent deux paraboles opposées ayant la même tangente. La réaction de ces deux arcs se transforme directement en effort normal dans la rive.

Dans le détail et hors des cas idéaux, les choses sont plus compliquées, mais les caractéristiques de cette surface offrent beaucoup d'intérêt. Plusieurs techniques de réalisation sont possibles : en voile mince et en résille.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

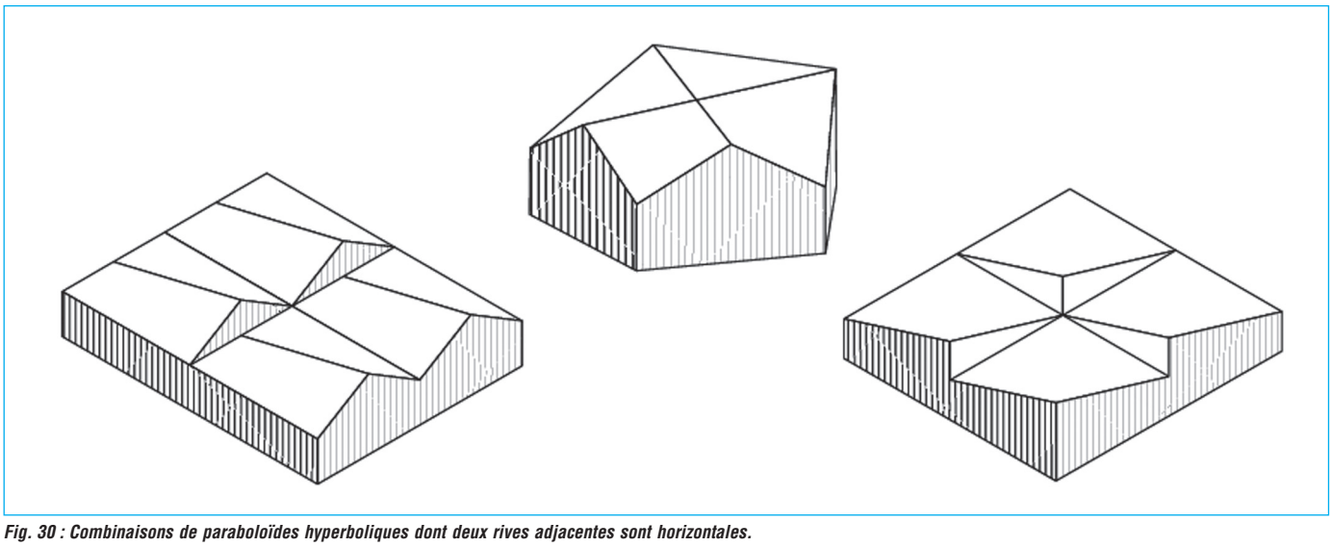


Fig. 30 : Combinaisons de paraboloïdes hyperboliques dont deux rives adjacentes sont horizontales.

