

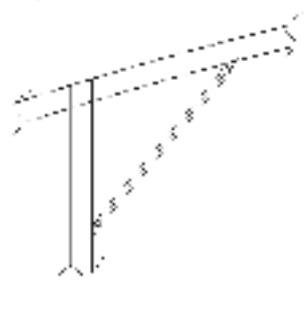
4 LES ÉLÉMENTS DE LA STRUCTURE

Le travail de conception et les choix techniques résultent de la combinaison des notions évoquées dans le chapitre précédent et de la connaissance des archétypes structurels présentés ci-après. La richesse potentielle des solutions structurelles explique leur rôle stimulant dans la conception architecturale et la ressource d'innovation et de développement qu'elles peuvent représenter. La recherche du choix structurel doit constituer un des supports de l'imagination et de la créativité architecturale.



Poteau caisson arborescent du gymnase de Saint-Jean-de-Maurienne. Richard Plattier architecte.

Croquis d'une bielle.



Les poteaux

On parle de poteaux pour les éléments verticaux. Le terme de bielle concerne des éléments en biais qui reprennent aussi des efforts horizontaux. Les extrémités des bielles sont toujours articulées. On utilise également les termes de jambe de force, de buton ou de bracon. Les termes de fût et de pile concernent quant à eux des éléments encastrés en base, libres en tête.

Les poteaux doivent reprendre des efforts de compression, de flexion due au vent et résister au flambement. Leur section doit présenter une bonne rigidité à la compression dans toutes les directions et en particulier suivant leurs axes principaux. Les poteaux constituant les montants de portique sont également sollicités en flexion.

Les critères suivants conduiront à déterminer le type de poteau retenu :

- les choix architecturaux ;
- les encombrements et les choix techniques ;
- les coûts de l'acier (les profils creux sont plus onéreux que les profilés) ;
- les coûts de mise en œuvre : complexité des attaches et des liaisons ;
- les facilités et simplicités d'assemblage des composants de second œuvre : cloisons, plafonds, façades ;
- les conditions d'entretien : surfaces à peindre ou à protéger de la corrosion ou du feu.

Les type de poteaux et de bielles possibles sont :

- les profilés en I ou en H ;
- les tubes de section circulaire, carrée, elliptique ou demi-elliptique ;
- les poteaux reconstitués par laminés assemblés ;
- les caissons ;
- les poteaux treillis.

D'autres solutions sont possibles en combinant des profils divers pour réaliser des sections variables composées par association de tubes et de profilés.

Les points porteurs

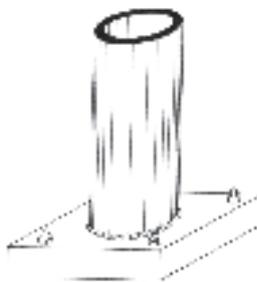
La question de l'optimisation du nombre de points porteurs se pose toujours au moment de la conception et de la prise en compte du programme. Au regard de l'aménagement des espaces, les poteaux sont toujours jugés comme des obstacles qu'il convient de limiter le plus possible. Les trames classiques sont de l'ordre de 4,5 à 6 m pour des logements. Construire avec de grandes portées (par exemple 12 à 18 m pour des bureaux ou 15 à 16 m pour des parkings) est intéressant pour dégager de grands plateaux libres. Il faut alors prendre en compte la hauteur plus importante des poutres et l'éventuel surcoût engendré par leur fabrication, leur transport et leur assemblage. L'utilisation de poutres alvéolaires permettant le passage des gaines et des fluides offre cependant une solution alternative intéressante.

À noter que le nombre de points porteurs dépend également du type de fondations à prévoir en fonction de la nature des sols rencontrés. Quand un sol est mauvais, il convient de limiter les points de fondation et par conséquent de réduire le nombre de poteaux, sauf pour le cas des fondations par radier général. Les portées des poutres seront alors plus importantes. À noter qu'une ossature en acier permet de limiter le poids du bâtiment et donc de réduire l'importance des fondations.

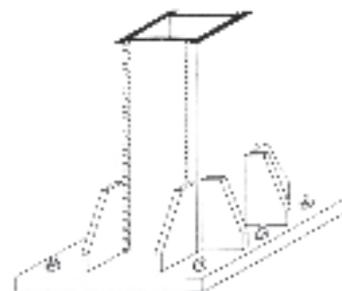
L'assise du poteau sur les massifs de fondation

La charge de compression peut être transmise au béton de fondation par une simple platine soudée à l'extrémité inférieure du poteau pour bien répartir les pressions sur le béton. Les renforcements latéraux (goussets) permettent de mieux répartir la contrainte. Les formes de la platine et du socle en béton doivent être soigneusement étudiées pour éviter des rétentions d'eau qui provoquent la corrosion des aciers : percements d'écoulement, pente... Ce soin technique participe au fini architectural et à la qualité de ses détails. Des ancrages dans le béton sont nécessaires pour maintenir le poteau en position et résister aux éventuels efforts d'arrachement.

En général, l'entreprise de gros-œuvre plante des réservations, l'entreprise de construction métallique met en place avec une précision de l'ordre du millimètre le système d'ancrage et le béton est coulé ensuite. Ce n'est qu'après contrôle que le poteau et sa platine sont positionnés.

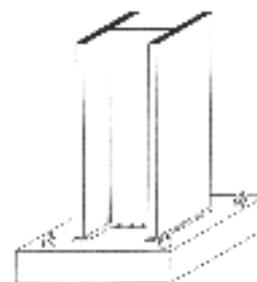


Une file de poteaux de structure.
Palais de justice de Grenoble,
France. Claude Vasconi architecte.



Assises de différents types de poteaux

Suivant l'épaisseur de la plaque d'assise en acier, des raidisseurs sont nécessaires (fig. ci-dessus) ou pas (fig. ci-dessous).





Un jeu de tirants obliques et de bielles assure le contreventement transversal rejeté à l'extérieur. Immeuble d'habitation à Constance, Allemagne. Ingo Bucher-Beholz architecte.

Les suspentes et les tirants

Comme un poteau, une suspente transmet une charge suivant son axe longitudinal. Cependant, à l'inverse du poteau qui travaille à la compression, une suspente transmet une charge en travaillant uniquement en traction simple. Les tirants, haubans et câbles reprennent des efforts de traction ayant une composante verticale et une composante horizontale. Ils peuvent présenter une section quelconque, n'étant pas sujets au flambement. On utilise de préférence les sections dont l'attache en extrémité est la plus facile :

- ronds pleins, pouvant être filetés pour l'assemblage par écrous ;
- plats ou cornières percées, assemblés par boulons ;
- câbles ;
- profils creux comportant une platine d'attache soudée en bout.

Une suspente peut être préférée à un poteau pour des raisons fonctionnelles, d'encombrement ou architecturales, par exemple pour tenir une poutre et franchir un espace sans point d'appui.

Les poutres

Les poutres sont des éléments la plupart du temps horizontaux qui doivent reprendre essentiellement des efforts de flexion. Leur section doit par conséquent présenter une inertie adaptée dans le sens de la flexion et donc une certaine hauteur. La flexion comporte une composante de traction et une composante de compression que l'on retrouve aux extrémités de chaque section. Ces efforts transmis dans les membrures hautes et basses sont d'autant plus faibles que la hauteur de la poutre est plus importante. Schématiquement, doubler la hauteur de la poutre divise par quatre les efforts auxquels elle est soumise. La section des membrures est par conséquent capitale pour calculer le poids de l'acier à utiliser. Cette caractéristique très importante pour les poutres en treillis usuelles se retrouve dans les structures spatiales.

On parle non seulement de poutre, mais aussi de panne, de chevron, de traverse, de linteau, de limon, de raidisseur, de poutre au vent, de console, de porte-à-faux, de cantilever,...

La poutrelle

Les poutrelles en acier sont diversement utilisées dans le bâtiment. Dans les cas courants de charges et pour des portées moyennes de l'ordre d'une dizaine de mètres environ, les profilés courants en I et en H constituent des poutres bien adaptées. Il est par ailleurs facile de liasonner l'ossature secondaire des planchers, des façades et des couvertures sur les ailes des profilés en I ou en H. La poutre qui travaille essentiellement en flexion verticale a pour fonction



Poutres sous-tendues.

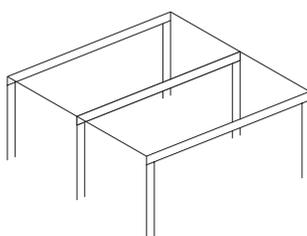


Schéma de poutraison. Les sommiers (poutres principales) portent ici sur 12 m, les solives sur 5,50 m. Une règle de prédimensionnement pratique consiste à prendre une hauteur minimale de poutre de 1/25 de la portée pour les sommiers et de 1/30 pour les solives.

