

CHAPITRE 2 : LES STRUCTURES DE GRANDES PORTÉES

2.1 Introduction

Les structures à grande portée sont des structures d'une portée supérieure à 15 ou 20 mètres. En règle générale, les grandes portées permettent d'obtenir des espaces internes flexibles et sans colonne, de réduire les coûts de sous-construction et d'allonger la structure. Les structures à grandes portées répondent à des exigences formelles et fonctionnelles grâce aux développements en matière des techniques et des matériaux de construction. Ils sont utilisés généralement dans les grands bâtiments qui nécessitent des grands espaces. La structure à grande portée est apparue avec l'évolution des systèmes constructifs et des matériaux de construction, elle permet d'avoir une portée maximale entre deux appuis, donc avoir des surfaces libres et dégagées pour permettre une facilité dans la division des espaces intérieurs.

2.2 La structure en lamellé collé

2.2.1 Définition du bois lamellé- collé

On appelle bois lamellé-collé des pièces massives reconstituées à partir de lamelles en bois, de dimensions relativement réduites par rapport à celles de la pièce, assemblées par collage. Ces lamelles sont disposées de telle sorte que leurs fils soient parallèles. Un certain nombre d'avantages explique le développement croissant de cette technique de structure.

La portée libre : L'avantage primordial des structures en lamellé-collé est la possibilité d'obtenir des portées très importantes, car les dimensions des poutres ou des arcs sont pratiquement illimitées, grâce à la possibilité de jumeler les éléments porteurs dans les cas extrêmes. En effet, si des portées de 100 mètres ont été atteintes sans difficulté majeure, et s'il est permis d'envisager dans de bonnes conditions des portées beaucoup plus importantes encore, les réalisations classiques sont le plus souvent dans la fourchette de 30-70 mètres.

La performance mécanique : Quelle que la classe du bois en lamellé collé, la masse volumique du matériau se situe entre 350 et 500 kg/m³... Un rapport performance/masse particulièrement intéressant. Léger et solide à la fois, le bois lamellé autorise la réalisation de sections importantes, capables d'assumer de très longues portées. Par ailleurs, la purge des défauts, effectuée lors de sa

fabrication, améliore encore les performances du bois lamellé, qui dépasse ainsi largement celles d'un bois massif.

Préfabrication et délais de livraison : Les charpentes en bois, par leurs possibilités de montage très rapides et simples, sont idéales en ce domaine. En effet, comme il s'agit d'éléments préfabriqués, relativement légers, leur mise en œuvre pose rarement de problèmes, sauf dans le cas de très grands arcs qui demandent des engins de manutention importants. On arrive ainsi à des gains de temps très appréciables.

Légèreté : le bois pour un faible poids propre peut avoir d'excellentes résistances mécaniques, il est donc le plus souvent inutile d'exécuter des fondations importantes. Cela permet de bâtir même sur des terrains médiocres, sans avoir recours à des travaux de génie civil coûteux.

Entretien réduit : Si elles ne sont pas exposées directement aux intempéries, les charpentes en bois lamellé-collé, protégées efficacement en atelier, peuvent résister de nombreuses années sans recevoir de couches de protection supplémentaires.

Une excellente résistance à la corrosion : Il est bien connu que le bois résiste très bien à l'action des produits chimiques (acides ou bases) ou de leurs vapeurs. Certaines essences de bois sont d'ailleurs réputées comme particulièrement résistantes.

Le caractère esthétique : Le bois apporte un élément de chaleur, un élément vivant dans des constructions dont l'architecture serait par ailleurs austère. Par sa couleur, il donne un éclairage intérieur aux constructions, dont il est l'élément porteur.

Économie : Cependant, on aurait tort de croire que le lamellé-collé se cantonne aux constructions de prestige, il est à notre sens, typiquement un matériau préfabriqué utilisable dans tous les cas, et le plus souvent compétitif comparé au métal et au béton, lorsque les projets sont considérés dans leur ensemble gros œuvre, charpente, couverture, bardage. En effet, le lamellé-collé permet souvent un allègement très appréciable des fondations, un accrochage aisé des solutions de bardages ou de couvertures adaptées. Il en résulte des économies substantielles sur des projets d'ensemble, tous corps d'états réunis.

Souplesse d'exploitation : Il est très facile de concevoir des extensions aux bâtiments construits à l'aide de charpente en bois. Ces extensions peuvent se faire dans le sens de la longueur, si l'on a eu le soin de prévoir un arc support derrière le mur pignon, lorsqu'il y en a un. Par ailleurs, des extensions latérales sont également très possibles, puisque l'on peut très facilement ajouter aux charpentes en bois, des auvents, des portiques, etc. Des modifications importantes de plans originaux ou de cloisonnements internes peuvent être effectuées sans difficultés.

