

CONCEVOIR UNE OSSATURE

L'ossature d'un bâtiment en construction métallique est un ensemble d'éléments de type barres profilées ou barres reconstituées. Elle doit permettre la fixation des éléments d'enveloppe et de séparation intérieurs. Elle doit donc supporter les actions, les charges et les transmettre aux fondations.

Le système porteur

L'ossature d'une halle en charpente métallique est constituée de l'assemblage d'éléments en forme de barres profilées ou reconstituées à partir de produits plats ou de profils creux. Elle a pour fonction première de supporter les actions agissant sur la halle et de les transmettre aux fondations. Elle doit ensuite permettre la fixation des éléments d'enveloppe (toiture, façades) et de séparation intérieure.

L'ossature d'un bâtiment est un système complexe en raison de la multitude et de la diversité des éléments qui la composent : poteaux, poutres, contreventements, planchers, murs, etc.

Elle aura nécessairement un caractère spatial car elle doit être capable de reprendre et de conduire aux fondations de multiples actions agissant dans n'importe quelle direction.

Malgré la conception tridimensionnelle d'une ossature de bâtiment classique, on peut la concevoir et la calculer à partir d'une modélisation simplifiée de structures planes disposées selon les directions principales, de la manière suivante :

- comprises dans des faces planes généralement orthogonales entre elles ;
- reprenant et ne transmettant que les actions (ou les efforts) agissant dans son propre plan (effet de membrane). La rigidité de chaque structure plane à la flexion transversale ainsi que la rigidité de chacune d'entre elles à la torsion hors du plan sont négligeables et peuvent être considérées comme nulles ;

- articulées les unes aux autres le long de leurs bords communs, c'est-à-dire le long des joints. Les efforts transmis par les joints ne sont donc que des efforts tangentiels.

L'ossature formée de plans

Une halle de forme simple est considérée comme une boîte (fig. 7) formée de six surfaces porteuses planes. L'ossature et l'enveloppe de la halle constituent le couvercle et les quatre parois de la boîte, le fond étant représenté par le sol de fondation ou l'infrastructure. Pour assurer la stabilité de cette boîte, il est nécessaire que chacune des trois directions soient rigides dans son plan – par effet cadre ou par contreventement.

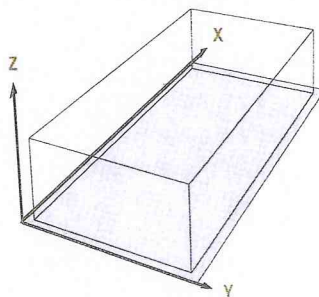


Fig. 7: Volume d'une halle

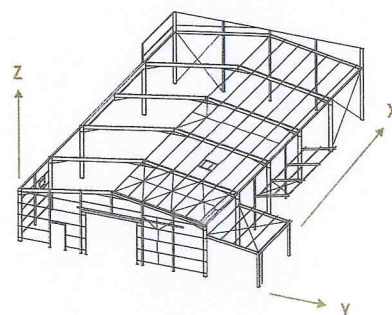


Fig. 8: Plan d'une ossature de halle industrielle classique

La structure porteuse de la halle étant considérée comme une boîte, l'ossature (fig. 8) sera décomposée, selon les trois directions de l'espace, en sous-structures planes, qui sont :

- les structures principales de résistance – les portiques ou cadres transversaux – parallèles au plan YZ ;
- les charpentes de pignons (ou pans de fer), parallèles au plan YZ. La charpente pan de fer est composée de lisses de bardage, potelets et, selon le cas, de contreventements transversaux verticaux ;
- les charpentes des façades longs-pans (parallèles au plan XZ) composées des lisses de bardage, potelets dans le cas de grandes travées, et contreventements verticaux longitudinaux ;
- la charpente du toit, parallèle au plan XY, composée des pannes et des contreventements transversaux et longitudinaux.

Le cheminement des charges

Pour comprendre le fonctionnement de l'ossature d'une halle il est important de bien suivre le cheminement des charges dans la structure, à partir de leur point d'application jusqu'aux fondations en passant par tous les éléments constitutifs de la structure et de l'un à l'autre par leurs attaches. En général, une halle peut être soumise :

- à des charges verticales : charges permanentes, d'exploitation, pont roulant, etc. ;
- charges horizontales (dans toutes les directions) : vent, pont roulant, séisme, etc.