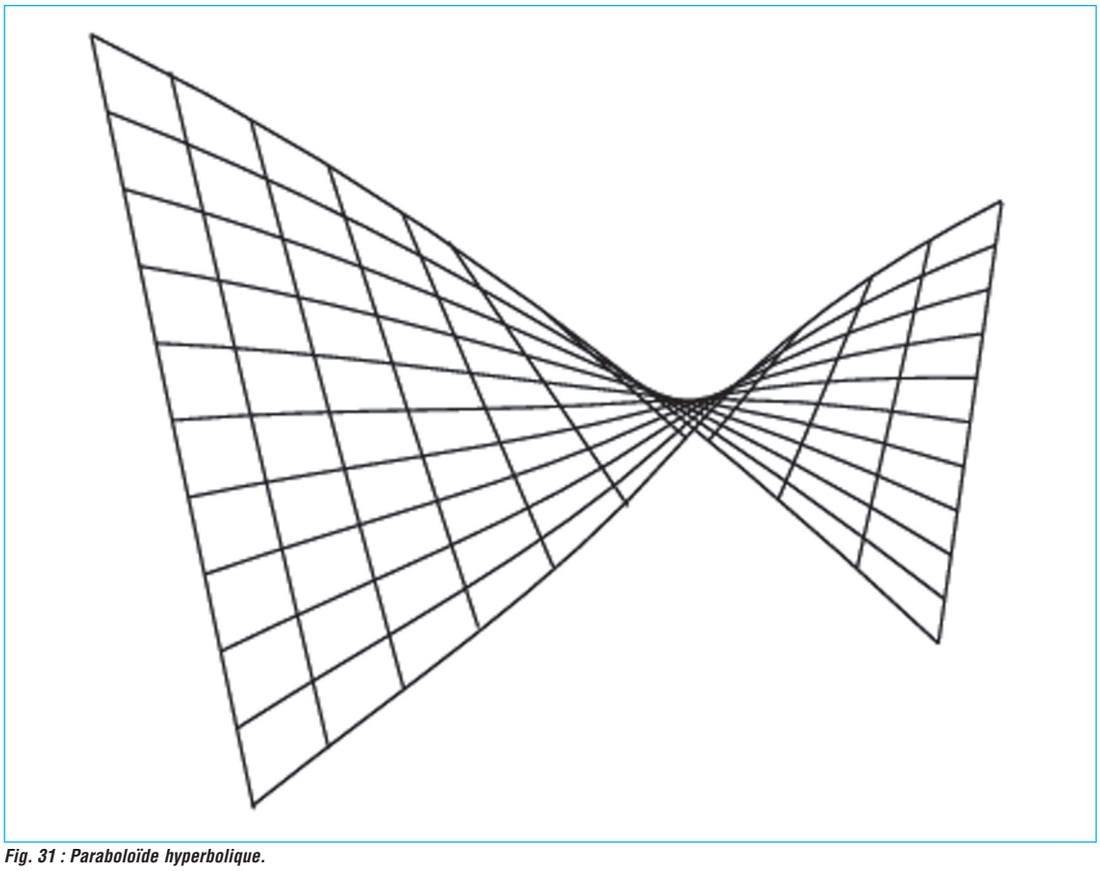


Fig. 31 : Paraboloïde hyperbolique.

a) En voile mince

Il est composé de lits croisés de planches (deux lits, trois lits ou plus, selon les besoins) assemblées par clouage ou par agrafage et collage.

Cette solution est intéressante quand la portée des paraboles est inférieure à 25 m environ et que ces paraboles ont une flèche au moins égale au 1/8 de la portée. Au-delà de cette valeur, les sollicitations secondaires entraînent une déformation du voile, en raison de sa faible épaisseur.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

La couverture du centre omnisport de la Porte de Pantin, avec sa combinaison de 21 paraboloïdes hyperboliques réalisés en voile mince, est l'ouvrage de référence en France. Autre exemple, en Allemagne, où la couverture d'une piscine a été réalisée avec 10 paraboloïdes hyperboliques disposés l'un à côté de l'autre sur deux rangées de 4 poteaux (*cf.* Fig. 32).