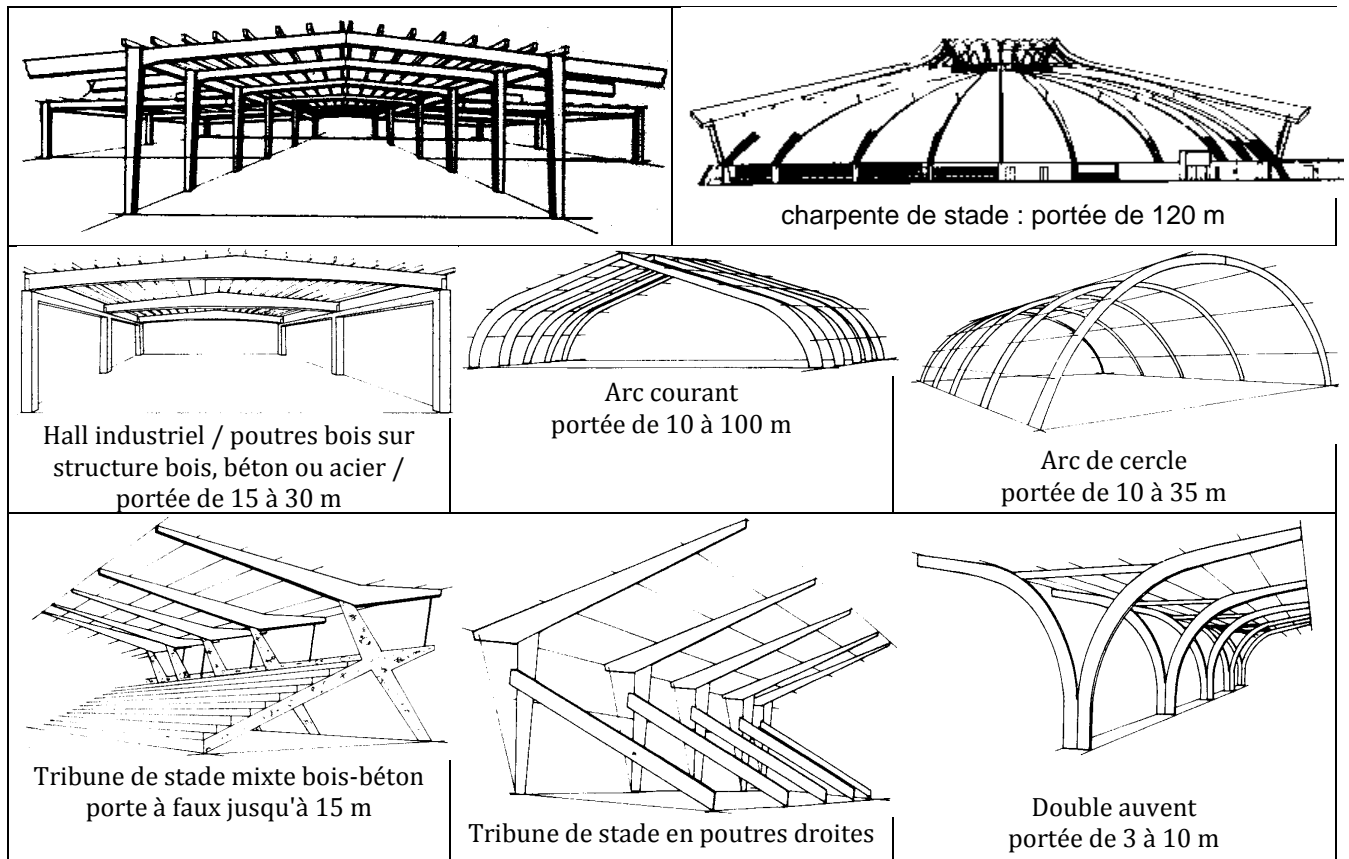


Figure 2.2.1 : Ouvrages à ossature bois lamellé-collé

2.2.2 Dimensions et formes des éléments

La technique du bois lamellé permet de varier considérablement la forme de la section transversale et la géométrie des éléments structuraux. Seules limites ? Celles fixées par le transport, les locaux des fabricants et les équipements mécaniques

Différentes poutres :

- *Poutre droite* : flèche $L/300$, recommandée pour les portées inférieure à $20m$;
- *Poutre bi-pente intrados droit* : flèche $L/300$ recommandée pour les portées entre $20m$ et $35m$;
- *Poutre bi-pente intrados courbe* : flèche $L/300$; pour les portées inférieurs à $30m$.
- *Poutre monopente intrados courbe* : flèche $L/300$; préconisée pour les portées entre $20m$ et $35m$
- *Poutre treillis* : À résistance égale avec une poutre simple, recommandée pour les portées supérieure à $35m$, la poutre treillis présente les avantages suivants.
 - Légèreté ;
 - Nécessite moins de matière ;

- le franchissement de grandes portées ;
 - Montage en atelier ou sur chantier ;
 - Joints de transport possibles ;
 - Possibilité d'intégrer les réseaux.)
- *Poutre sous tendue* : Le système de tirants métalliques permet d'alléger les structures par rapport au système de poutres pleines, recommandée pour les portées supérieure à 35m .
 - *Ferme triangulée* :
 - Structure légère ;
 - Pente minimale 20%.

Système en arc :

- Idéal pour les grandes portées ;
- Joints de transport possibles ;
- Structure unique pour façade et toiture.

2.2.3 Systèmes constructifs

Les principales solutions constructives faisant appel au bois lamellé-collé peuvent être commodément étudiées d'après leur type de fonctionnement.

Fonctionnement en poutre : Toutes les réalisations comportant essentiellement des pièces travaillant sur appuis libres, qu'elles soient droites ou courbes. La poutre peut n'avoir qu'une seule travée sur appui libre pour des portées allant jusqu'à une quinzaine de mètres. Elle peut être continue sur appuis multiples ou du type « cantilever », les portées libres entre appuis pouvant atteindre une vingtaine de mètres.

Fonctionnement en arc : Dans ce cas, les conditions de travail particulièrement favorables au bois lamellé-collé, permettent d'atteindre des portées libres très importantes (100 m et plus), la limite étant essentiellement définie par la forme de l'arc et non son type de fonctionnement isostatique (arcs à 3 articulations) ou hyperstatique (arcs à 2 articulations). Pour la réalisation de structures reposant sur des murs, la technique de l'arc (brisé ou en courbe continue) sous-tendu par un tirant métallique, est très intéressante lorsque la présence de celui-ci ne présente pas d'inconvénients. Pour des portées moyennes, les portiques en éléments droits assemblés, correspondent parfois mieux aux critères de la mode la plus récente.

Fonctionnement en porte à faux : Ce type de structure, employé pour les ouvrages nécessitant une ouverture totale sur l'un des longs pans, se prête très bien à l'utilisation de bois lamellé-collé, mais nécessite un soin tout particulier quant au choix des solutions d'ancrage, à moins que la présence de certains éléments fonctionnels (tels que des supports de tribune, par exemple) permettent de résoudre simplement la question.

Certaines autres solutions, non particulièrement attachées à un type de fonctionnement, sont souvent rencontrées :

Voiles minces : Bien que n'étant pas directement apparenté à la technique du lamellé-collé, le voile mince, en utilise pour sa réalisation des poutres de rive qui lui sont nécessaires. On peut obtenir avec cette formule des ensembles architecturaux d'une grande recherche esthétique par l'emploi de formes originales comme celles des paraboloïdes hyperboliques, des conçoïdes simples ou multiples, etc.

