

COMPOSANTS ET SYSTÈMES STRUCTURELS

Nous présentons les divers composants de structure : poutres, poteaux et tirants, en précisant leur rôle mécanique et les choix possibles pour leur réalisation.



Composants structurels

LES POUTRES

Les poutres sont des barres à axe horizontal ou faiblement incliné dans lesquelles les sollicitations sont essentiellement des moments de flexion et des efforts tranchants. Les efforts axiaux sont faibles et négligeables. Dans la plupart des cas, les poutres sont fléchies par rapport à l'axe de forte inertie seul. Mais les pannes d'une couverture inclinée sont soumises à une flexion bi-axiale : il existe alors des moments de flexion par rapport aux deux axes principaux d'inertie.

L'effort tranchant est rarement déterminant dans le dimensionnement des poutres. Il ne pourra l'être que lorsque la longueur de poutre est inférieure à cinq fois sa hauteur de section.

Le moment de flexion est donc l'effort qui conditionne le choix de section. Pour qu'une poutre possède une résistance (c'est-à-dire un module de résistance $W_{el,y}$ ou $W_{pl,y}$) et une rigidité (à savoir une inertie I_y) suffisantes et qu'elle soit économique, il faut que la matière soit éloignée de l'axe de flexion, axe perpendiculaire au plan

de chargement ; d'où le choix de sections en forme de I ou de H. Dans ces sections, avec chargements dans le plan de l'âme, le moment de flexion est repris essentiellement par les semelles et l'effort tranchant par l'âme. Sous l'effet du moment de flexion, une semelle est tendue, l'autre est comprimée, et on concentre dans celles-ci le maximum de matière. L'âme qui sert à maintenir l'écartement entre semelles, ne doit pas être trop mince pour ne pas voiler.

Profilés laminés IPE et HE

Pour une même quantité de matière, les poutrelles IPE ont une plus grande hauteur de section que les HE, et donc des plus fortes résistance et rigidité vis-à-vis de la flexion. Si le critère prédominant est économique, on préférera les sections IPE aux HE pour réaliser les poutres. Si le critère prédominant est la hauteur de section, que l'on veut la plus faible possible, on préférera les sections HE aux IPE.

Par ailleurs, pour une même quantité de matière, une section HEA possède une plus grande hauteur qu'une section HEB, et donc de plus fortes résistance et rigidité vis-à-vis de la flexion.

Si le critère prépondérant est économique, on préférera pour les poutres une section HEA à une section HEB et pour les mêmes raisons, on préférera une section HEB à une section HEM. Si le critère prédominant est la hauteur de section, que l'on veut la plus faible possible, on préférera les sections HEM aux HEB et les sections HEB aux HEA.

On utilise des HE pour les poutres soit parce qu'on recherche une section de hauteur la plus faible possible, soit parce que la section IPE la plus forte est insuffisante, soit enfin éventuellement parce que la poutre dispose de peu d'appuis latéraux au niveau de la semelle comprimée et risque donc de déverser. Une section HE résiste mieux au déversement qu'une section IPE.

Profilés reconstitués soudés (ou PRS)

Ces sections en forme de I sont obtenues par découpe et assemblage par soudures de plats qui constituent les deux semelles et l'âme. Avec l'acier S235, le rapport hauteur d'âme sur épaisseur est en général compris entre 80 et 120, et le rapport largeur de semelle sur épaisseur entre 18 et 28.

On utilise des PRS lorsqu'on veut des poutres ou des poteaux à section variable (variations le long de la barre, de la hauteur d'âme ou de l'épaisseur de semelle) pour des raisons architecturales et/ou économiques. Le surcoût de fabrication par rapport à l'emploi d'une barre laminée peut être compensé par l'économie de matière réalisée en optimisant les caractéristiques dimensionnelles des sections.

Poutres alvéolaires (ou ajourées)

Ces poutres comportent des percements circulaires, elliptiques, hexagonaux ou autres dans l'âme, afin de répondre à une recherche de transparence (poutres support de verrières...), ou de permettre le passage de gaines (poutres support de planchers...).

Ces percements, effectués uniquement dans l'âme, ne réduisent pas de façon sensible la résistance et la rigidité de la poutre sous moments de flexion. Il faut cependant veiller à limiter ou éviter ces percements dans les zones où l'effort tranchant est important c'est-à-dire près des appuis et dans les zones où agissent de fortes charges concentrées.