Exemple : pour un sommier de 12 m, $h = 12000 \text{ mm} / 25 = 480 \text{ mm}$, soit un HEA 500.

Pour une solive de 5,50 m, $h = 5500 \text{ mm} / 30 = 180 \text{ mm}$, soit un IPE 180.

principale de constituer la structure des planchers et des couvertures et de leur faire franchir des espaces et des vides.

La poutre reconstituée soudée (PRS)

À partir de tôles, de larges plats ou de plaques, on peut obtenir des poutres symétriques ou dissymétriques, de hauteur et de largeurs d'âmes constantes ou variables en soudant les pièces, à savoir les ailes et l'âme, les unes aux autres. Ainsi on conçoit de façon optimale une poutre en fonction des efforts qu'elle est censée reprendre. Ce type de poutre est particulièrement intéressante quand la portée augmente car la hauteur de poutre nécessaire devient alors plus importante.

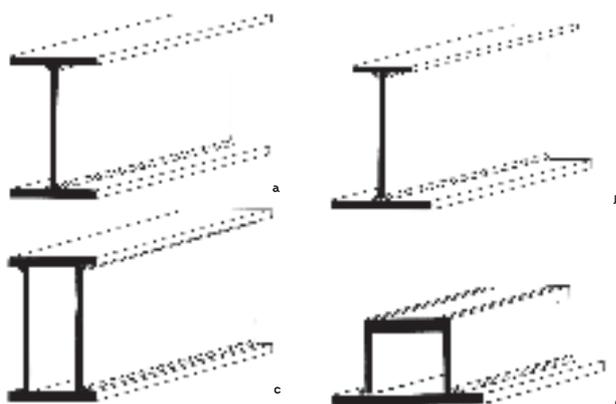
On peut aussi obtenir des poutres caisson de section carrée, rectangulaire ou trapézoïdale avec deux âmes soudées dont la rigidité est encore plus grande et peut être encore renforcée par des raidisseurs intérieurs. Ce type de poutre est souvent utilisé dans les ponts.

L'intérêt des PRS est de pouvoir affiner l'épaisseur de l'âme et des semelles et donc de gagner du poids en optimisant la section par rapport aux efforts qui y transitent, de constituer plus facilement des profilés cintrés et d'associer le cas échéant des nuances d'acier différentes dans la même poutre. Les efforts de flexion et donc les besoins en section ne sont généralement pas constants le long d'une poutre. Pour une optimisation de la matière, on peut réaliser des PRS dites à inertie variable.

Ces poutres sont couramment utilisées notamment pour des profils dont la hauteur est supérieure à 400 mm. La plupart des entreprises de construction métallique sont équipées de bancs de soudure qui permettent de les fabriquer automatiquement.

La poutrelle alvéolaire ou ajourée

Les poutrelles ajourées, appelées aussi poutrelles alvéolaires, sont obtenues à partir de laminés courants découpés en demi-poutrelles dont l'âme est elle-même découpée en cercle ou hexagones ; elles sont ensuite reconstituées par soudage. Ceci permet d'alléger le poids et surtout de faciliter le passage des gaines et des fluides dans la hauteur de la poutre. Elles sont donc particulièrement intéressantes pour les immeubles de bureaux en permettant des portées de 20 m en solution mixte acier-béton.



Poutres reconstituées par soudage

a. Poutre soudée à âme pleine : les poutres d'une hauteur supérieure à 1 m sont reconstituées par soudage, les membrures étant en larges-plats et les âmes en tôle.

b. Profil asymétrique reconstitué par soudage.

c. Poutre en caisson soudé : profil soudé à âme double pour la reprise de charges très fortes.

d. Profil soudé en « chapeau » utilisé comme poutre de plancher, la membrure inférieure en saillie servant à l'appui de la dalle.



Poutre alvéolaire.

Passage de gaines et de réseaux à travers une poutre alvéolaire.



Les poutres en treillis et les fermes



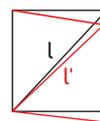
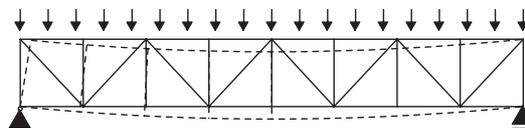
Poutres en treillis type Warren de la structure des ateliers de maintenance des tramways à Bordeaux. Jacques Ferrier architecte.



Poutres en treillis, structure de la couverture du stade de France. MZ/RC architectes.

Ci-contre, schéma d'une poutre en treillis en flexion.

La déformation des panneaux provoque un allongement (traction) ou un raccourcissement (compression) des diagonales suivant leur position.



On appelle indifféremment treillis, triangulation ou structure réticulée, un ensemble de barres assemblées les unes aux autres à leurs extrémités, de manière à former une structure portante stable, plane ou spatiale. Elle est constituée par l'assemblage de plats, de cornières, de profils I ou T et de profils creux. Légères, les poutres en treillis (ou poutres triangulées) permettent de franchir de plus grandes portées mais nécessitent des assemblages parfois complexes.

Les principaux types de poutres treillis sont décrits ci-dessous.

Les poutres à membrures parallèles

Il en existe plusieurs sortes et notamment :

- les poutres à treillis en N. C'est une des solutions les plus anciennes. En charge, les montants sont comprimés et les diagonales sont soit tendues, soit comprimées ;
- les poutres à treillis en V, dites poutres Warren. C'est une des formes les plus courantes ;
- les poutres à treillis en croix de Saint-André.

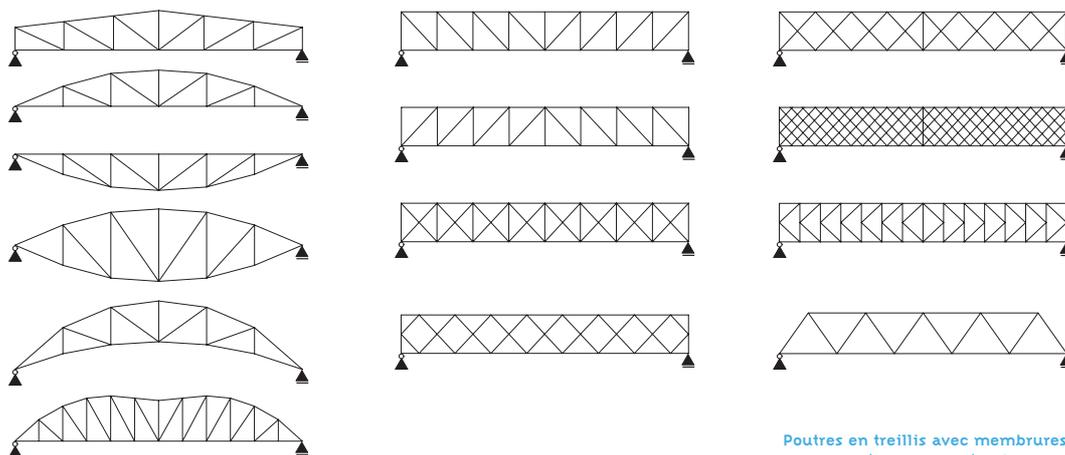
Les poutres à membrures non parallèles

Ces poutres permettent, à l'instar des PRS à inertie variable, de répondre de manière optimale aux efforts auxquels elles sont soumises. Il est même possible que les membrures ne soient pas de même profil, l'une étant en compression, l'autre étant en traction. Le profil comprimé contient en effet le maximum de matière, le câble ou tirant (tendu), le minimum. Cette différence de matière est liée à la prise en compte du phénomène de flambement dans la partie comprimée.

Il existe de nombreux types de poutres de ce genre.

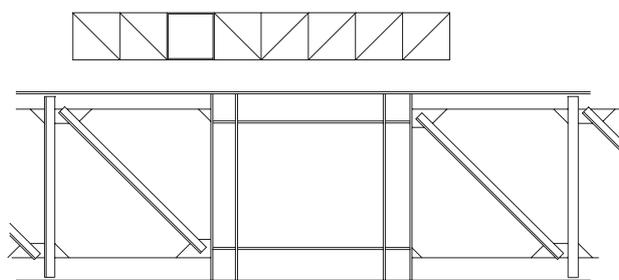
Viaduc de l'Arc à poutres sous-tendues en « arête de poisson ». Bruno Gaudin architecte.