Faux voiles : Parallèlement à la technique précédente, des coques ou « faux voiles » de formes très diverses ont pu être réalisées et sont généralement fondées sur l'utilisation de 2 familles orthogonales de pièces lamellées-collées tendues ou comprimées et permettent d'obtenir, en même temps que l'aspect extérieur très pur d'un voile, une sous-face extrêmement agréable pour un observateur situé à l'intérieur de l'édifice.

Chevrons courbes : Nous avons laissé une place à part aux chevrons courbes, qui bien qu'étant des arcs, sont à considérer sous un autre angle ; il s'agit en effet d'éléments standards en arc de cercle, de faibles sections, pour les fabrications industrielles. Par le jeu des combinaisons, on arrive à obtenir avec des éléments simples, des formes variées et des portées comprises entre 6 et 35 mètres. Le seul inconvénient du système est l'écartement des travées qui reste généralement inférieur à 3,50 m et le plus souvent à 3 mètres.

Systèmes constructifs employés en lamellé collée

- 1. Systèmes isostatiques** : Se dit d'un système matériel dont les liaisons mécaniques (notamment les réactions d'appui) peuvent être caractérisées par la statique : le nombre d'inconnues de liaison est égal au nombre d'équations données par le principe d'équilibre de la statique. On peut citer comme exemples :
 - Poutres droites ou légèrement courbes sur deux appuis ;
 - Arc à trois articulations.
- 2. Systèmes hyperstatiques** : Se dit d'une structure pour laquelle on ne peut déterminer les sollicitations qui résultent d'un système de charges donné à partir des seules équations de la statique. Pour déterminer son équilibre, il faut faire

intervenir d'autres équations supplémentaires à partir de la résistance des matériaux. On peut citer comme exemples :

- Poutres continues de deux ou plusieurs travées ;
- Arc à deux articulations ;
- Portiques à traverses droites ou courbes, articulés en pied.

3. Systèmes particuliers :

- Voiles minces ;
- Poutres à treillis de grande portée ;
- Système mixtes aciers- bois ;

Avantages et inconvénients des différents systèmes

Système isostatique	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul et assemblage simple ; - Peu de répercussion sur les fondations, sauf pour les arcs à trois articulations ; - Peu d'influence en cas de tassement des fondations.
Système hyperstatique	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul relativement plus complexe ; - Assemblage parfois plus délicats pour assurer la continuité de certains éléments ; - Meilleure utilisation des sections ; - Déformation plus faible ; - Influence des tassements d'appuis.
Système particulier	<ul style="list-style-type: none"> - Les voiles paraboliques hyperboliques entraînent souvent une mise en œuvre plus délicate mais permettent de réaliser de façon spectaculaire, de grandes surfaces sans appui intermédiaire. - Les systèmes mixtes peuvent être adoptés avec encastrement du poteau haut et bas avec des poteaux en V, articulés haut et bas. Ces solutions conviennent généralement avec des poteaux en aciers.

2.3 Structures tridimensionnelles métalliques

2.3.1 Définition

La structure tridimensionnelle est l'une des structures spatiales, c'est un terme qui comprend les structures généralement industrialisées et métalliques, permettant la réalisation de constructions de grandes portées sans appuis intermédiaires. Ce type de structure se maintient grâce à la rigidité des triangles constitués de barres droites qui sont liaisonnées par des nœuds. L'articulation est le mode de liaison dans les nœuds afin de soumettre les barres à des efforts de traction et de compression. Les nœuds des structures spatiales réticulées sont considérés comme des rotules. Contrairement à ce qui se passe avec les composants usuels de stabilité, un ensemble spatial ou tridimensionnel se suffit à lui-même. La rigidité est assurée par la structure elle-même pour toutes les sollicitations dans toutes les directions de l'espace.

2.3.2 Avantages des structures tridimensionnelles

Légèreté : le fait que le matériau est distribué spatialement de telle sorte que le transfert de la charge est principalement axial ; traction ou compression. Par conséquent, tout élément donné est utilisé dans toute sa mesure. De plus, la plupart des cadres spatiaux sont maintenant construits avec de l'aluminium, ce qui diminue considérablement leur poids propre.

Rigidité : un cadre spatial est généralement suffisamment rigide malgré sa légèreté. Cela est dû à son caractère tridimensionnel et à la participation totale de tous ses éléments constitutifs.

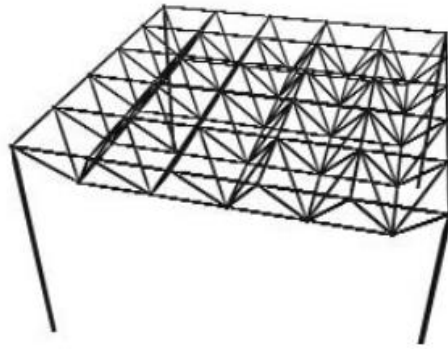
Polyvalence : les structures tridimensionnelles possèdent une polyvalence de forme et peuvent utiliser un module standard pour générer diverses grilles d'espace plat, une coque grillagée ou même des formes de forme libre.

Économie de matière : les structures tridimensionnelles peuvent être construites à partir de simples unités préfabriquées, qui sont souvent de taille et de forme standard. Ces unités peuvent être facilement transportées et rapidement assemblées sur site par une main-d'œuvre semi-qualifiée. Par conséquent, des cadres spatiaux peuvent être construits à moindre coût.