Poutres à treillis

Les poutres à treillis à deux membrures sont analogues aux poutres en I: les deux semelles sont remplacées par les deux membrures et l'âme est remplacée par les barres de treillis, constituées de diagonales inclinées par rapport aux membrures, et éventuellement de montants perpendiculaires aux membrures (fig. 33).

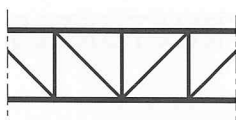


Fig. 33: Poutre à treillis à deux membrures parallèles

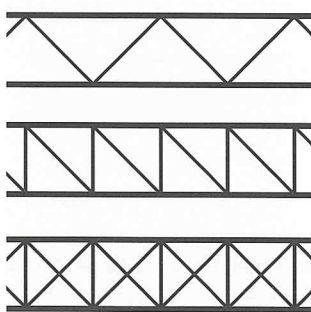


Fig. 34: Types de poutres à treillis (V, N et X de haut en bas)

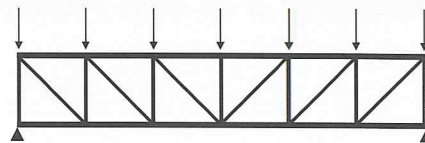


Fig. 35: Treillis en N avec diagonales tendues

Les membrures, comme les semelles, reprennent le moment de flexion dans la poutre, avec traction dans une membrure et compression dans l'autre. Les barres de treillis, comme l'âme, reprennent l'effort tranchant dans la poutre.

Les nœuds d'une poutre à treillis sont les points d'intersection entre axes de membrure et de diagonale.

Dans les poutres à treillis, il est essentiel que les charges agissent aux nœuds, que les appuis soient situés aux nœuds et que les axes des membrures, diagonales et montants éventuels soient concourants.

Dans ces conditions, la seule sollicitation dans les membrures et barres de treillis est un effort de traction ou de compression. Ces composants, non soumis à une flexion locale, sont alors très fins et leurs liaisons sont assimilables à des articulations. Les poutres à treillis offrent un maximum de transparence. Cependant, à inertie comparable, elles présentent des flèches

supérieures à celles des poutres à âme pleine.

Diverses dispositions des barres de treillis sont possibles, conduisant à des poutres à treillis en V ou Warren, en N, en X,... (fig. 34). Il est préférable, dans une poutre à treillis en N, que les diagonales soient disposées de telle sorte qu'elles soient tendues sous l'effet des charges (fig. 35). Les montants, plus courts, sont alors comprimés.

Dans toutes ces poutres, l'angle que font les diagonales avec les membrures est en général compris entre 40 et 45 degrés.

Lorsqu'une poutre à treillis doit supporter des charges perpendiculaires à son plan ou lorsqu'il n'est pas possible de créer des appuis s'opposant au déplacement latéral de la membrure comprimée, il est préférable d'abandonner la poutre à treillis à deux membrures au profit d'une poutre à treillis à trois membrures.

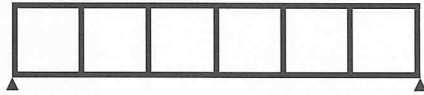


Fig. 36: Poutre à traverses de liaison

Poutres à traverses de liaison

Dans les poutres à traverses de liaison, encore appelées poutres « échelle » ou poutres « Vierendeel », les membrures sont reliées uniquement par des montants encastrés sur ces membrures (fig. 36).

Il n'y a pas de diagonale, ou triangulation, comme dans les poutres à treillis.

Les membrures et montants subissent donc des flexions locales, même si toutes les charges agissent aux nœuds, et leurs sections sont beaucoup plus fortes que dans les poutres à treillis. L'avantage des poutres à traverses de liaison, par rapport aux poutres à treillis, est de libérer des passages plus importants entre membrures et montants.

Poutres caisson et poutres tubulaires

Les poutres reconstituées en caisson sont composées de deux semelles reliées par deux âmes soudées (fig. 37). Elles présentent, comme les profils tubulaires carrés, rectangulaires ou circulaires, une forte rigidité à la torsion. Les poutres tubulaires ou en caisson trouvent un intérêt lorsque les charges sont excentrées, créant des efforts de torsion, et plutôt pour des ouvrages de dimensions importantes (ponts, passerelles...).