Les poutres échelles ou poutres Vierendeel

Les assemblages des montants de ce type de poutre sont rigides, sans diagonales. L'ensemble forme un système hyperstatique très rigide. Ce système est plus lourd et moins performant en flexion mais permet de libérer l'espace central de la poutre pour laisser passer des circulations, des gaines... Il est possible de jumeler une poutre treillis classique avec une poutre Vierendeel. La suppression de la diagonale conduit à renforcer le cadre autour du panneau. Ce type de solution permet aussi de réaliser des poutres de façade dites « poutres américaines » dont la hauteur est égale à celle d'un étage de la construction.



Les fermes

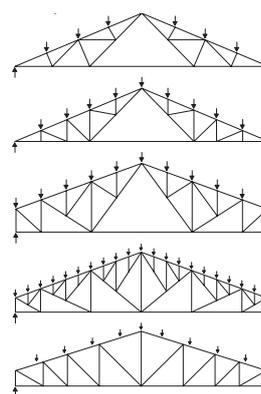
Les fermes sont des poutres en treillis dont les membrures supérieures suivent la pente de la toiture. L'entrait des fermes est souvent retroussé pour mieux dégager le gabarit ou l'espace libre sous la charpente. Parmi les modèles les plus courants au XIX^e siècle, les fermes Polonceau (inventées en 1837) ont leurs arbalétriers sous-tendus par des bielles et des câbles.

Poutres en treillis avec membrures non parallèles ou cintrées (colonne de gauche) et poutres treillis à membrures parallèles.

Une règle pratique de prédimensionnement d'une ferme en treillis consiste à prendre une hauteur de poutre de 1/12^e de la portée pour une poutre de hauteur constante et de 1/5^e de la portée pour une ferme de charpente de forme triangulaire.

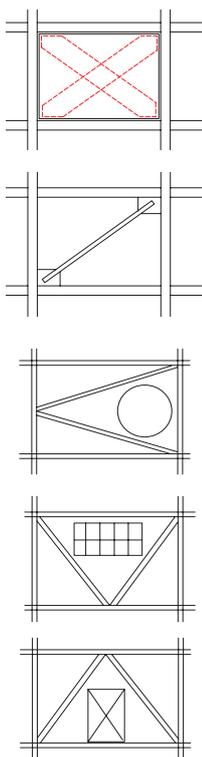
Cf. Bibliographie [10, p.200].

Ci-contre, cadre rigide de type Vierendeel inséré dans une poutre en treillis.



Fermes en treillis : Polonceau et variantes, et triangulées (en bas).

Les cadres articulés et les portiques



Types de contreventements de cadres :

- par un matériau rigide, voile de béton armé ou maçonnerie (en haut). Les angles doivent être bloqués pour assurer la transmission des efforts en compression ;
- par une barre en diagonale (au milieu). Une barre inversée peut être ajoutée pour éviter la reprise d'efforts en compression ;
- par des barres obliques libérant des zones de passages ou d'éclairage (en bas).

Les cadres articulés

Un cadre articulé n'est pas stable en lui-même. Divers procédés permettent de le rendre indéformable.

Le remplissage du panneau par un élément rigide dans son plan

Le panneau est rendu indéformable s'il est rempli de matériaux rigides : béton armé, maçonnerie. Dans ce cas de figure, le matériau rigide doit « bloquer » les angles de la charpente. On utilise de façon classique ce mode de contreventement au niveau des gaines de circulation verticales : escaliers, cages d'ascenseur. Le contreventement bénéficie alors de quatre panneaux rigides aux quatre faces du noyau en béton armé. Toutefois, la solution de rigidification par contreventement constitué de parois lourdes pénalise la charpente par un surdimensionnement (poids).

Il est important de noter que si les remplissages en maçonnerie ou en béton armé ne sont pas prévus pour participer au contreventement, ils doivent être désolidarisés de l'ossature métallique, sinon les parties pleines sont exposées à des risques de fissuration.

La triangulation intérieure du panneau par des barres

Une barre en écharpe (diagonale) dans le panneau assure sa triangulation donc son indéformabilité. Des zones de passage ou d'éclairage peuvent ainsi être ménagées.

Les contreventements métalliques offrent l'avantage d'être installés dès le montage de l'ossature, évitant en partie les contreventements provisoires en attente des remplissages.

Les portiques

Les portiques qui permettent d'assembler de manière continue les poutres ou les arbalétriers et les poteaux, sont l'un des éléments caractéristiques de la construction métallique. Les portiques peuvent être constitués de I et de H, de tubes, de PRS à section variable ou non, de caissons, d'éléments en treillis.

Tous les éléments de ces types de structure participent à la résistance aux efforts verticaux aussi bien qu'horizontaux. Ils exercent donc des efforts horizontaux sur leurs appuis. Par ailleurs, la plus grande inertie des éléments poutre et poteaux des portiques est nécessairement dans le plan du portique, de manière à assurer la plus grande résistance en flexion dans ce plan.

Ils peuvent avoir deux ou trois articulations, ou être complètement rigides. Lorsque plusieurs panneaux sont rigidifiés dans une même file ou sur plusieurs étages superposés, on obtient des « portiques multiples ».

On distingue quatre types de portiques à rez-de-chaussée suivant que les liaisons sont articulées ou rigides. Notons que les assemblages réels sont la plupart du temps semi-rigides.

Le portique à trois articulations

Ce portique est isostatique. Il présente la caractéristique d'avoir un moment nul à la clef quel que soit le cas de charge. La dimension est réduite à cet endroit et permet ainsi d'optimiser la hauteur libre. En outre, les tassements différentiels et les variations thermiques peuvent être absorbés par cette structure. En revanche, sous l'effet de charges horizontales, la déformation de ce portique est plus importante que pour les modèles suivants.

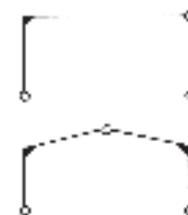
Ce type de portique se retrouve fréquemment dans les halles et les toitures à versants inclinés, moins dans les bâtiments à étages.

Le portique à pieds de poteaux articulés

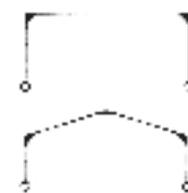
Ce portique articulé à la base des poteaux est hyperstatique. C'est la rigidification des assemblages poteaux-poutres qui assure la stabilité des panneaux (cadres). Il utilise moins de matière que le portique à trois articulations. Avec une traverse brisée ou en biais, il est utilisé dans les halles ; avec une traverse droite, on le retrouve dans les bâtiments à étages.

Le portique à pieds de poteaux encastrés

Du fait des encastremets en pied, les sections peuvent être moins importantes que dans les cas précédents pour résister aux moments de flexion.



portiques à trois articulations



portiques à pieds de poteaux articulés



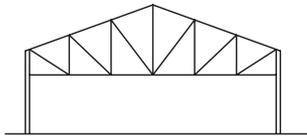
portique à pieds de poteaux encastrés

Différents types de portiques.

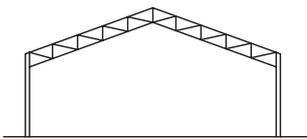
Exemple de portique à deux articulations dans un bâtiment agricole.

Noter le contreventement longitudinal dans le plan de la toiture. Une règle pratique de prédimensionnement consiste à prendre une hauteur minimale d'arbalétrier de 1/30 de la portée.



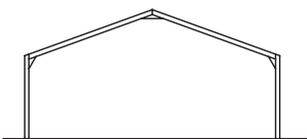
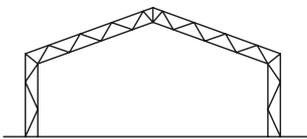


La limitation des déplacements sous l'action des forces horizontales conduit à l'augmentation des sections des poutres et des poteaux.

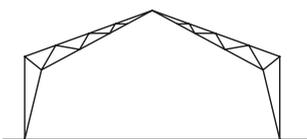
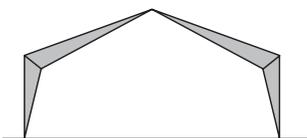


Le portique totalement encastré

Ces portiques ont un degré d'hyperstaticité supérieur. Ils sont utilisés lorsque des charges très importantes sont mises en œuvre et lorsque la portée doit être très grande. En revanche, cette structure absorbe peu les tassements différentiels et les variations thermiques. C'est une forme courante dans les bâtiments à étages. Cependant les « nœuds » (assemblages) peuvent être gênants, au niveau des planchers par exemple, à cause des goussets ou des équerres nécessaires à l'assemblage. Les bases des portiques peuvent être fixées sur des infrastructures en béton armé ou des fondations, ou sur des poteaux et des poutres de l'étage inférieur.