2.3.3 Classification des structures tridimensionnelles

A. Selon la forme

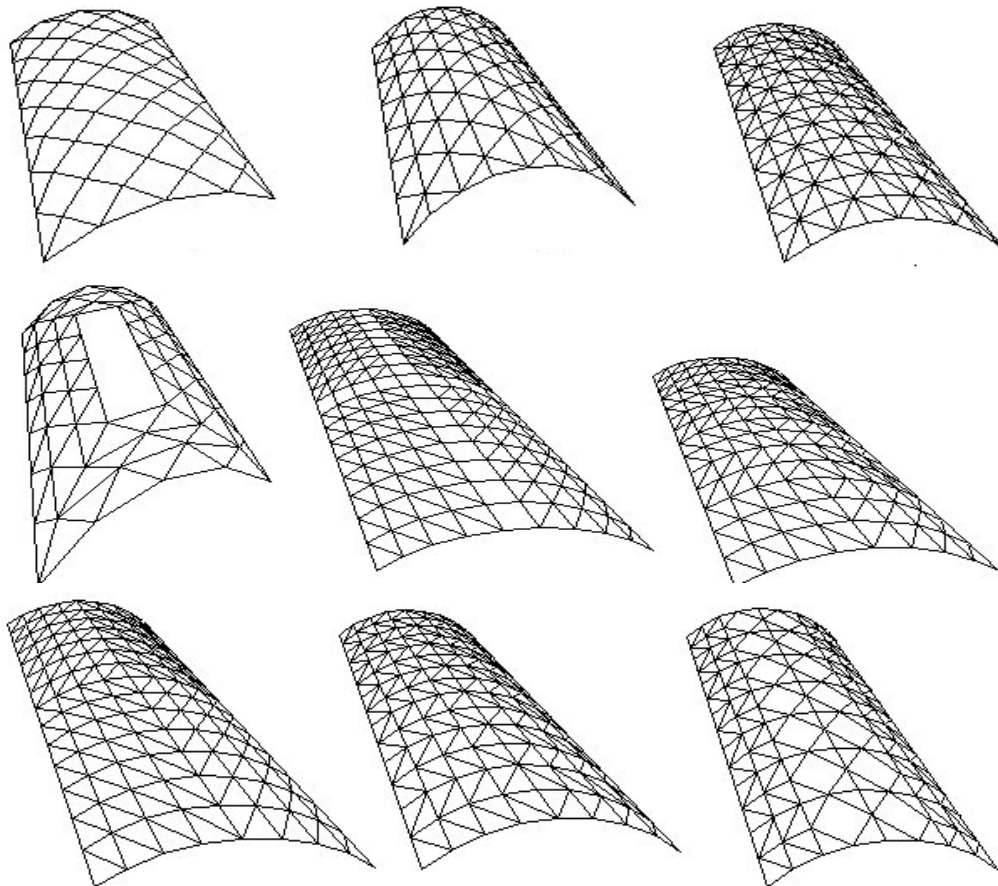
- *Structure plate (couverture plane)* : Ces structures sont composées de sous-structures planes. Le plan est canalisé à travers les barres horizontales et les forces de cisaillement sont supportées par la diagonale.



- *Voûtes en berceau (cylindrique)* : Le principe de l'arc peut être utilisé pour des nappes cintrées dans une direction formant une voûte, ce type de cadre spatial n'a pas besoin d'utiliser des modules ou des pyramides tétraédriques dans le cadre de son support. Cette forme est adéquate pour les toits des halls, des gares et des installations sportives.

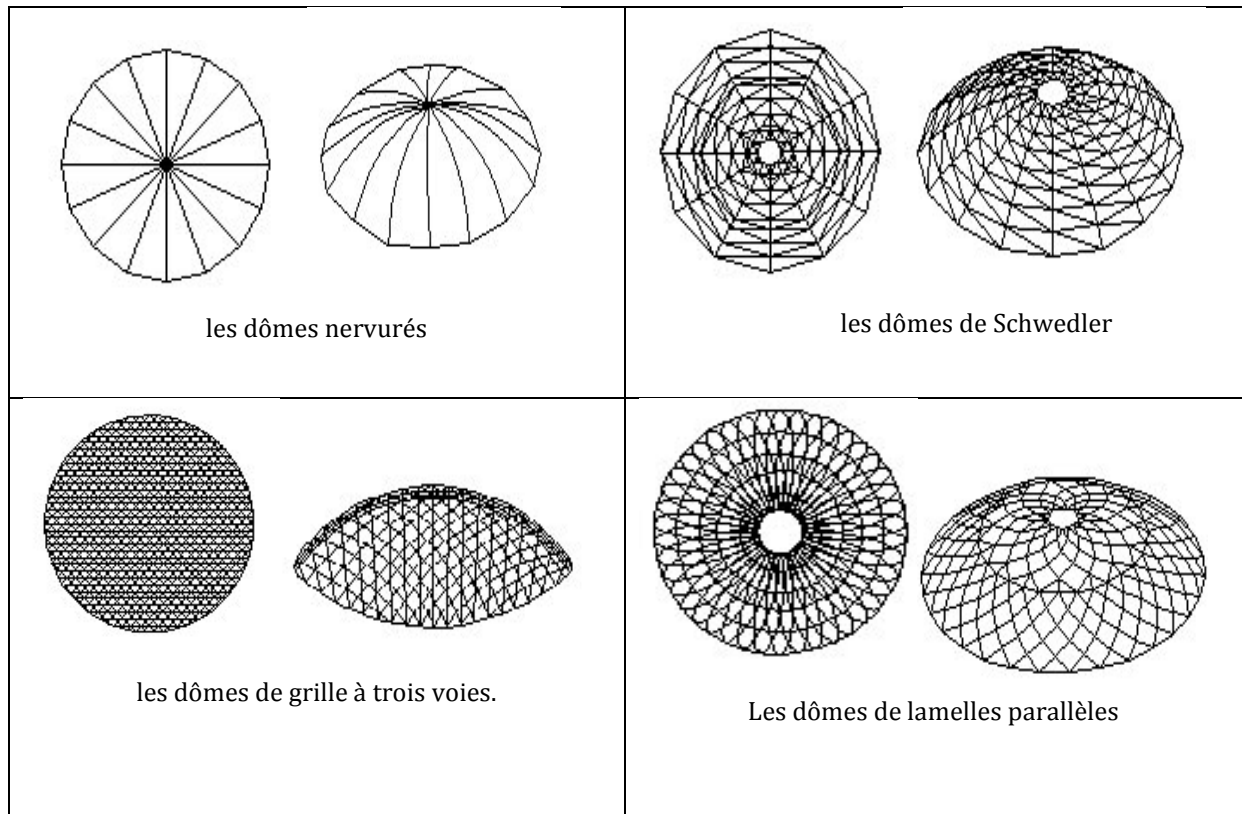
Une efficacité maximale peut être atteinte pour des formes à surfaces rectangulaires et un rapport longueur / largeur compris entre 1 et 2. La forme optimale est obtenue avec un rapport élévation / portée de l'ordre de 0,15 à 0,20.