LES CHARGES VERTICALES

Considérons d'abord les charges verticales agissant sur la toiture (fig. 9) :

- le poids propre de la couverture et la neige sont repris par l'élément de la couverture qui travaille essentiellement en flexion comme poutre simple en s'appuyant sur les pannes ;

- la panne est sollicitée par une charge uniformément répartie provenant des réactions d'appuis de la couverture ; elle travaille en flexion comme poutre simple ou poutre continue, selon le choix de son système porteur ; les appuis sont réalisés par les cadres (portiques) ;

- le portique reçoit des charges concentrées au droit de chaque panne – les réactions des pannes ;

- les réactions d'appui du cadre sont reprises par les fondations et ainsi la fonction porteuse verticale du système est remplie.

LES CHARGES HORIZONTALES

Contrairement aux charges gravitaires qui agissent toujours dans le même sens, la majorité des charges horizontales peuvent agir dans toutes les directions du plan. Le système de contreventements doit donc être conçu en conséquence. Quel que soit le système réalisé, il est important de garantir le cheminement des charges horizontales jusqu'aux fondations.

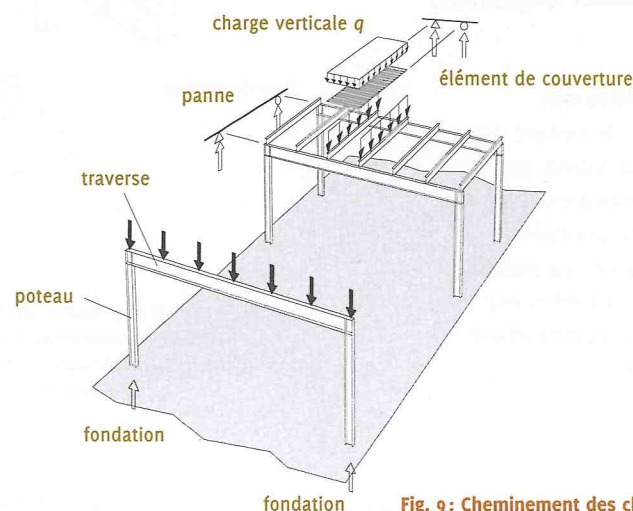


Fig. 9 : Cheminement des charges verticales

LE VENT W_y

Considérons maintenant l'action du vent agissant d'après la direction Y (W_y) et exerçant une pression sur la façade long-pan (fig. 10).

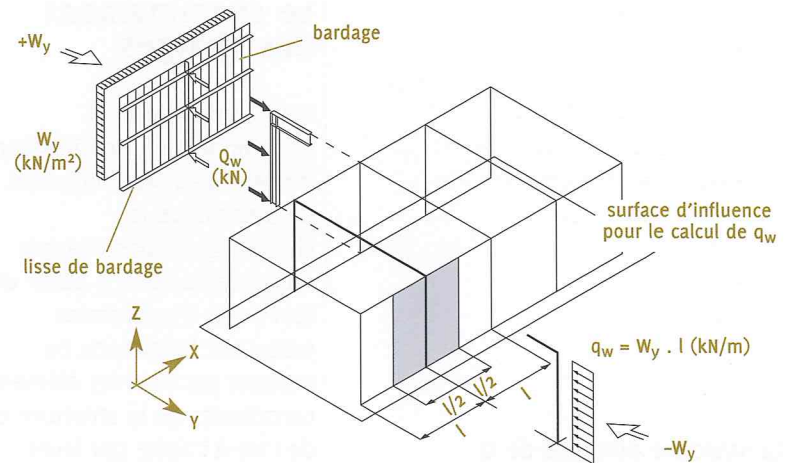
La travée ayant des valeurs moyennes, les lisses de bardage sont appuyées sur les poteaux des portiques. Le bardage reprend la pression du vent et charge avec ses réactions les lisses qui, à leur tour, transmettent leurs réactions aux poteaux des portiques.

Ainsi, la charge horizontale agissant sur la surface verticale perpendiculaire aux portiques (le long-pan) sollicite le portique dans son plan. Les portiques reprennent donc l'action du vent W_y et la transmettent, par leurs réactions, aux fondations.