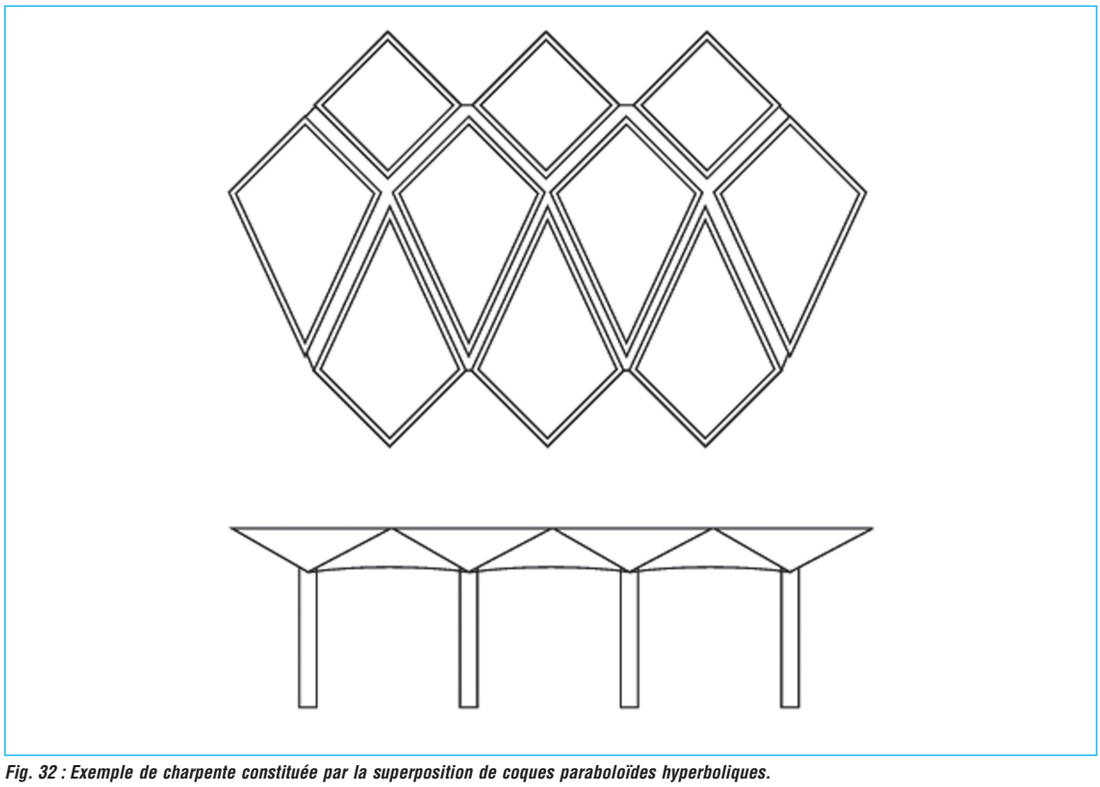


Fig. 32 : Exemple de charpente constituée par la superposition de coques paraboloïdes hyperboliques.

b) En résille

Selon la décomposition géométrique choisie, celle-ci peut être réalisée suivant les génératrices droites ou suivant les arcs. Un autre ouvrage de référence, provenant des années 1960, est la couverture de la piscine d'Aulnay-sous-Bois d'un espace de 49×49 m (*cf.* Fig. 33).

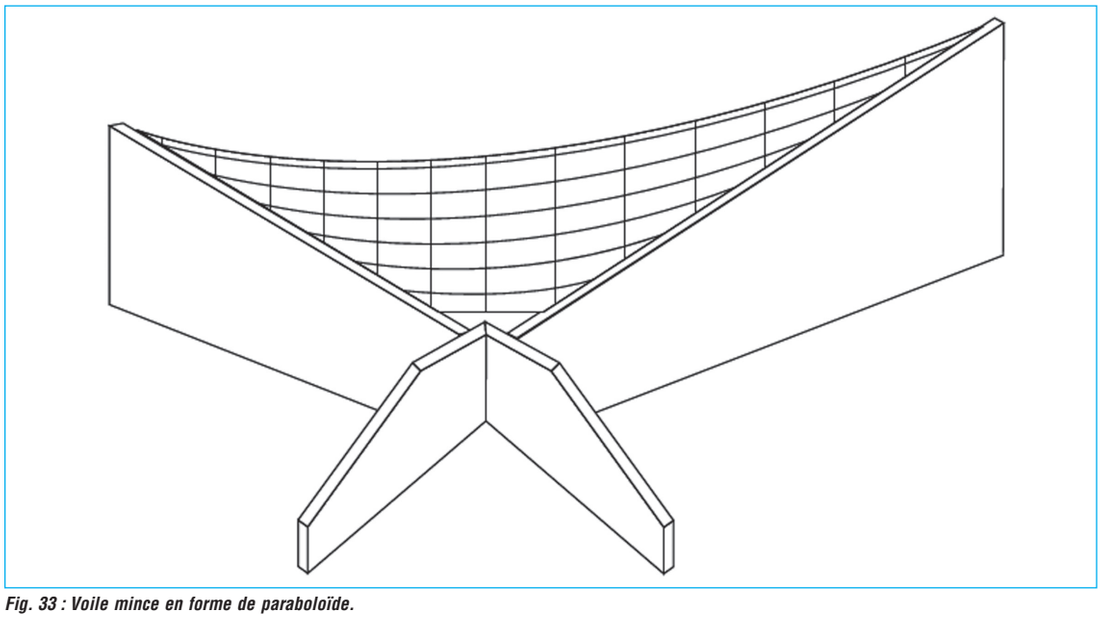


Fig. 33 : Voile mince en forme de paraboloïde.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

Forme de révolution – Il existe plusieurs possibilités pour générer une forme à double courbure par révolution :

• Des paraboloïdes et hyperboloïdes de révolution. Ce sont des surfaces à deux courbures de sens opposés engendrées par deux génératrices, droites inclinées symétriquement, et se déplaçant sur un ou deux cercles (*cf.* Fig. 34).

• Des formes définies à partir des segments de cercles, lignes sinusoïdales, paraboles, hyperboles autour d'un axe de rotation et des segments de tore de formes géométriques définissables.