Plusieurs géométries de grille (nappe) sont possibles (figure ci-dessous).



Les portées économiques des voutes à une seule grille sont de l'ordre de 20 m. elles peuvent être augmentées en insérant des éléments diagonaux. Ils atteignent 60 m pour les systèmes à double couche, dans certains cas encore plus. Les poids appropriés pour les systèmes à double couche varient entre 0,13 et 0,25kN / m² en fonction de la forme prévue, des conditions de support et de la géométrie des feuilles (pour une charge uniforme comprise entre 0,75 et 1,50kN / m²).

- *Dômes* : Les structures de dômes peuvent être classées en fonction de l'orientation et de la position des éléments principaux. les types les plus répandus sont :



Les dômes fournissent le volume clos maximal pour une surface minimale. Les systèmes simple et double couche permettent des portées d'environ 40 m et plus de 100 m respectivement. Certaines solutions à double couche ont atteint des portées «record» de plus de 200 m.

La différence de comportement des coupôles par rapport aux voûtes cylindriques réside dans la sensibilité aux actions asymétriques (vent) et la résistance aux phénomènes globaux de flambement qui sont strictement liées à la rigidité de la forme géométrique. Pour les voûtes cylindriques, leur surface a une courbure unique, elle peut donc être développée sur plan. En revanche, les dômes, ayant une double courbure, résistent à toutes les actions grâce à la forme elle-même.

La disposition géométrique adéquate des éléments des dômes, que ce soit pour une construction simple ou double couche, nécessite à utiliser moins de longueurs différentes pour les éléments. De

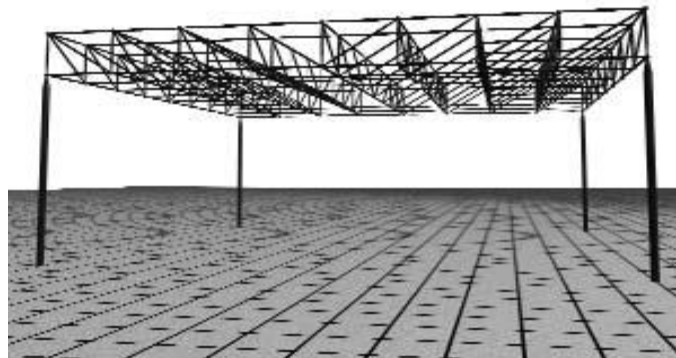
plus, il est important de vérifier que les polygones définis sont aussi similaires que possible, afin de faciliter le revêtement.

B. Selon le nombre de nappe

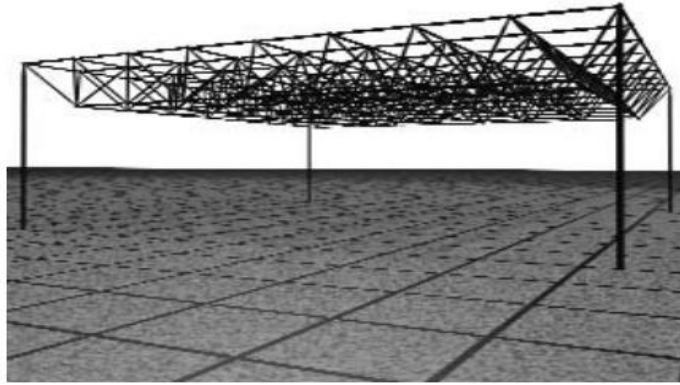
- **Une seule nappe** : Les simples nappes présentent une rigidité propre quasi nulle ; c'est donc la forme et les conditions d'appuis de l'ouvrage qui vont assurer sa stabilité. Les formes planes, ou proches du plan, ne peuvent se concevoir en simple nappe, du fait que l'équilibre des forces extérieures et intérieures ne peut être assuré, ces dernières devant être considérablement plus importantes pour obtenir une force résultante d'équilibre si la surface est proche du plan. Elles seront donc, en général des formes sphériques ou cylindriques ; la conception de la géométrie devra éviter que les angles entre membrures n'approchent les 180° .

- **Double nappes** : Les éléments sont organisés en deux couches parallèles l'une à l'autre à une certaine distance. Les barres diagonales (éléments de contreventement) reliant les nœuds des deux couches dans différentes directions de l'espace. On peut distinguer plusieurs formes de grilles à double couche, on peut citer :

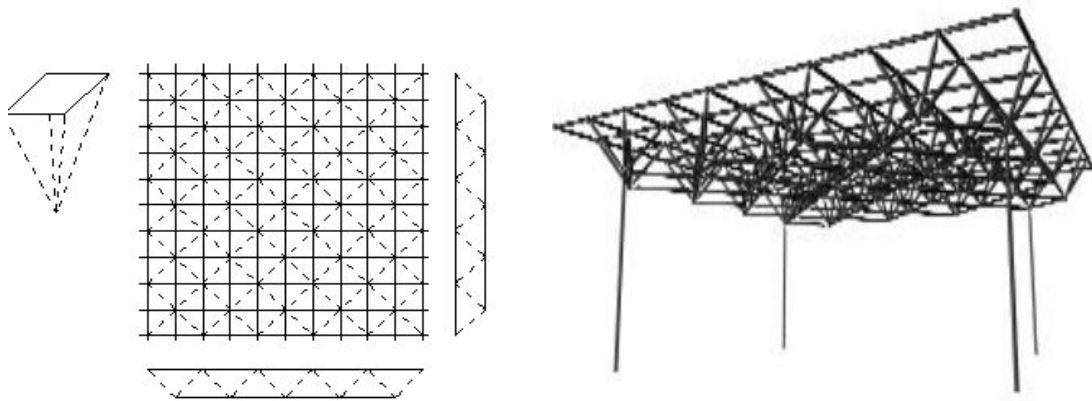
1. *Carré sur carré* : où la grille supérieure est directement au-dessus de la grille d'accords inférieure et les barres relient les deux couches dans le plan vertical. Lorsqu'elle est vue en plan, seule la grille carrée supérieure est visible (voir figure).