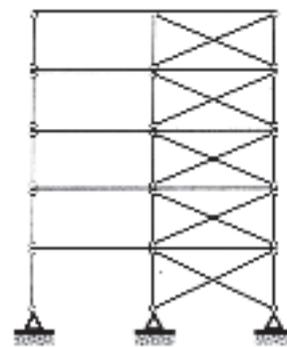
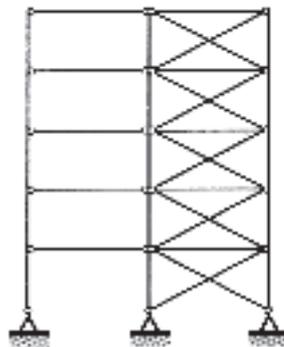
Ce sont des structures relativement coûteuses (environ 15 à 20 % de plus que des structures avec des contreventements), mais elles présentent l'avantage d'un moindre encombrement de l'espace et d'un usage plus flexible dans le temps en cas de changement d'affectation des locaux ou des immeubles.



Différentes formes de portiques composés de poteaux et de poutres de toiture.

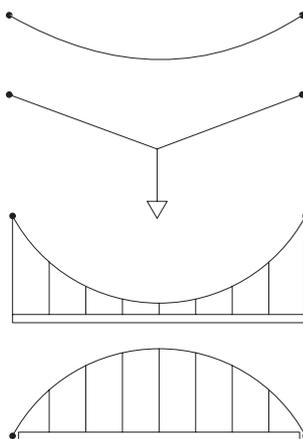
Ci-contre, principes de cadres articulés et contreventés pour des bâtiments multi-étages :

- à poteaux continus (à gauche) Leur hauteur est en pratique limitée à deux niveaux maximum pour des raisons de transport ;
 - à poutres continues (à droite). La longueur des poutres est limitée en pratique à 18 m.
- Cf. Bibliographie [12, p.105 b et c].



Les arcs et les catènes

En termes de schéma statique, l'arc est l'inverse de la catène : si le sens des efforts appliqués est contraire, on passe de la traction pure à la compression pure. On utilise l'arc en acier pour les ouvrages d'art et pour les grandes halles. Les produits utilisés sont généralement les caissons et les structures tridimensionnelles réticulées. Les catènes sont essentiellement utilisées pour les ouvrages d'art. On utilise généralement des câbles. Étant donné les conditions d'appuis (articulation ou encastrement pour les arcs, articulations pour les catènes) et les formes géométriques, ces deux types d'élément de structure travaillent principalement en compression ou en traction.



Ci-contre, schéma statique d'une catène et d'un arc

- en observant un fil tenu à ses deux extrémités, on note que le fil est soumis à une traction pure sous l'effet de son poids propre. Il prend une forme dite de chaînette ;
- en suspendant ensuite un poids beaucoup plus important que celui du fil, toujours en traction pure, on obtient une forme brisée en deux segments ;
- par extension, il existe pour un chargement donné une forme géométrique dite funiculaire qui met la catène en traction pure. Lorsque le poids est uniformément réparti à l'horizontale, le funiculaire est une parabole. Le schéma inversé donne un arc en compression pure.

À noter que les efforts aux appuis ont des composantes verticale et horizontale, et que cette dernière est d'autant plus importante que le rapport flèche/corde est faible. Des fondations importantes sont donc très souvent nécessaires pour reprendre ces efforts verticaux et horizontaux. Dans le cas particulier de l'arc, plus la courbure est faible (ou le rayon grand), plus l'arc est comprimé et plus il y a risque de flambement. Une solution pour éviter des fondations trop importantes consiste à équilibrer ces efforts horizontaux par un tirant.

Il existe trois types d'arcs principaux.

L'arc à trois articulations

Cette structure est isostatique, il n'y a pas de moment à la clé. Les tassements différentiels et les dilatations sont bien repris par les articulations. Les moments sont en revanche assez conséquents dans une section courante.

L'arc à deux articulations

Les appuis sont articulés, la structure est hyperstatique. Les moments sont plus faibles dans ce type d'arc et la section est donc plus réduite. En revanche, les tassements différentiels peuvent générer des contraintes supplémentaires.

L'arc encastré

Les appuis sont encastrés, la structure est hyperstatique. Des moments sont transmis aux appuis ce qui génère des fondations plus importantes.

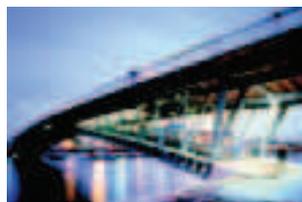


Arc à trois articulations. Charpente de la Halle Tony-Garnier à Lyon. Tony Garnier et Bertrand de Fontviolant architectes ; Atelier de la Rize architectes pour la rénovation.

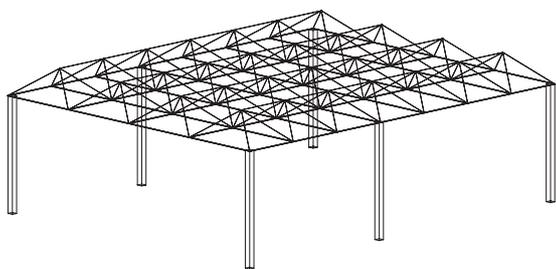


Arc à deux articulations. Viaduc de Garabit. Gustave Eiffel constructeur.

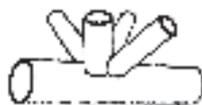
Arc encastré. Passerelle Solférino. Marc Mimram architecte.



Les structures spatiales



Exemple de nappe tridimensionnelle autostable.

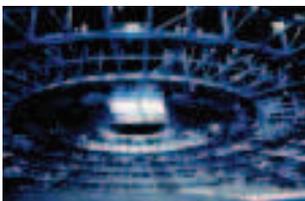


Nœud soudé dans une ossature tubulaire.



Nœud d'articulation en acier moulé. Structure de l'une des sphères d'Eden Project à Bodelva-Cornouailles en Angleterre. Nicholas Grimshaw and Partners architectes.

Charpente en treillis tridimensionnel de la couverture du vélodrome de Berlin. Dominique Perrault architecte.



Les composants usuels de la construction en charpente métallique (poteaux, poutres, fermes et portiques) forment généralement un plan dans lequel se trouvent situées toutes les forces, charges et efforts qui sollicitent la structure. C'est l'assemblage de plusieurs composants plans qui permet d'obtenir une construction à trois dimensions et une stabilité dans l'espace. Lors du montage de portiques, il faut par exemple prévoir des étalements provisoires car la rigidité hors plan des éléments est trop faible.

Une poutre a pour rôle de transporter un certain nombre de charges à deux appuis ou plus. Une structure spatiale est par extension une poutre en treillis conçue dans l'espace à trois dimensions : il s'agit de « structures réticulées » parce que les dispositions de ses membrures sont organisées en réseaux de nervures. Ces nervures constituées de barres droites sont liaisonnées par des nœuds.

L'articulation est le mode de liaison dans les nœuds, ce qui permet de soumettre les barres uniquement à des efforts de traction et de compression, quand les charges sont appliquées au droit de ceux-ci. 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.

Ces structures présentent les avantages suivants :

- montage : possibilité de préassemblage au sol et de levage d'ensembles ;
- économie de matière ;
- légèreté ;
- transparence ;
- esthétique ;
- flexibilité.

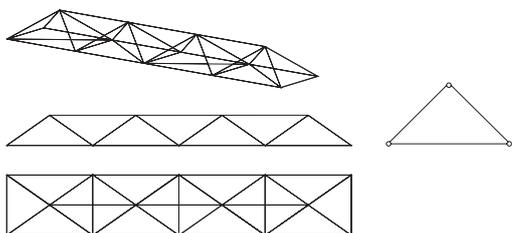
Il peut y avoir en revanche des difficultés éventuelles de transport ainsi qu'un coût élevé des assemblages.

On retiendra les trois typologies de structures spatiales suivantes :

- les poutres triangulaires ;
- les doubles nappes ;
- les voûtes et les coques.

Les poutres triangulaires

La poutre triangulaire comporte trois membrures parallèles et trois plans de treillis. Cette poutre ne nécessite aucun élément complémentaire pour être stable. C'est une structure spatiale.



Principe d'assemblage d'une poutre triangulaire en tubes.



Poutre triangulaire.