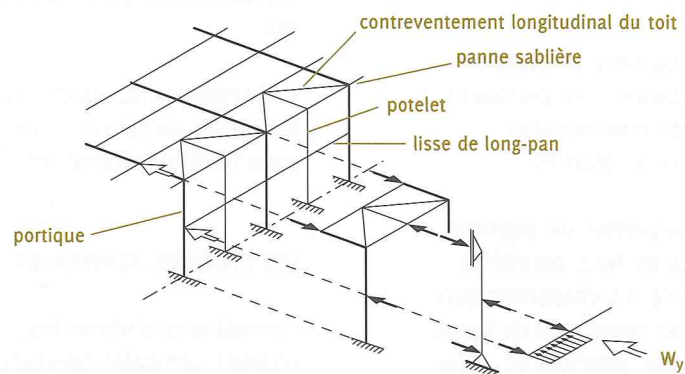
Pour des travées à partir de 9 m, afin de réduire la portée des lisses de bardage, on dispose un potelet au milieu de la travée. Ainsi, une lisse sera appuyée à une extrémité sur le poteau de portique et à l'autre sur le potelet.

Le potelet aura son appui inférieur sur la fondation et l'appui supérieur sur un contreventement longitudinal de toiture.

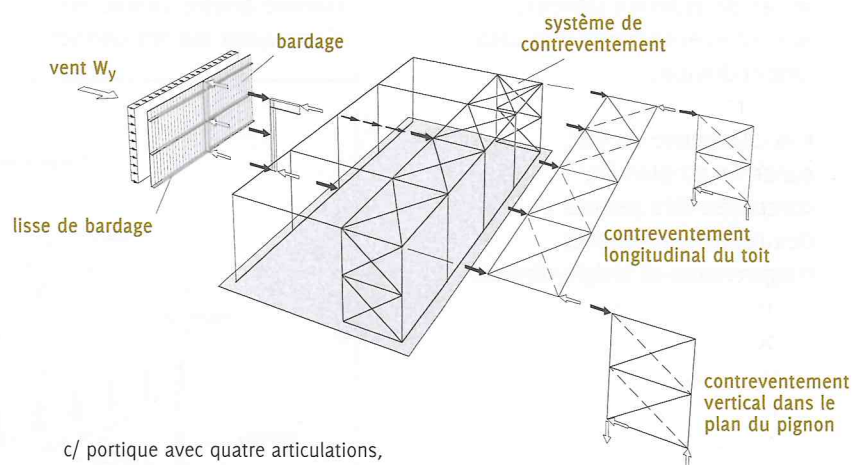
Le contreventement longitudinal de toiture est une poutre à treillis ayant comme membrures la panne sablière et la première panne courante. La portée de la poutre à treillis est la travée, les appuis étant les portiques.



a/ portique chargé avec le vent W_y par les lisses



b/ portique chargé avec W_y par les lisses et le contreventement longitudinal du toit



c/ portique avec quatre articulations, le vent W_y est entièrement repris par le système de contreventement

Fig. 10: Cheminement des forces dues au vent W_y

Le cheminement des efforts

Il est le suivant :

- les éléments de bardage reprennent la pression du vent et chargent avec leurs réactions les lisses du long-pan ;
- les lisses du long-pan, poutres simples entre les potelets et les poteaux des portiques ou poutres continues sur le potelet, transmettent leurs réactions aux potelets et aux poteaux du portique ;
- les potelets, éléments fléchis chargés avec les réactions des lisses, transmettent leurs réactions aux fondations par l'appui inférieur et au contreventement longitudinal par l'appui supérieur ;
- le contreventement longitudinal transmet la part de l'action du vent apportée par le potelet aux portiques qui sont ses appuis.

De cette façon l'action du vent W_y arrive à charger le portique par l'intermédiaire des lisses de long-pan et du contreventement longitudinal.

Dans certaines situations, par exemple une traverse simplement posée sur les poteaux (avec des articulations en chaque nœud), on réalise un cadre de contreventements composé du contreventement longitudinal du toit et deux contreventements verticaux disposés dans des plans verticaux transversaux (couramment les plans de pignons). Le vent W_y est repris entièrement par ce système de même que toute force horizontale agissant d'après la direction Y. Ainsi, la stabilité transversale est assurée (fig. 10).