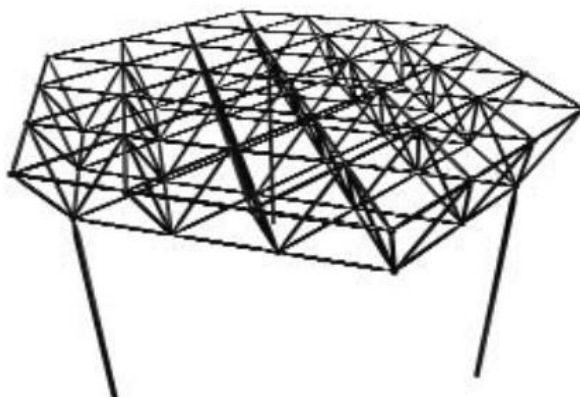
2. *Carré sur carré décalé* : où la grille d'accords supérieure est décalée, généralement d'un demi-carré dans les deux directions, par rapport à la grille d'accords inférieure. Dans cette configuration, les éléments Web (diagonal) relient les points d'intersection de la grille supérieure aux intersections adjacentes de la grille inférieure et un ensemble de cellules tétraédriques et semi-octaédriques est généré (voir figure). Il s'agit de la configuration la plus couramment utilisée.



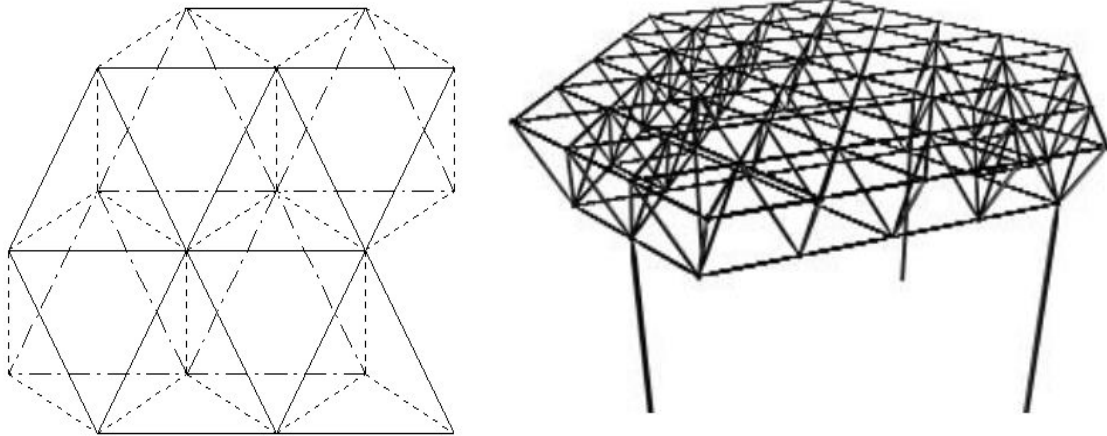
3. *Carré sur carré diagonal* : où la grille d'accords inférieure est réglée à 45° par rapport à la grille d'accords supérieure et est généralement à un plus grand espacement que la grille d'accords supérieure. Les éléments Web relient à nouveau les points d'intersection des grilles supérieure et inférieure (voir la figure).



4. *Triangle sur triangle décalé* : où les deux grilles d'accords sont triangulaires mais où les intersections dans la grille inférieure se produisent en dessous des centres de triangles alternés dans la grille supérieure. Dans ce cas également, les éléments Web relient les points d'intersection de la grille supérieure aux intersections adjacentes de la grille inférieure (voir figure).



5. *Triangle sur hexagone* : où la grille supérieure (plus dense) est triangulaire et la grille inférieure (plus ouverte) est hexagonale en raison de la suppression de certains éléments de liaison et de contreventement inférieurs du triangle sur la grille de triangle décrite sur la figure ci-dessous :



Ces systèmes conviennent pour des portées jusqu'à 100 m. Pour de plus grandes portées, il est nécessaire d'incorporer des grilles à triple couche, pour éviter les éléments longs autrement nécessaires avec la profondeur accrue.

La taille des modules constituant dépend de plusieurs facteurs, principalement : la portée, la charge, le système de revêtement, le type de nœud, les installations de transport et de montage.

Pour des portées comprises entre 30 et 40 m, des éléments de longueurs d'environ 1,5 à 3 m sont acceptables.

Parmi les avantages des grilles à double nappe on peut citer :

- Supporter les charges dans n'importe quelle direction.
- Ce sont des systèmes hyperstatiques, et le flambement de certains éléments de compression ne provoque pas l'effondrement de l'ensemble.
- Leur rigidité minimise les flèches.
- très bonne résistance au feu.
- leur composition permet une préfabrication en usine d'éléments modulaires, facilement transportables. La précision de fabrication garantit la facilité d'assemblage et de montage.
- ils permettent un large choix de positions de support grâce à leur construction modulaire.

- l'espace entre les deux couches peut être utilisé pour installer l'électricité, la tuyauterie électrique et thermique, etc.
- l'installation se fait par boulonnage et peut se faire quelles que soient les conditions atmosphériques.
- qualités esthétiques incontestables.

D'un point de vue économique, il est important d'avoir un nombre minimum de nœuds. Il faut donc faire un compromis entre ces critères et ceux déterminés par le choix des tailles de modules.

2.3.4 Les composants des structures tridimensionnelles

Les barres : ce sont des éléments axiaux avec des sections tubulaires généralement utilisées en raison de leur grand rayon de giration uniforme. Tous les éléments ne peuvent résister qu'à la traction ou à la compression.