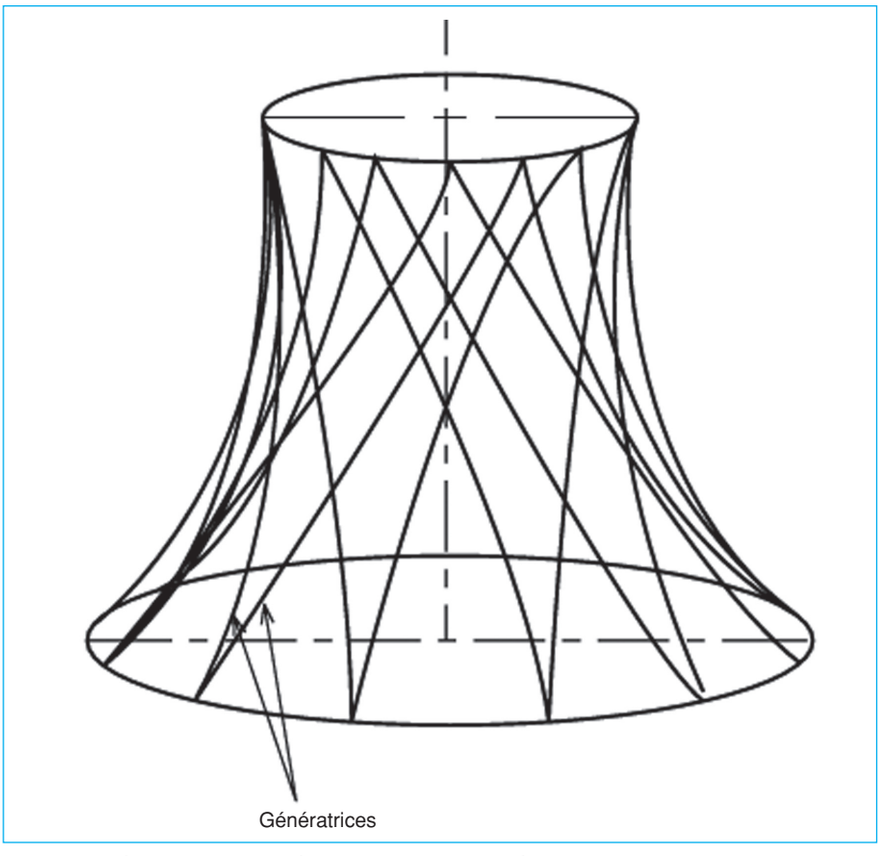


Fig. 34 : Forme à double courbure de révolution – Hyperboloïde de révolution.

Le bois est un matériau particulièrement adapté à la réalisation de telles structures où le rapport entre le poids propre et la capacité porteuse est fondamental.

Une première coque suspendue de plus de 67 m de hauteur et plus de 170 m de diamètre a été réalisée en 1991 pour la charpente d'une halle industrielle de retraitement de déchets à Vienne (Autriche). Sa toiture suspendue est en bois en forme de cône et la forme des 48 nervures a été choisie de manière à travailler à la traction (charge symétrique). Dans ce cas, la section verticale de l'hyperboloïde de révolution est une hyperbole et sa section horizontale est un cercle dont le diamètre varie suivant la hauteur à laquelle on coupe l'hyperboloïde.

Pour la réalisation de tels voiles en bois, la combinaison de nervures et de planches, liées par simple clouage, rend la structure monolithique. Elle est donc partiellement rigide à la flexion et permet ainsi de diminuer, voire de supprimer, la précontrainte.

G. Surfaces libres

On peut créer des formes libres parfaitement viables du point de vue structural. Les surfaces élémentaires présentées sont toutes maîtrisables par la géométrie. Les volumes engendrés peuvent être matérialisés et réalisés par des moyens simples. Leur définition géométrique et statique provient d'une même analyse, et leur construction relève des mêmes principes.

Mis à part le souci de rationaliser les constructions, il est possible d'augmenter les formes des voiles minces uniquement définies par les lois de la géométrie.

Les charpentes des deux pavillons d'exposition et d'un centre d'information japonais (NARA) ont été réalisées avec une grille de poutres lattées formant une voûte. Ils ont été conçus à partir d'une forme libre matérialisée par des mobiles. La modélisation et le calcul des formes ont pour objet de limiter l'effet du poids propre aux seules contraintes de membrane (*cf.* Fig. 35).