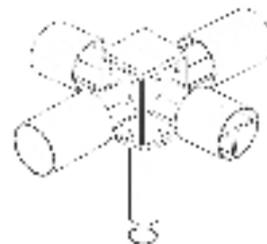
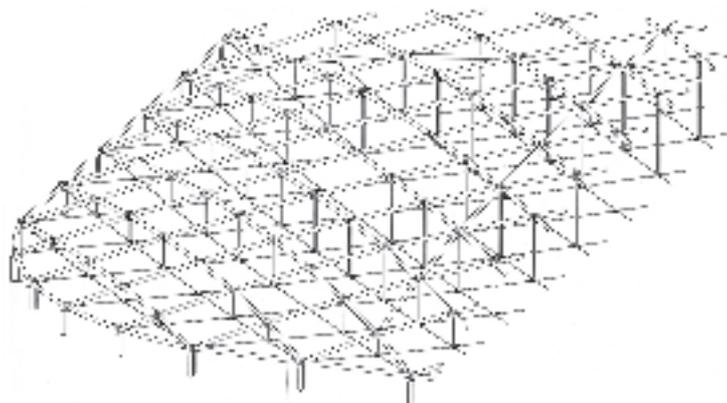
Les doubles nappes

On distingue les nappes bidimensionnelles des nappes tridimensionnelles.

Les doubles nappes à poutres croisées ou bidimensionnelles

La rigidité est assurée par deux familles perpendiculaires de poutres. C'est l'image du caillebotis. Les grilles supérieures et inférieures sont identiques et superposées suivant les trames orthogonales carrées, rectangulaires ou triangulaires.

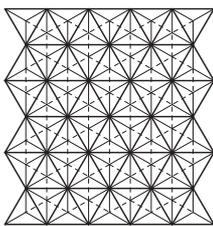
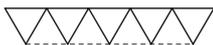
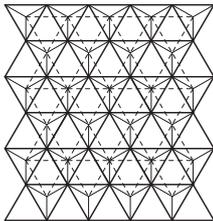
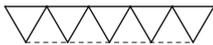
Axonométrie de la double nappe de la toiture de la patinoire de Grenoble et détail d'un nœud d'assemblage montrant le poinçon comprimé entre la nappe supérieure en tubes ronds et les tirants en partie basse.
I. Hérault et Y. Amod architectes.





Nœud d'assemblage de la structure de la coupole du musée maritime d'Osaka au Japon. Paul Andreu avec François Tamisier et Masakazu Bokura architectes.

Doubles nappes à mailles triangulaires.



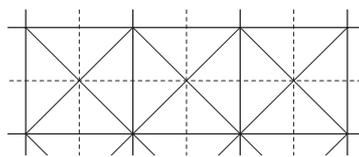
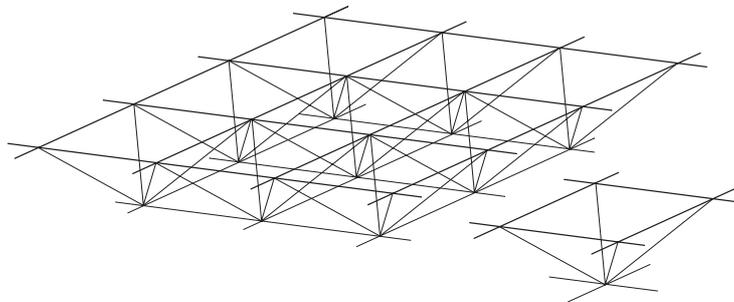
Ci-contre : double nappe diagonale.

Les doubles nappes tridimensionnelles

Une double nappe tridimensionnelle comporte aussi deux plans de membrures dont les croisements sont reliés par des treillis, mais les nœuds supérieurs ne sont plus à la verticale des nœuds inférieurs comme dans la double nappe bidimensionnelle. Les liaisons par éléments inclinés (non verticaux) augmentent la rigidité de l'ensemble.

Il existe de nombreuses grilles de ce type. La plus simple consiste en la superposition de deux grilles orthogonales identiques. Une fois chargée, la nappe supérieure est entièrement comprimée, alors que la nappe inférieure travaille en traction. En raison de leur grande rigidité, ces grilles ont une flèche faible. Quand elles sont simples, elles peuvent être réalisées avec des cornières ou avec des tubes. Les géométries plus complexes nécessitent l'utilisation exclusive de tubes. Des nappes encore plus résistantes peuvent être obtenues en créant deux nappes triangulaires liaisonnées entre elles par trois réseaux de plans verticaux.

L'épaisseur des doubles nappes des structures spatiales réticulées pouvant être importante, il est naturel de penser à occuper les volumes libres entre les barres en les rendant utilisables. Ainsi, les doubles nappes de hauteur d'étage permettent de franchir économiquement de grandes portées tout en utilisant les espaces entre les structures. Des mégastructures réticulées peuvent être conçues sur plusieurs étages.



Les voûtes et dômes

Le principe de l'arc peut être utilisé pour des nappes cintrées dans une direction formant une voûte.

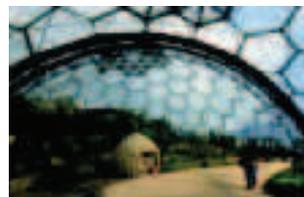
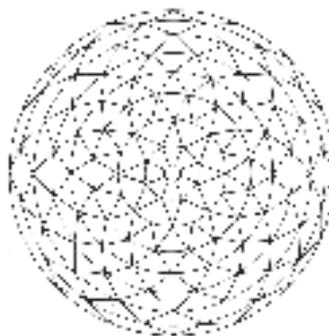
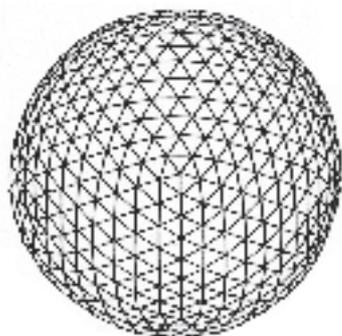
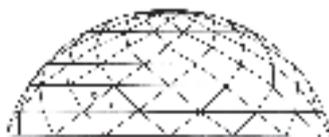
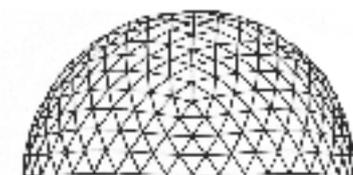
En faisant pivoter un arc autour de l'axe vertical passant par sa clé, on obtient la figure du dôme géodésique, dont Buckminster Fuller a été l'inventeur et le promoteur. Le plus connu de ses dômes est celui du pavillon des États-Unis à l'Exposition Universelle de Montréal (diamètre : 76 m). Ces structures peuvent couvrir des surfaces importantes avec un poids très réduit.

Lorsque les courbures sont faibles, ou pour une grande portée, on double la nappe d'une deuxième surface dont les nœuds sont reliés à ceux de la première par des diagonales spatiales.



Simple nappes cylindriques.

Deux exemples de simple nappe sphérique, coupes et plans.



Intérieur de l'une des portions de sphère d'Eden Project à Bodelva-Cornouailles en Angleterre. Nicholas Grimshaw and Partners architectes.

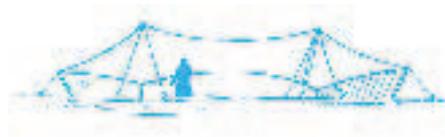
Coupoles du musée maritime d'Osaka au Japon. Paul Andreu avec François Tamisier et Masakazu Bokura architectes.



Les structures tendues et haubanées

Ce type de structure est très ancien. Les nomades du Maghreb ou du Moyen-Orient ont depuis fort longtemps l'usage de grandes tentes en peau. Il y a plus de vingt siècles, les Romains tendaient au-dessus des stades et des cirques d'immenses vélums en toile de lin, renforcés par des filins de chanvre et ancrés dans les maçonneries.

Ci-contre, principe d'une tente nomade, permettant la libre circulation de l'air.



Couverture suspendue du stade olympique de Munich en Allemagne. Frei Otto ingénieur.



Couverture textile suspendue à des mâts.

Pont suspendu d'Akashi au Japon. Portée : 1991 m, record du monde.



Différentes raisons amènent les concepteurs d'aujourd'hui à utiliser des structures tendues :

- le développement des technologies et de matériaux légers de grande résistance : textiles divers, aluminium, plastiques armés, aciers spéciaux, titane... Ceci permet aux concepteurs de réaliser des structures et des enveloppes de plus en plus légères pour franchir des espaces toujours plus vastes. Elles apportent des satisfactions esthétiques et répondent à des besoins nouveaux : enveloppes modulables, escamotables, laissant passer la lumière et libérant les espaces courants de toute contrainte de structure ;
- les structures haubanées constituent une excellente réponse aux reports de charges dans les meilleures conditions à des distances toujours plus importantes. C'est en véhiculant une force par tension simple que le rapport matière-prix est en effet minimal. La traction ou tension simple utilise totalement les capacités résistantes de l'acier et évite les phénomènes annexes de flambement ou de cisaillement. Cette technique permet en outre d'utiliser des matériaux incapables de résister à la compression ou à la flexion, tels que les tissus naturels ou synthétiques, qui travaillent au maximum de leur capacité à la traction.