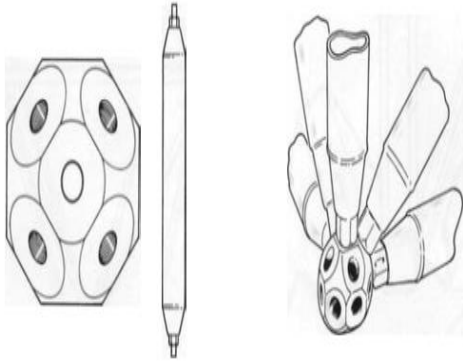
Nœuds (articulation) : les joints de liaison jouent un rôle important, à la fois fonctionnel et esthétique, qui découle de leur rationalité lors de la construction et après l'achèvement. Étant donné que les joints ont un effet décisif sur la résistance et la rigidité de la structure et représentent environ 20 à 30% du poids total, la conception des nœuds est essentielle à l'économie et à la sécurité de l'ouvrage.

Plusieurs paramètres régissent la conception des nœuds. Ils peuvent être connectés principalement par soudage, boulonnage ou par fabrication spéciale. Certaines préfèrent le soudage pour de grandes portées, même s'il est difficile de garantir la qualité des soudures sur site. L'un des facteurs déterminants dans le choix des nœuds est le nombre d'éléments à assembler. Outre les influences structurelles sur le nœud lui-même, ce problème est lié à la façon dont les éléments sont connectés au nœud et à des considérations d'espace et de facilité d'installation. La régularité de la géométrie résultant du nœud détermine toute la géométrie de la structure.

2.3.5 Différents Systèmes nodaux

Système Mero : Il s'agit d'un système composé de nœuds sphériques séparés et des tubes circulaires à extrémités coniques. Sur un nœud standard, un maximum de 18 barres peuvent être connectées au moyen d'un boulon - chargé axialement - pénétrant dans le nœud par l'extérieur. Il est possible d'utiliser ce système pour créer une grande variété de formes structurelles, y compris des dômes et des voûtes ainsi que les formes plates.

Tableau : dimensionnement pour le système Mero



Portée(m)	Module(m)	Profondeur
Jusqu'à 15	2 à 3	Jusqu'à 1.5
15 à 27.5	2.4 à 3	1.5 à 2.1
27.5 à 36	2.4 à 3.6	2.1 à 2.5
36 à 50	3.6 à 4.8	2.5 à 4.0
50 à 100	4.8 à 6.0	3.6 à 4.8

Système Nodus : un système qui utilise des tubes et des tuyaux. Les barres sont pourvues d'extrémités soudées ; le nœud est composé de 2 coques en fonte qui s'adaptent exactement aux 4 extrémités des barres horizontales. Les membres de l'accord sont connectés de manière rigide dans le nœud. Le système semble très solide et est plutôt fortement dimensionné. Sur les nœuds réguliers, un maximum de 8 barres peut être connecté : le système est très pratique pour les toits plats.

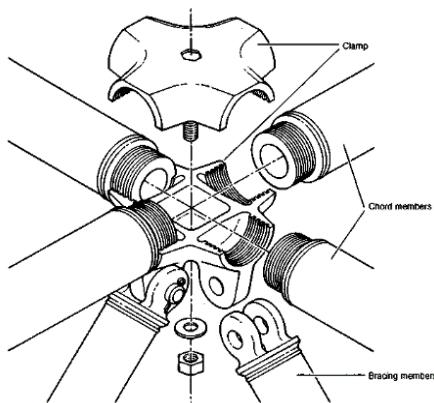
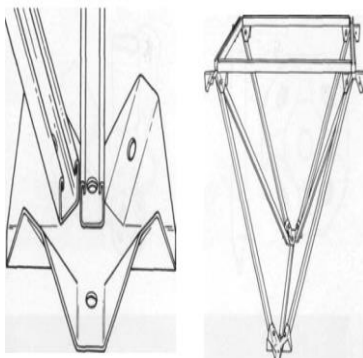


Tableau : dimensionnement pour le système Nodus

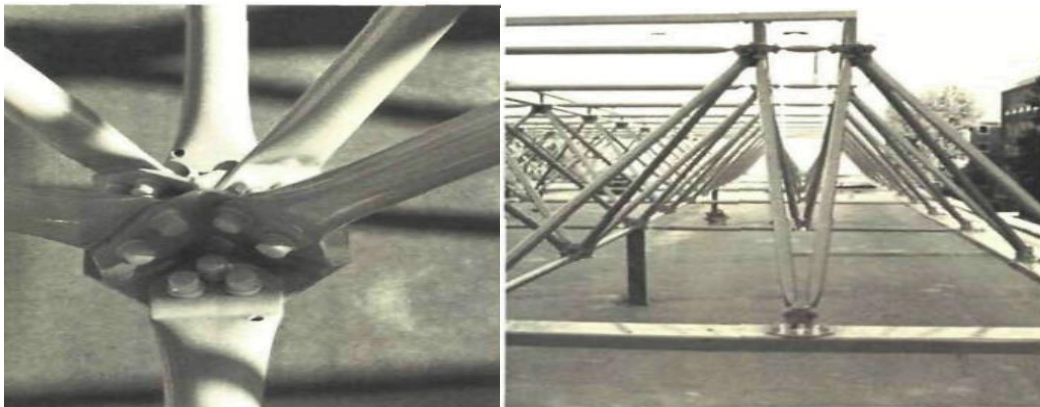
Module	2 à 3 m
La profondeur	portée/100 pour les appuis d'angle portée/15 pour les appuis de périmètre
Portée maximale	50 m pour les appuis d'angle 60m pour les appuis du périmètre

Système Unistrut : Il est basé sur des sections légères formées à froid et un ingénieux composant de liaison. Cependant, l'efficacité avec laquelle la charge est transmise à travers les joints est faible et le système n'est capable que de portées relativement courtes.