Le recours aux calculs informatiques permet d'optimiser les formes en fonction du matériau et de la nature de la structure. La forme des nervures méridiennes et concentriques, en bois lamellé-collé à double courbure, a été calculée pour suivre au plus près le chemin des contraintes principales. Par exemple, la forme de la coque suspendue nervurée en bois (*cf.* Fig. 36), est ajustée pour que l'état de contrainte de la membrane reprenne largement les charges.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

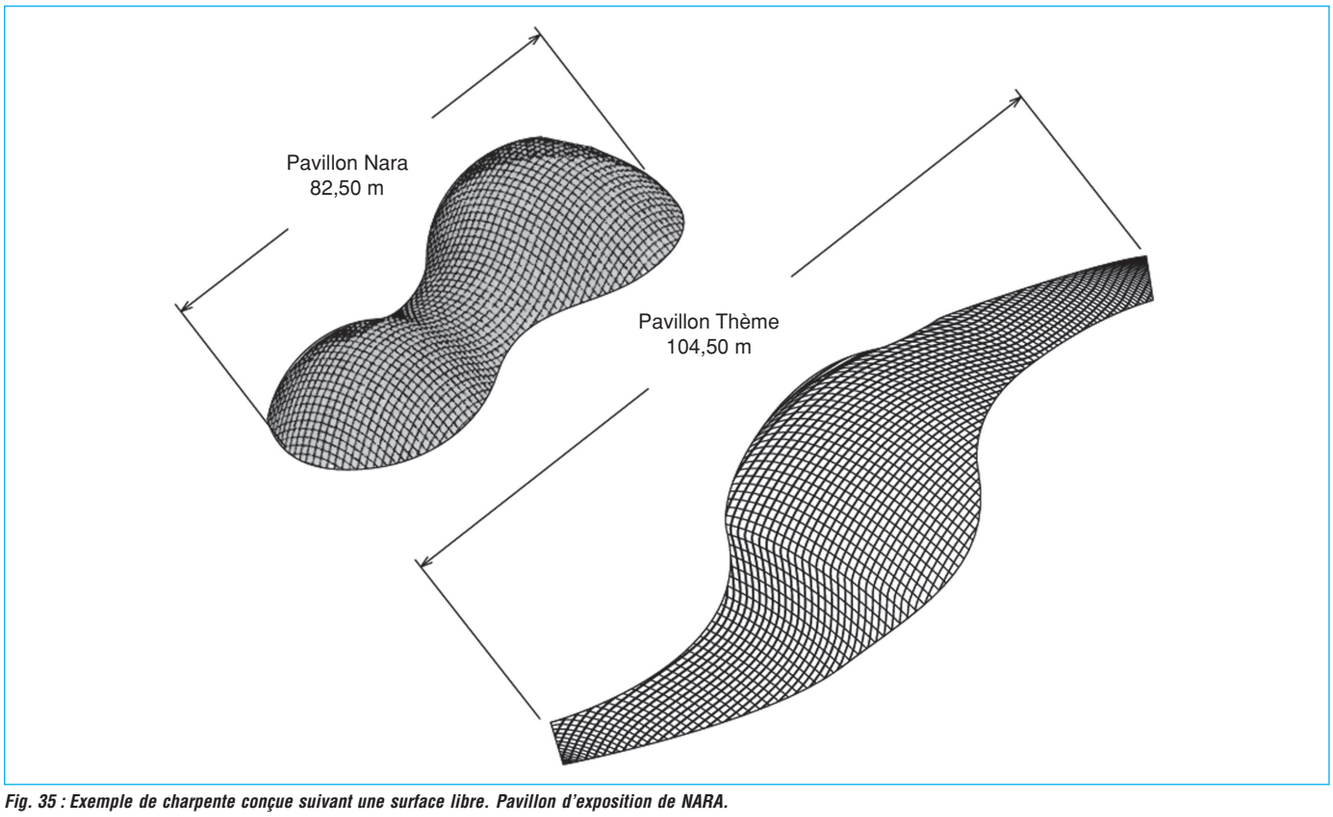


Fig. 35 : Exemple de charpente conçue suivant une surface libre. Pavillon d'exposition de NARA.