LE VENT W_x

Le cheminement des efforts dus au vent longitudinal $+W_x$ agissant sur le pignon 1 (axe file 1) de la halle est le suivant (fig. 11) :

- le vent agit sur les éléments de façade (bardage) qui sont fléchis et s'appuient sur les lisses qui à leur tour transmettent leurs réactions aux potelets ;
- les potelets travaillent en général comme des poutres simples fléchies dans un plan vertical. Leur appui inférieur est sur la fondation, tandis que l'appui supérieur est assuré (dans ce cas) par une panne qui dépasse la traverse du portique axe file 1 et qui fait partie du contreventement transversal de toiture ;
- les pannes transmettent les réactions des potelets par compression dans le contreventement transversal de la toiture ;

- le contreventement transversal de toiture est une poutre à treillis sur deux appuis. Ces appuis sont réalisés par les deux contreventements verticaux de façade long-pan. Le contreventement transversal de toiture est soumis aux charges provenant des pannes ;
- les contreventements verticaux de long-pan conduisent les réactions d'appui du contreventement de toiture dans les fondations en travaillant comme des poutres consoles à treillis. En même temps, ces contreventements assurent la stabilité longitudinale de la structure portant aussi le nom de palées de stabilité.

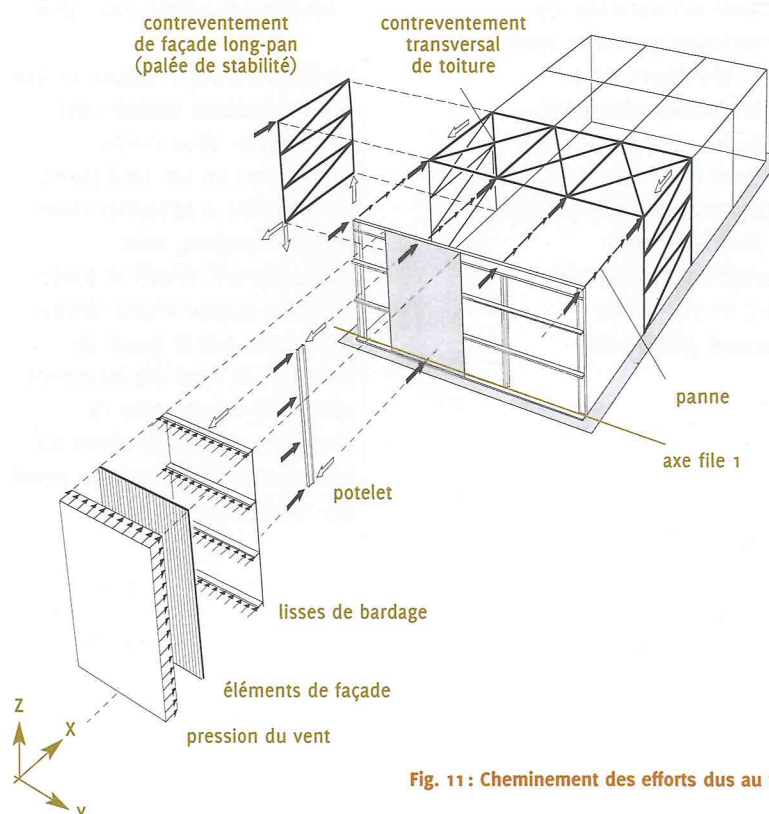


Fig. 11 : Cheminement des efforts dus au vent W_x

Structure principale de résistance

OSSATURE PORTEUSE

Pour une halle classique (en forme de parallélépipède rectangle), la plupart des systèmes porteurs sont plans et se présentent sous la forme de cadres ou portiques. Ils sont constitués d'une traverse (ou poutre, ou arbalétrier) qui supporte des pannes et la couverture, et de poteaux qui servent d'appui à la traverse et reportent les charges vers les fondations. Traverses, poteaux, nœuds et pieds de poteaux constituent les éléments structuraux du portique.

La forme du portique dépend beaucoup des critères de conception de la halle, de la portée, du système statique retenu, du mode de construction, etc. La traverse peut prendre des formes diverses : horizontale, inclinée, brisée, de hauteur constante ou variable, etc. Les portiques peuvent avoir une ou plusieurs nefs. Pour les halles courantes, les portées des portiques se situent entre 10 et 30 m. Les écartements des portiques – les travées – sont couramment comprises entre 5 et 7 m et ne dépassent pas 15 m.