Les différentes familles de structure tendue

Les structures suspendues

Une structure suspendue est une structure qui reprend le principe de fonctionnement d'une catène. L'architecture issue de la géométrie plane ou à simple courbure (arc et voûte) est remplacée par de nouvelles formes spatiales. Le sens de la courbure des câbles indique celui de la résultante des efforts qui sont repris.

Les charges à considérer sont constituées du poids propre, de la neige, de surcharges constantes ou mobiles, de certaines sollicitations du vent.

Dans le cas où le poids propre de la couverture est supérieur aux sollicitations verticales du vent, les charges peuvent être absorbées par des câbles unidirectionnels ou pluridirectionnels, mais dans le même sens de courbure. Ce sera le cas d'une structure lestée en cylindre, en calotte sphérique ou parabolique suspendue. Le poids de lestage doit être supérieur aux effets de suction ou de soulèvement dû au vent.

Dans le cas où le poids propre est inférieur aux sollicitations extérieures dirigées vers le haut, c'est-à-dire que le vent devient la charge dimensionnante, la structure tendue devra être réalisée par deux familles de câbles de courbure opposée, formant des surfaces à double courbure. Dans l'hypothèse d'un maillage à câbles, ceux-ci formeront obligatoirement une surface à courbure inverse : par exemple un paraboloides hyperbolique.

Dans ce type de structure, le poids propre (quelques kg/m^2) est inférieur aux sollicitations extérieures dirigées vers le haut dues au vent.

Le poids propre des structures peut en effet varier de quelques kilogrammes à quelques tonnes :

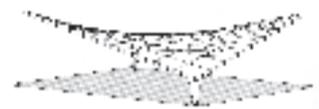
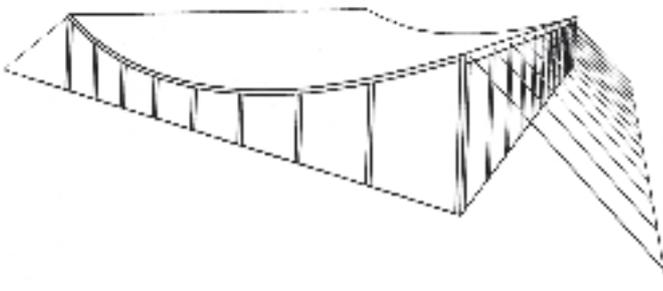
- voûte en maçonnerie : plusieurs t/m^2 ;
- dalle béton : 300 à 500 kg/m^2 ;
- structure métallique : 20 à 80 kg/m^2 ;
- structure tendue : quelques kg/m^2 .

Les structures suspendues lestées

Le lest peut être en béton armé coulé sur support métallique, en bois, en résine... Il est porté par les câbles. Ceux-ci sont toujours désolidarisés du support lesté afin de permettre leur glissement et l'équilibrage des tractions.

La surface de couverture peut par exemple être un cylindre parabolique. Les câbles porteurs sont alors ancrés en tête de poteaux métalliques. Les efforts de traction sont ramenés au sol par des haubans.

La surface de la couverture peut comporter deux courbures de même signe et l'on obtient alors une coque.



Surface à double courbure en paraboloides hyperbolique.
Cf. Bibliographie [12, p.94].



Exemple de structure à double courbure, paraboloides hyperbolique. Arène de Raleigh Livestock réalisée en 1953 par Matthew Nowici avec l'ingénieur Fred N. Severud.



Forces extérieures s'opposant aux dépressions du vent et remplaçant le lestage.

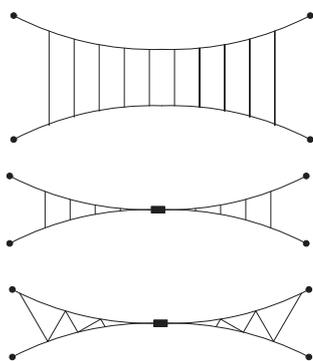


Lestage et vent.

Ci-contre, couverture lestée. Dessin du gymnase de Trinity-School à Londres.



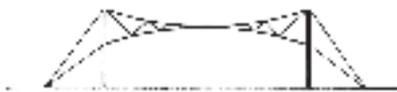
Ponts suspendus : à suspentes obliques, à suspension totale et à suspension centrale.



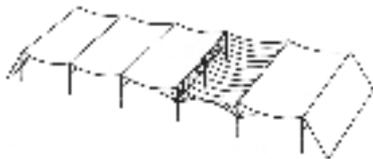
Trois schémas de poutres-câbles avec des câbles de liaison verticaux et diagonaux.

Cf. Bibliographie [10, p.186].

Différentes figures de structures légères avec des poutres à câbles « porteur » et « tenseur ».



Poutre-câble à une travée



Poutres-câbles à travées continues



Poutres-câbles en fuseau.

Les structures suspendues évoquent aussi les ponts de grande portée. Les ponts suspendus sont classés par rapport aux formes caractéristiques de la suspension (totale ou centrale). L'ensemble des charges verticales est absorbé par les câbles porteurs liés au tablier qui transmettent les charges aux câbles principaux ancrés dans les massifs de fondation. Pour des raisons de stabilité aérodynamique les formes des suspentes évoluent vers des dispositions en V ou en X qui permettent d'amortir au mieux les vibrations de la structure.

Les structures légères en câbles non lestées

Elles peuvent être réalisées avec des poutres câbles. Dans ces structures, tous les éléments sont tendus. Aucune pièce n'est comprimée ni fléchiée. Toutes les sollicitations extérieures sont reprises par des câbles. Suivant les conventions :

- le « câble » appelé « porteur » résiste aux charges de poids propre, neige, surcharges fixes ou mobiles ;
- le câble « tenseur » résiste aux soulèvements dus à l'action du vent.

Les deux câbles travaillent simultanément contre les déformations. Ils sont solidarisés au milieu de la portée et liés par des haubans diagonaux. Les poutres câbles peuvent être à une seule trame de 30 m à 100 m de portée. Les poteaux de structure et les ancrages au sol se situent aux extrémités de l'ouvrage. Les poutres-câbles peuvent être réalisées en série de plusieurs travées continues. Chaque travée s'appuie alors sur une poutre métallique perpendiculaire aux poutres-câbles.

Pour certaines réalisations, on utilisera plutôt des poutres à câbles rayonnants. On reprend dans ce cas de figure le principe de fonctionnement des roues de vélo, avec des câbles tendus qui transmettent les efforts à un élément de rive en compression qui permet d'éviter la mise en place de haubans d'ancrage.

Il existe aussi les maillages ou filets de câbles. Dans ce cas de figure, les câbles sont placés suivant une seule nappe ou surface. Les câbles porteurs et les câbles tenseurs forment deux familles sensiblement orthogonales. Leurs courbures sont inverses. Cette technique a été particulièrement développée par les ingénieurs Frei Otto en Allemagne et René Sarger en France.

Toute surface à double courbure inverse peut être utilisée pour réa-

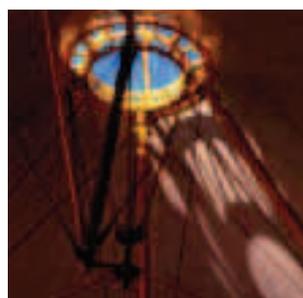
liser un maillage de câbles. Le parabolioïde hyperbolique (ou PH) est très utilisé en câbles tendus puisqu'il répond à la nécessité d'équilibrer deux efforts opposés : la portance et le soulèvement.

Les rives peuvent être souples (rives constituées de câbles) ou rigides (rives constituées de poutrelles en acier ou en bois). Elles permettent l'ancrage des câbles, l'arrêt du revêtement d'isolation et d'étanchéité, et canalisent les eaux de pluie vers les points bas. Elles permettent aussi l'appui des façades.

Les structures haubanées

Les structures haubanées concernent essentiellement les ponts. Le haubanage est l'élément fondamental assurant le fonctionnement statique de la structure. Il existe trois façons de fixer les haubans en tête de pylône : en éventail, en harpe ou en semi-éventail.

Chaque câble reprend une partie du poids du tablier (ou de la structure horizontale) et, du fait de leur inclinaison par rapport à la verticale, ils provoquent une compression dans le tablier. À noter que les efforts de compression doivent s'équilibrer, d'où la symétrie du haubanage par rapport au pylône. Ceci explique également le mode de montage usuel de ce type d'ouvrage à partir du pylône.



Couverture textile haubanée.



Pont à haubans à Seyssel.