LES POTEAUX

Les poteaux sont des barres dans lesquelles agit un effort de compression auquel s'ajoutent bien souvent un moment de flexion et un effort tranchant. Parfois l'effort axial est seul: il en est ainsi des poteaux bi-articulés verticaux, non soumis à des charges horizontales, qu'on appelle poteaux « pendulaires »,

et des barres bi-articulées inclinées de stabilisation, qu'on appelle « butons ».

Les poteaux doivent posséder une résistance suffisante pour éviter le phénomène de flambement. Il faut pour cela que la matière soit éloignée de l'axe principal par rapport auquel on examine le flambement.

Parfois le flambement est empêché dans l'une des directions par des parois ou autres points fixes mais souvent il doit être étudié dans les deux directions principales.

Un paramètre déterminant pour la résistance d'un poteau au flambement est son élancement, c'est-à-dire le rapport entre la longueur de flambement du poteau et le rayon de giration de la section. L'élancement le plus fort d'un poteau est généralement compris entre 50 et 150.

Profilés laminés IPE et HE

Si le poteau ne peut flamber que par rapport à l'axe de forte inertie ou présente une longueur de flambement beaucoup plus forte par rapport à cet axe, un profilé IPE est la solution la plus économique. Si le poteau peut flamber dans les deux directions avec des longueurs de flambement voisines, un profilé HEA, éventuellement HEB ou HEM, est préférable.

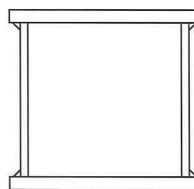


Fig. 37: Poutre caisson

Systèmes structurels

LES PORTIQUES PLANS

Les portiques sont des systèmes de barres situées dans un même plan et capables de résister aux charges verticales et horizontales agissant dans ce plan grâce à des liaisons encastrées entre barres et/ou aux appuis. Les charges agissant sur un portique provoquent des sollicitations de flexion, effort axial et effort tranchant dans une partie ou la totalité des barres. Les portiques peuvent être à simple travée ou à travées multiples et à simple niveau ou multi-étagés (fig. 38).

Dans un portique, certaines liaisons poutre-poutre, poutre-poteau et poteau-fondation peuvent être des articulations, d'autres des encastrement.

Si l'on dispose un nombre trop élevé d'articulations, le système structurel devient instable, c'est-à-dire incapable d'équilibrer les charges : la structure s'effondre, certains déplacements se produisant librement sans que les barres ne se déforment (fig. 39). Lorsqu'un système structurel est instable, il le reste même si on augmente la résistance des barres.

Diverses dispositions d'assemblage permettent de réaliser le type de liaison choisi (articulation ou encastrement). Pour les poutres et poteaux à treillis, on est en présence d'articulation si les membrures se rejoignent (fig. 41) et d'encastrement dans le cas contraire (fig. 42).

Profilés reconstitués soudés (ou PRS)

L'utilisation de PRS est moins fréquente pour les poteaux que pour les poutres.

On les rencontre parfois pour réaliser des poteaux à section variable, articulés en pied et encastrés en tête sur les poutres. Avec l'acier S235, le rapport hauteur maximale d'âme sur épaisseur d'âme est de l'ordre de 40.

Poteaux à treillis

L'utilisation de barres à treillis est moins fréquente pour les poteaux que pour les poutres. Lorsqu'on les emploie, le poteau devant généralement offrir une résistance au flambement dans les deux directions, on adopte plutôt des poteaux à trois membrures, éventuellement quatre.

Poteaux tubulaires

Lorsqu'un poteau est soumis à une compression seule, avec les mêmes longueurs de flambement dans les deux directions, la forme idéale de section est un profil creux carré ou circulaire : il présente la même résistance au flambement dans toutes les directions.

LES TIRANTS

Les tirants sont des éléments qui ne sont soumis qu'à des efforts de traction.

Ce sont généralement des ronds pleins, de diamètre compris entre 10 et 30 mm, des plats rectangulaires, des cornières et parfois des câbles. Les ronds pleins sont plus économiques et plus faciles d'emploi que les câbles, leurs extrémités pouvant être filetées et fixées par boulons.

Afin que les tirants soient immédiatement efficaces pour reprendre les charges, sans rattrapage de jeux, on leur applique parfois une certaine tension initiale lors du montage. Ceci est en général réalisé par un ridoir disposé sur le tirant dont la rotation produit un raccourcissement du tirant permettant d'établir cette tension initiale.