Module(m)	Profondeur(m)	Portée des travées(m)
1.22	1.0	8.5 à 15.2 pour les supports d'angle
		8.5 à 31.7 pour les supports du périmètre
1.52	1.26	7.6 à 18.2 pour les supports d'angle
		7.6 à 36.6 pour les supports du périmètre

Système Octatube : Le système se compose de nœuds et de barres séparés. Les nœuds sont constitués de plaques octogonales soudées entre elles ; les barres sont généralement des tubes circulaires, mais également des tubes carrés et des profilés en C sont utilisés en acier, en acier inoxydable ou en aluminium. La liaison se fait généralement par deux boulons par extrémité de barre. L'exigence pour la barre est la bande plate à l'extrémité avec un trou de boulon double, correspondant aux trous de boulon dans le nœud. Lorsque vous utilisez des tubes circulaires comme élément de liaison, les extrémités aplaties donnent au système un aspect assez fragile, tandis que le nœud devient presque invisible, caché entre les barres de jonction. Maximum 18 barres par nœud. Pour les toits plats, des demi-nœuds sont utilisés avec des connexions de 13 bars maximum.



2.3.6 Méthode de conception

Chaque projet est sans aucun doute un cas individuel. Néanmoins, il est possible d'établir des étapes séquentielles dans le développement de la conception. Plus important encore, il convient de noter que, pour qu'une forme soit recouverte d'une manière prédéterminée, deux méthodes distinctes peuvent être utilisées pour définir la surface générale :

- soit la géométrie globale de la surface est définie a priori : une division géométrique doit alors être faite, par ex. une division géodésique pour les dômes.
- ou le module générateur est posé comme précédemment et la multiplication de ce module fournit la géométrie finale.

Une fois la géométrie globale établie, le concepteur doit décider du nombre de couches. Cette conception dépend essentiellement de la portée libre, ainsi que de la distribution géométrique des éléments dans et entre les couches. Le choix de la fréquence du maillage est important pour des raisons de résistance et de coût, ainsi que pour des raisons esthétiques. Le choix de la géométrie du réseau de membres influence directement le comportement des systèmes. Par exemple, dans le cas

de grilles à double couche, un examen des différentes dispositions géométriques a confirmé l'importance d'adopter une disposition dans laquelle les directions des éléments dans les deux couches sont fixées à 45 °.

Il est donc possible d'examiner le comportement structurel sous des combinaisons d'actions appropriées. Le choix des conditions de support a une grande influence sur la répartition des efforts internes et la taille des flèches. L'utilisation possible de supports multipoints est un avantage important des fermes spatiales. La définition des zones des sections transversales des éléments peut conduire à un processus d'optimisation adapté au modèle de conception.

Le choix de la modulation : La plupart des systèmes de structures tridimensionnelles permettent de réaliser tous types de géométries, régulières ou non, à modulation carrée, rectangulaire, triangulaire, ou autres. S'agissant de charpentes classiques où la recherche d'efficacité est le principal critère, on préférera une modulation carrée ou rectangulaire. À l'évidence, lorsque le projet le permet, le choix de modulations simples est une source d'économies, d'homogénéité, et de standardisation des détails de coordination avec les autres corps d'état. Cependant, de très nombreuses géométries sont envisageables.

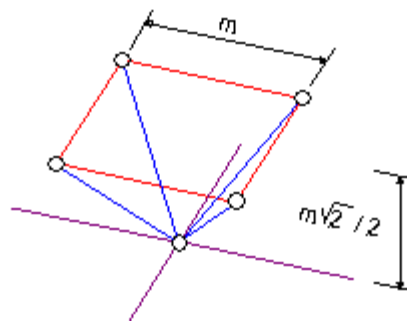
Dimensions des modules : Il n'existe aucun standard en la matière, mais il y a des règles qui abaissent les coûts, les délais, et améliorent la qualité architecturale des réalisations. Le nombre, et donc les dimensions des modules, est d'abord lié à la portée entre appui de l'ouvrage, et également des charges appliquées. En général, pour des charpentes de 20 à 50m de portée, le nombre de modules pourra varier de 8 à 12, voire 15. Le tableau ci-après propose une modulation pour quelques portées courantes :

L	N	M	H	L	N	M	H
15m	6	2.50m	1.00m	40m	10	4.00m	2.50m
20m	7	2.86m	1.25m	50m	12	4.16m	3.20m
30m	10	3.00m	2.00m	60m	12	5.00m	3.75m

Les principaux systèmes de structures tridimensionnelles utilisent des tubes d'acier. Ceux-ci sont généralement produits en longueur standard de 6 ou 12m ; on essaiera donc de moduler les structures à 3m pour les portées courantes d'une trentaine de mètres. La dimension des modules a une influence prépondérante sur le coût des structures. En effet, la partie la plus onéreuse à fabriquer étant le nœud d'assemblage, on recherchera à en limiter le nombre, et de même pour le nombre de tubes afin de limiter les temps d'assemblages. Le tableau ci-après montre la variation du nombre de composants selon la modulation, pour un ouvrage de 30m x 30m :

Module	Nbre	Noeuds	Membrures	Assemblage
2.00m	15	481	1350	450 H
2.50m	12	313	864	360 H
3.00m	10	221	600	300 H

D'autres critères doivent guider le choix de la modulation, notamment le type de couverture. En général, à la structure principale est adjoint un réseau de pannes correspondant à la modulation, et supportant la couverture. On essaiera donc de faire concorder les portées admissibles du bardage avec la modulation.



Épaisseur de nappe : La distance entre nappes hautes et basses est là aussi libre. On préférera souvent une hauteur égale à un demi-module pour des raisons architecturales. Cependant, l'épaisseur optimale est en général plus importante, notamment pour les portées moyennes, et est de l'ordre de 1/16 de la portée. Lorsque les charges sont importantes, par exemple charge de neige en altitude, l'épaisseur de nappe devra être augmentée.

Idéalement, l'épaisseur de nappe devrait être $H = module \times \sqrt{2}/2$ qui permet d'obtenir la même longueur pour tous les éléments. Pour des raisons esthétiques, mais aussi constructives, on pourra concevoir des structures à épaisseur variable, comme le montre les exemples ci-contre. La question ne se pose plus pour les structures à simple nappe, mais seules certaines formes permettent l'utilisation de systèmes réticulés.