Haubanage longitudinal : en éventail, en harpe et en semi-éventail.

Les matériaux utilisés dans les structures tendues

Les matériaux de structure sont les tubes, les profilés, les câbles toronnés ou à fils parallèles, ou les barres pleines. Actuellement, le câble toronné non galvanisé ou gainé en plastique est le matériau le plus performant et le plus économique.

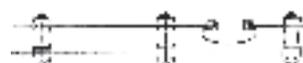
Le platelage de couverture peut jouer différents rôles :

- simple parapluie : il devra résister mécaniquement aux charges climatiques;
- couverture complète : il devra résister mécaniquement aux charges climatiques, assurer une parfaite étanchéité, être isolant thermiquement et phoniquement.

Il peut comporter différents composants. Les matériaux porteurs seront autoportants de câble à câble, ils devront résister au feu, à la corrosion et au vieillissement. Les tôles d'acier nervurées galvanisées ou laquées peuvent répondre à ces exigences. Sont aussi utilisées les tôles d'aluminium et les plaques translucides de plexiglas, de polycarbonate, de métacrylate, de polyester armé, de verre. Les matériaux d'étanchéité sont les multicouches soudées, les étanchéités polymérisées armées de tissus de verre, les membranes.



Détail de la couverture du stade de Saint-Duen.



Détail de la couverture du stade de Munich en Allemagne, montrant les joints souples entre les éléments.

Les ossatures légères



Montage d'une structure légère sur un socle en béton. Maison dans les Landes, Joxe Aranguren architecte.



Ossature légère avec un porte-à-faux nécessitant une reprise sur profils standards. Cité Manifeste à Mulhouse D. Lewis, Scape architecture+Block.



Poteau et poutre en profil mince, logements cité Manifeste à Mulhouse. Ateliers Jean Nouvel arch.

Maison prototype à Liège, Belgique. Véronique Salmon architecte.



Inspirée par la construction à ossature bois, la construction en ossature légère en acier est faite à base de profils minces galvanisés. Elle est couramment utilisée en Amérique du nord et au Japon. Les profils laminés à froid ont une section en forme de C de U, de Z ou de sigma. L'épaisseur de la tôle varie de 0,6 à 2,5 mm, ce qui leur confère une grande légèreté, de l'ordre de 0,075 kN/m au maximum. Leur assemblage peut se faire par divers procédés : par vis autotaraudeuses posées à l'aide de visseuses portatives, par clous fixés par pistolets pneumatiques, par boulons ou par clinchage.

On compose ainsi des ossatures formées de montants verticaux, en général espacés tous les 60 cm, et de traverses horizontales sur lesquelles on vient fixer des éléments plans : bardages, plateaux supports de bardage ou parements extérieurs, plaques de plâtre ou de fibres pour les finitions intérieures.

Les façades peuvent être habillées avec un parement de métal, de bois, de brique, d'enduit..., de même que les couvertures peuvent être construites avec n'importe quel matériau : tuiles en terre cuite ou métalliques, panneaux... On peut aussi associer cette ossature légère à des profilés traditionnels et ouvrir ainsi les possibilités de conception : porte-à-faux, étages multiples, grande baie vitrée, etc.

Des trous dans les montants verticaux permettent de faire passer câbles, tuyaux et réseaux à l'intérieur des murs ou des cloisons. Le contreventement peut être réalisé avec des écharpes diagonales ou avec des panneaux plans.

Différents systèmes de montage existent. Les profils minces peuvent être livrés sur le chantier par fagots coupés à la longueur voulue, puis assemblés sur place par vissage ou boulonnage. Quelques jours suffisent à une petite équipe pour monter l'ossature d'une maison sur une chape de fondation. On peut aussi préassembler en atelier des éléments voire des panneaux entiers de grande dimension pour simplifier le montage sur place et améliorer la qualité de finition.

On peut ainsi réaliser des constructions jusqu'à deux étages, très légères et qui résistent bien aux sollicitations sismiques. Le procédé est bien adapté pour la construction de maisons individuelles ou de petits équipements (hôtels, bureaux...). Les performances thermiques et acoustiques de ce type de construction sont excellentes, grâce à la possibilité d'optimiser la nature et l'épaisseur de l'isolant placé à l'intérieur des murs et sur leur face externe, de jouer sur l'épaisseur et le nombre de plaques de plâtre et moyennant certaines précautions dans le montage (désolidarisation des planchers, joints résilients...).

Les assemblages

Les types de liaison

Les assemblages sont classés en deux grandes catégories :

- assemblages « mécaniques » : boulons, vis, rivets... ;
- assemblages « adhérents ou cohésifs » : soudure, collage...

Les assemblages concernent des éléments structurels – poteaux, poutres, diagonales de contreventement, tirants – ou des matériaux de partition ou d'enveloppe. Ils représentent une fraction significative du coût d'une ossature métallique.

En plus de leur fonction de liaison, qui consiste à assurer la continuité des efforts transmis, ils jouent un rôle esthétique très important quand ils sont visibles. Ils sont particulièrement mis en valeur lorsqu'ils montrent le fonctionnement structurel du bâtiment.

Assemblages mécaniques

Les boulons

Les boulons peuvent être utilisés en atelier ou sur le chantier. Ils sont assez couramment mis en œuvre. Un boulon comporte une tête hexagonale, un corps cylindrique fileté qui constitue la vis et un écrou également hexagonal. Les rondelles, freins d'écrou, contre-écrou font partie des accessoires des assemblages. Les jeux dans les trous sont de 1 à 2 mm. Ils travaillent soit en traction, soit au cisaillement. Le serrage d'un boulon ordinaire se fait soit manuellement, soit avec une clé, soit pneumatiquement.

Les boulons à haute résistance (HR) et à serrage contrôlé sont plus efficaces. Le serrage d'un boulon HR crée entre deux pièces une pression qui s'oppose au glissement par frottement. Ce type de boulon est principalement utilisé pour assurer la liaison des composants dans des assemblages soumis à des moments de flexion et des efforts tranchants. Le serrage contrôlé de ce type de boulon se fait par une clé dynamométrique (munie d'un appareil de mesure de l'effort). L'assemblage par boulons HR est plus facile à mettre en œuvre sur un chantier que la soudure. Les boulons font l'objet d'une certification en matière de caractéristiques géométriques et mécaniques.

Les rivets

Le rivetage a été longtemps le seul procédé d'assemblage utilisable en construction métallique (par exemple pour la tour Eiffel). Développé dès la fin du XVIII^e siècle pour la confection des chaudières, très largement développé à

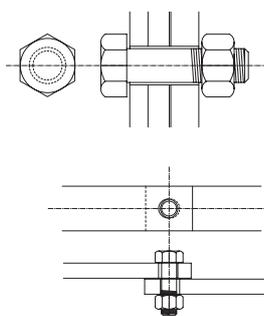


Schéma d'assemblage mécanique par boulon avec écrou.



Structure en profils minces boulonnés. Viaduc espace info à Millau. M. Abergel et J. Carchon architectes.

Exemples d'assemblages : rivet à tête sphérique, rivet à tête fraisée, boulon, XIX^e siècle.



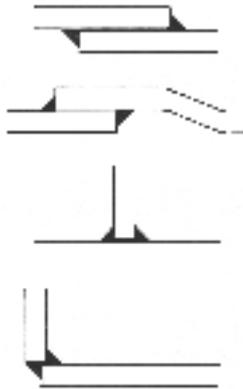


Pont en fer riveté à Bayonne, 1860.

partir de 1850, il est complètement abandonné aujourd'hui pour les assemblages sur les chantiers sauf dans les cas de rénovation de bâtiments anciens ou de ponts.

Un rivet se présente comme un gros clou à une tête. Il doit être préalablement chauffé au rouge, puis posé à chaud. Une fois l'autre tête formée à la masse, au marteau pneumatique ou à la presse hydraulique, le rivet se contracte en se refroidissant ce qui assure ainsi une force de serrage et un assemblage par frottement des deux pièces entre elles. Procédé efficace et très sûr, il exige cependant beaucoup de main d'œuvre.

Assemblages adhérents ou cohésifs



Différents types de soudures.

Le soudage

Le soudage consiste à fondre l'acier localement avec ou sans apport de métal (toujours de l'acier) de manière à reconstituer une continuité de la matière aussi parfaite que possible. Le procédé le plus courant en construction métallique est la soudure à l'arc qui utilise la chaleur produite par un arc électrique pour porter l'acier à la température de fusion.

Le soudage est un procédé très efficace mais qui peut exiger un contrôle *a posteriori* des pièces assemblées (examen visuel, rayons X...). Une partie des soudures est le plus souvent réalisée en atelier, parfois sur des bancs automatisés (par exemple pour les PRS). La plupart des entreprises de construction métallique est aujourd'hui bien équipée en bancs de soudage.