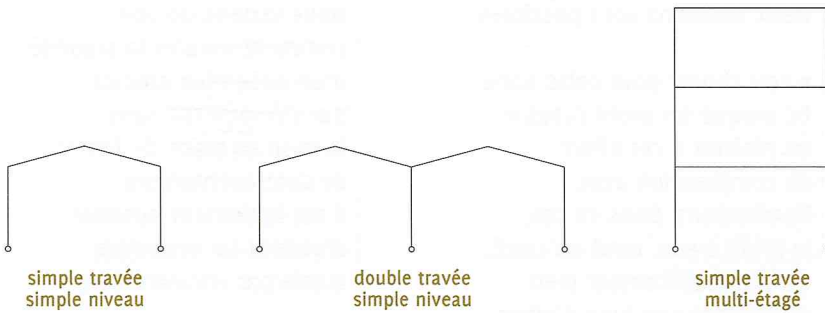


Fig. 38: Divers types de portiques

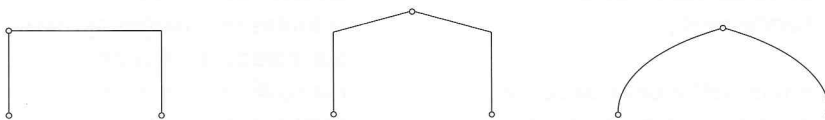


Fig. 40 a, b et c: Portiques à 3 articulations

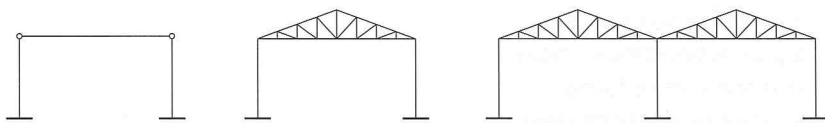


Fig. 41 a, b et c: Portiques à articulations en tête de poteaux encastrés aux appuis

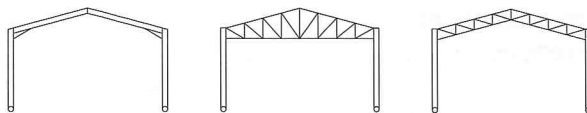


Fig. 42 a, b et c: Portiques courants, avec encastremets entre poutres et poteaux

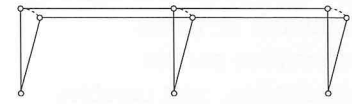


Fig. 39: Portique instable

Les poutres de portique à simple niveau sont horizontales (fig. 40-a et 41-a) ou de forme brisée (fig. 42-a). On dispose en général des renforts, parfois appelés « jarrets », aux extrémités de poutres liées aux poteaux (fig. 42-a) car d'une part, c'est dans ces sections que le moment de flexion est le plus élevé et, d'autre part, en augmentant ainsi la hauteur de section de poutre liée au poteau, l'assemblage est plus économique à réaliser.

Lorsqu'un portique supporte une enveloppe légère, la hauteur de poutre est de l'ordre de $1/40^e$ de la portée avec des profilés laminés IPE, $1/30^e$ de la portée avec des PRS et $1/20^e$ de la portée avec des poutres à treillis.

Les portiques et arcs à trois articulations sont stables et isostatiques (fig. 40). Les portiques à simple niveau avec encastremets en pieds de poteaux et articulations aux liaisons poutre-poteau sont hyperstatiques (fig. 41). Il est plus fréquent de prévoir des encastremets aux liaisons poutre-poteau et des articulations en pieds de poteaux (fig. 42). Si on remplace une articulation entre barres par un encastrement, le coût de l'assemblage augmente mais on réalise une économie sur la quantité d'acier nécessaire pour les barres et le montage est parfois facilité.

LES SYSTÈMES TRIANGULÉS

Palées de stabilité

Des systèmes triangulés tels que représentés à la figure 43, constitués de barres assemblées par des articulations, sont capables de résister aux charges horizontales et verticales agissant dans leur plan.

La présence de diagonales de triangulation permet de réaliser une économie de matière par rapport au système de type portique, de mêmes dimensions mais dont la stabilité est assurée par des encastremets et non des triangulations. Un rectangle (fig. 44) constitué de quatre barres assemblées par des axes à chacun des angles se déforme en parallélogramme sous un effort P . Si cette poussée accompagne le déplacement, l'ensemble « se couche ».