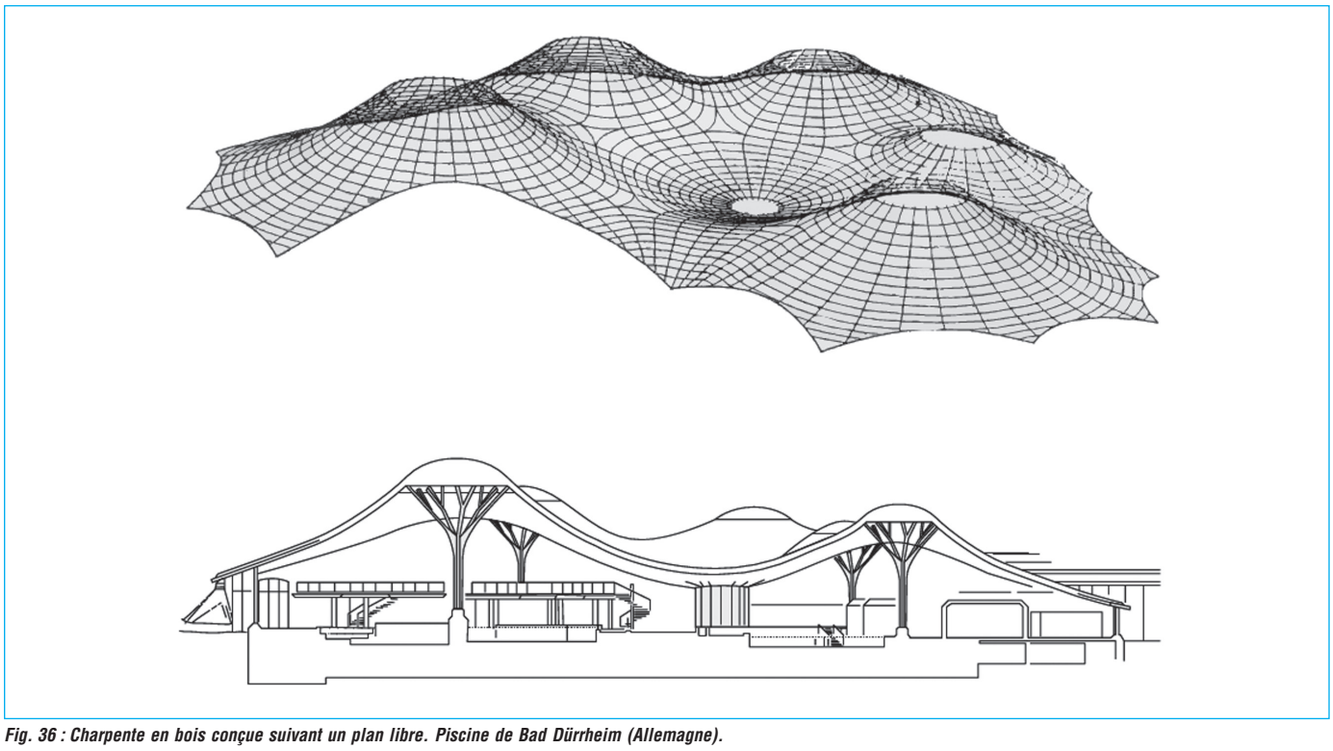


Fig. 36 : Charpente en bois conçue suivant un plan libre. Piscine de Bad Dürrheim (Allemagne).

Parution : octobre 2012 - Ce document a ete delivre pour le compte de 7200047512 - lycee paul moreau // nc SERVICE INTENDANCE // 80.8.184.126

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie
est strictement interdite. – © Editions T.I.

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

L'expertise technique et scientifique de référence

Techniques de l'Ingénieur vous apporte une information précise et fiable pour l'étude et la réalisation de vos projets.

Actualisées en permanence, les **ressources documentaires** profitent aujourd'hui à plus de **300 000 utilisateurs** et sont la référence pour tout ingénieur, bureau d'études, direction technique et centre de documentation.

Depuis près de 70 ans, **3 500 experts** contribuent quotidiennement à développer, enrichir et mettre à jour cette documentation professionnelle unique en son genre.

L'intégralité de ces ressources représente plus de **9 000 articles**, répartis dans plus de **430 bases documentaires**, accessibles sur internet, en téléchargement PDF, et sur tablette.