Les positions de soudage peuvent s'effectuer pour des pièces :

- à plat bout à bout ;
- à plat superposé ;
- à plat d'angle.

Soudure de deux demi-poutrelles pour fabriquer une poutre alvéolaire.



Le collage

Encore expérimental, le collage de pièces métalliques ne s'emploie en pratique que pour des pièces d'enveloppe où les contraintes mécaniques à prendre en compte sont faibles (par exemple raccord d'angle pour un bardage). Néanmoins les progrès très importants réalisés ces dernières années dans les colles laissent prévoir un grand développement de ce type d'application.

Les types de liaison

On distingue plusieurs types de liaison, suivant les éléments reliés :

- appui au sol d'un poteau ;
- liaison poteau-poteau ;
- liaison poteau-poutre ;
- liaison poutre-poutre ;
- liaison dans les poutres treillis ;
- liaison poutre-voile en béton armé ;
- nœud dans les structures spatiales.

Appui au sol d'un poteau

Pied de poteau articulé

La mise en œuvre la plus courante consiste à souder une platine à l'extrémité du poteau. Elle est traversée par deux tiges d'ancrage et repose sur l'élément de fondation en béton. Même si la liaison semble rigide, elle fonctionne en fait comme une articulation (cf. p. 23).

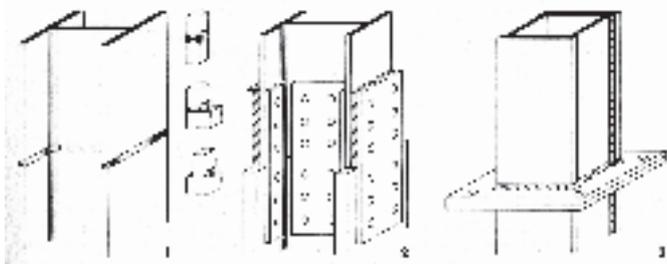
Il est quelquefois nécessaire de souder sous la platine un tronçon de profilé appelé « bêche » pour transmettre l'effort horizontal au massif de fondation.

Pied de poteau encastré

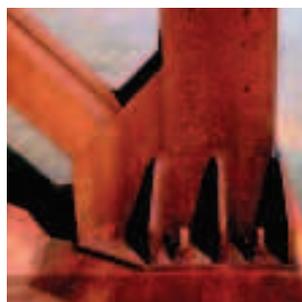
La platine soudée à l'extrémité du poteau est traversée par quatre tiges ancrées dans le béton. Afin que les contraintes soient admissibles et les déformations faibles pour un encastrement, il est nécessaire de choisir des platines épaisses ou des platines minces mais raidies (cf. p. 24).

Liaison poteau-poteau

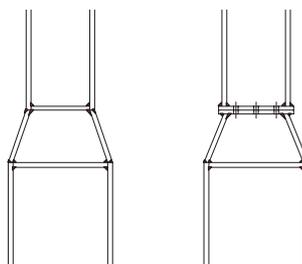
Les joints de montage permettent de réaliser le raccordement de différentes parties d'un même poteau (par soudure, par éclisses ou par platines). Il peut y avoir continuité et modification des formes en même temps.



Pied de poteau articulé.



Pied de poteau encastré.



Joints de continuité de poteaux de section variable, soudé (à gauche), assemblé (à droite).

Ci-contre, trois types de liaisons poteau-poteau

- 1- Soudage bout à bout des tronçons
- 2- Liaison par éclisses boulonnées
- 3- Liaison par platines d'extrémités soudées.

Liaison poteau-poutre

Assemblages par appui simple

Ce type de liaison est par exemple mis en œuvre à un joint de dilatation. La poutre prend appui sur le poteau, mais elle conserve un mouvement libre horizontal (cf. p. 23).

Ci-contre : assemblages articulés par cornières boulonnées (élévation et coupe).



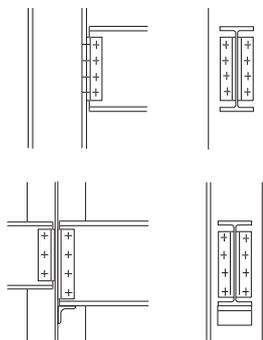
Assemblages rigides poteau-poutre

- par assemblage soudé (en haut) ;
- par cornières boulonnées et éclisses soudées (au milieu) ;
- par plaques d'about soudées aux poutres et boulonnées au poteau (en bas).

Cf. Bibliographie [12, p.142].

Ci-contre : liaisons rigides poteau-poutre

- encastresments boulonnés sur le chantier, directement sur le poteau et avec liaison décalée sur des amorces de poutres (en haut) ;
- nœud rigide en tête de portique, soudé en usine et boulonné sur le chantier (en bas).



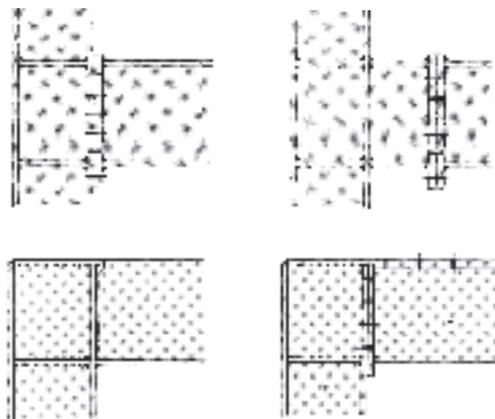
Assemblage articulé

L'attache d'une poutre sur un poteau est considérée comme articulée quand la flexibilité des cornières de liaison autorise de faibles rotations. La poutre est assemblée au poteau au niveau de son âme. De cette manière, les semelles supérieures et inférieures de la poutre sont libérées et ne transmettent pas d'effort couplé de traction et de compression, et par conséquent pas de flexion (cf. p. 23).

Assemblage par encastrement

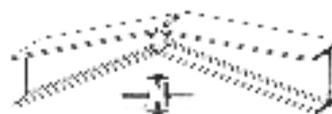
Dans le cas de continuité de poutres ou de poteaux, la liaison est complètement rigide. L'encastrement poteau-poutre peut se faire par soudure directe. On renforce ainsi la fixation. Sinon on utilise une platine et on boulonne les pièces, au niveau des semelles en particulier.

Aux angles des portiques, les poutres sont considérées comme encastrees sur le poteau. L'assemblage reconstitue la continuité du portique.



Liaison poutre-poutre

La liaison peut être articulée ou encadrée (cf. croquis p. 24). L'articulation au faitage de deux demi-portiques est un cas fréquent dans les halles à rez-de-chaussée. Dans le cas des nœuds rigides de portique, la liaison de la poutre au poteau peut s'effectuer en retrait de l'intersection des lignes d'épures géométriques pour des raisons techniques ou architecturales.



Traverses de portique articulées, avec axe libre dans deux coquilles cylindriques soudées.

Liaison dans les poutres treillis

Les assemblages peuvent être soudés ou boulonnés. Il existe de nombreuses possibilités avec les profils du commerce. Les assemblages entre tubes se font par soudage : en « gueule de loup » pour les tubes ronds, à coupes planes quand les membrures sont hexagonales ou carrées.

Liaison d'une poutre métallique avec une paroi en béton

L'attache de la poutre peut s'effectuer de trois manières différentes : par des corbeaux en béton formant une console ; par l'engagement des bouts des poutres dans des logements réservés dans le béton avec des dispositifs d'appui ; par des platines noyées dans le béton sur lesquelles sont fixés les bouts de poutre par âme de liaison ou corbeaux pré-soudés en atelier.



Appui simple de poutre sur un mur ou un voile en béton armé.

Nœuds dans les structures spatiales

Dans les structures spatiales, les sections les plus adaptées au travail de traction et à celui de la compression sont les profils creux ronds.

Assemblages sur des sphères

Les profils creux ronds concourent au centre de la sphère et sont soudés. Ils peuvent aussi être vissés et boulonnés dans la sphère creuse (ex. nœud Méro).



Nœud Méro.

Assemblages par aplatissage de tubes et goussets soudés

Un des procédés consiste à souder sur les membrures des goussets en tôle dans les directions des barres dont les extrémités sont aplaties de manière à permettre l'attache par soudure ou boulonnage.



Assemblage de tubes par goussets aplatis.

Les nœuds à coquilles

Le système Stéphane Duchâteau est formé de coquilles en acier moulé enserrant plusieurs tubes. Les joints sont soudés.

Système de nœud tridimensionnel Stéphane Duchâteau.