Pour annuler cette déformation, il suffit d'ajouter une barre bc reliant deux angles opposés (fig. 45). Le rectangle est composé maintenant de deux triangles indéformables rendant le rectangle également indéformable. C'est le rôle attribué à la barre de contreventement disposée dans le long-pan du bâtiment. Dans le cas de notre schéma, cette barre bc (en trait plein) subit un effort de traction.

Si la poussée P change de sens (cas du vent), la barre bc subit un effort de compression. Cette barre, qui a toujours une grande longueur relative, va alors travailler au flambement.

Deux solutions sont possibles :

- soit choisir pour cette barre bc unique un profil capable de résister à cet effort de compression avec flambement. Dans ce cas, le profil creux, rond ou carré, est particulièrement bien adapté pour ce type d'effort. Il subira alternativement, suivant le sens du vent, l'effort de traction et l'effort de compression avec flambement ;
- soit mettre deux barres bc et ad pour réaliser une croix, chaque barre travaillant uniquement à la traction.

Dans certains cas, la première solution est la plus économique : moins de matière et réduction du nombre d'assemblages. En outre, une seule barre de contreventement ne condamne pas tout le panneau, laissant la possibilité d'ouvrir une porte par exemple.

Les barres de contreventement doivent toujours être fixées au plus près de l'angle formé par les axes neutres des profils, et si possible sur le poteau et la traverse. Dans le cas de la figure 46, la poussée P engendre un effort de traction dans la barre de contreventement. Cette force agit sur le poteau ab et tend à le fléchir. Les profils ne sont pas conçus pour reprendre des efforts latéraux de ce type. Cette disposition nécessite un renforcement coûteux.

Nous venons de voir comment assurer la stabilité d'un ensemble articulé qui s'écroulerait sans la mise en place de barres de contreventement. Il est également possible d'obtenir un ensemble stable par encastrement.

L'encastrement peut être réalisé en pied, en tête, ou à la fois en pied et en tête des poteaux. Si toutes les charges agissent aux nœuds d'un système triangulé, les barres le composant ne sont soumises qu'à des efforts de traction ou compression.

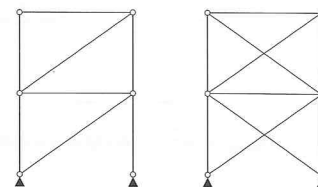


Fig. 43: Systèmes triangulés

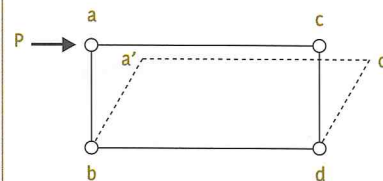


Fig. 44

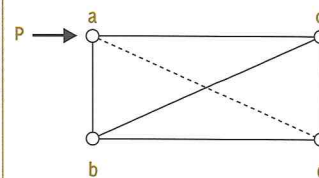


Fig. 45

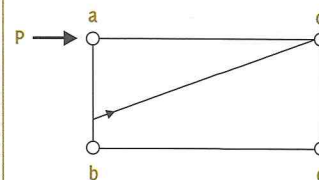


Fig. 46

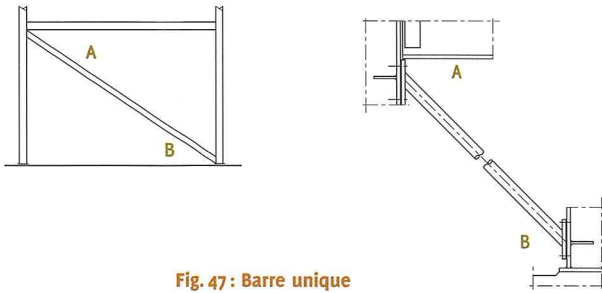


Fig. 47: Barre unique

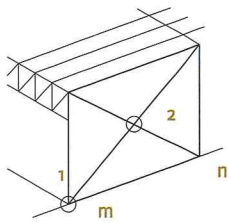
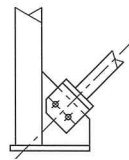
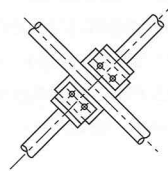


Fig. 48: Croix de Saint-André



détail 1



détail 2

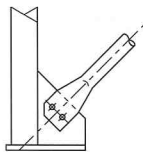
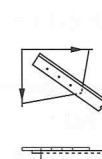
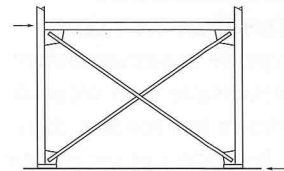
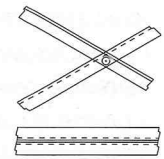


Fig. 49: Croix de Saint-André



détail 1



détail 2

Fig. 50: Croix de Saint-André

Barre unique (fig. 47)

Le profil creux rond ou carré permet, par son excellente résistance au flambement, de réaliser la palée de stabilité avec une seule barre qui subira alternativement des efforts de traction et de compression avec flambement.