4 BONNES RAISONS DE CHOISIR TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

- Une actualisation permanente du fonds documentaire
- Un comité d'experts scientifiques et techniques reconnus
- Une collection scientifique et technique incontournable sur le marché francophone
- L'espace actualité pour suivre les tendances et innovations de vos secteurs



DES SERVICES ASSOCIÉS À CHAQUE ABONNEMENT

- **Service de questions-réponses** [1][2] **:** interrogez les plus grands spécialistes des domaines couverts par vos bases documentaires. Votre abonnement vous permet en effet de poser des questions techniques ou scientifiques.
- **Les articles Découverte :** un article vous intéresse, mais ne fait pas partie de votre abonnement ? Techniques de l'Ingénieur vous offre la possibilité de l'ajouter.
- **Le Dictionnaire technique multilingue :** 45 000 termes scientifiques et techniques – avec illustrations et légendes – en français, anglais, espagnol, allemand.
- **Les Archives :** vos bases documentaires s'enrichissent et sont mises à jour en ligne en permanence. Les Archives conservent la mémoire de ces évolutions et vous permettent d'accéder aux versions antérieures de vos articles, ainsi qu'à ceux qui traitent des technologies plus anciennes.

Profitez également de l'impression à la demande [1], pour commander une ou plusieurs éditions papier supplémentaires de vos bases documentaires (sur devis).

(1) Disponible pour la France, le Luxembourg, la Belgique, la Suisse et Monaco.
(2) Non disponible pour les établissements scolaires, écoles, universités et autres organismes de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE :

Sagemcom · EDF · Safran · École Polytechnique · Arkema · AgroParisTech · 3M · Siemens · Rolex · ACS · Dassault Aviation · EADS · L'Oréal · Saint-Gobain · GE · Schneider Electric · Thales · Total

TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

Pour disposer d'un panorama complet sur une thématique

DÉCOUVREZ
les offres de packs !

LES + DES OFFRES PACK

- Un large choix de **+ de 60 thématiques** pour des besoins de contenu plus larges
- Des **tarifs préférentiels sur mesure** adaptés à vos besoins

LES UNIVERS DOCUMENTAIRES

- Plus de 430 bases documentaires et plus de 9 000 articles en 14 univers

- Sciences fondamentales
- Environnement - Sécurité
- Énergies
- Technologies de l'information
- Mécanique
- Innovations
- Génie industriel
- Biomédical - Pharma
- Procédés Chimie -Bio - Agro
- Matériaux
- Mesures - Analyses
- Électronique - automatique
- Construction
- Transports



POUR EN SAVOIR PLUS SUR LES OFFRES DE PACKS...

... contactez le service Relation Clientèle
qui se chargera de vous rediriger vers un chargé d'affaires :

Tél : +33 (0)1 53 35 20 20

Email : infos.clients@teching.com
www.techniques-ingenieur.fr

LES AVANTAGES TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Le droit d'accès, annuel ou pluriannuel, permet une consultation illimitée des ressources documentaires sélectionnées, ainsi que le téléchargement des versions PDF des articles de référence ou fiches pratiques inclus dans ces ressources. Les droits d'accès sont proposés en monoposte ou multiposte.

- **ACTUALISATION PERMANENTE**
  Mises à jour permanentes, publication de nouveaux articles de références et fiches pratique : un contenu complet sur le sujet qui vous intéresse, des alertes par email.

- **DES SERVICES INCLUS**
  En plus de l'accès aux ressources documentaires, chaque souscription offre un accès privilégié à un ensemble de services.

- **MOBILITÉ** Available on the App Store
  Votre abonnement étant 100 % web, vous pouvez le consulter à tout moment, sur n'importe quel ordinateur ou sur nos versions iPad et Android.

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Pour accompagner vos équipes et projets, CHOISISSEZ les offres de formation et conseil

MONTEZ EN COMPETENCE

- Des formations personnalisées, réalisées au sein de votre établissement et à vos dates
- Un accompagnement à la mise en conformité réglementaire
- Des missions d'audit et de recommandations techniques

LES ENGAGEMENTS TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

- Un réseau d'experts reconnus pour vous conseiller
- Une veille scientifique et technique pour mieux décider
- Les dernières obligations HSE pour être en règle
- Les clés en management des hommes et des projets pour gagner en efficacité

Consultez l'intégralité des programmes sur le site de Techniques de l'Ingénieur, espaces FORMATION et CONSEIL

www.techniques-ingenieur.fr



RESSOURCES DOCUMENTAIRES | FORMATION | CONSEIL

Nous contacter : Tél. : +33 (0)1 53 35 20 20 – Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 – E-mail : infos.clients@teching.com