C'est bien souvent la solution la plus économique : gain de matière et, surtout, réduction du nombre d'assemblages.

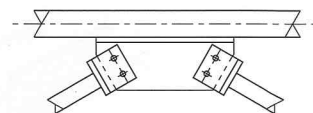
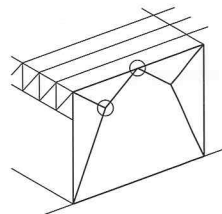
En outre, une seule barre de contreventement ménage une possibilité d'ouverture plus importante que la croix de Saint-André.

Croix de Saint-André

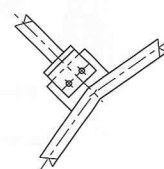
La forme et la section de la barre déterminent le type de liaison d'extrémité. (fig. 48, 49 et 50)

Portique en K

Cette solution réserve un gabarit de passage plus important (fig. 51).



détail 1



détail 2

Fig. 51: Portique en K

Contreventements horizontaux en toiture

Ce type de contreventement est nécessaire pour recueillir les efforts horizontaux dans une direction x et les reporter sur les éléments de stabilité dans cette même direction. Le plus souvent ce contreventement, dénommé « poutre au vent », est constitué d'un treillis disposé en toiture entre deux traverses de portiques et adjacent aux palées de stabilité verticales en long-pan.

Aux nœuds de ce treillis viennent s'assembler les pannes qui ramènent les efforts longitudinaux (vent, séisme).

Ce contreventement travaille donc essentiellement comme une poutre à treillis en flexion (fig. 52).

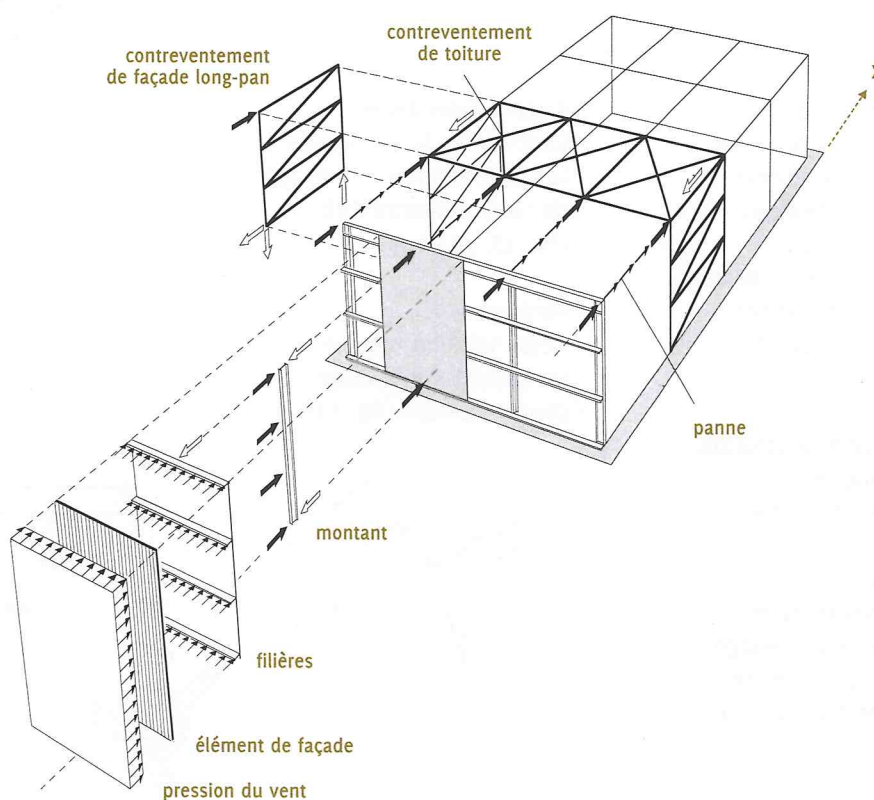


Fig. 52: Poutre au vent et cheminement des efforts