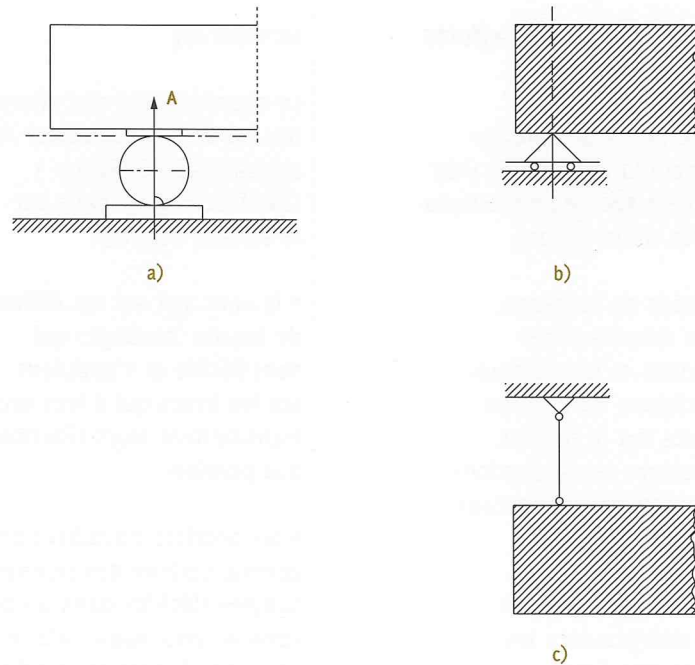


Fig. 12: Liaisons simples. Appuis simples

DIFFÉRENTS TYPES DE LIAISON

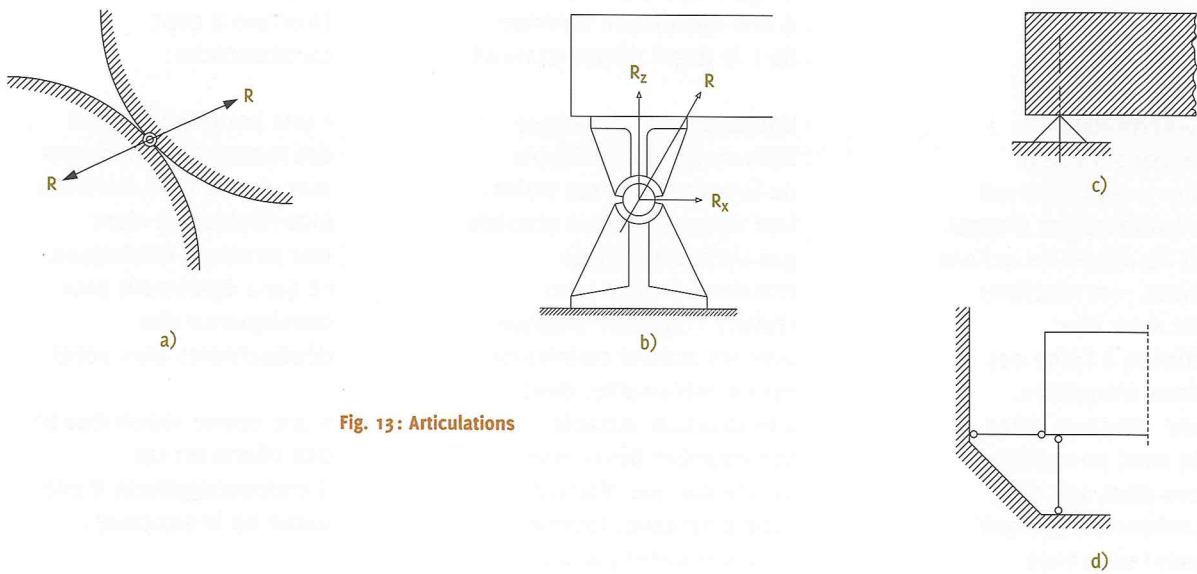
La liaison des différentes barres formant le portique, entre elles ou avec les fondations, peut être de trois types :

- liaison simple (appui simple) ;
- liaison articulée (ou souple) ;
- liaison encastree (ou rigide).

La liaison simple (appui simple ou articulation mobile) est définie par deux corps en contact en un seul point, de manière à autoriser dans le plan tangent, tout déplacement relatif et toute rotation autour d'une droite qui passe par le point de contact ; le seul déplacement empêché étant selon la direction perpendiculaire au plan tangent au droit du point de contact (fig. 12.a).

La force de liaison (ou la réaction dans un appui simple) a son point d'application connu (le point de contact) et sa direction connue (la direction perpendiculaire au plan tangent commun) ; reste à déterminer la valeur de la force.

La figure 12.b est la représentation habituelle d'un appui simple, mais la représentation par un pendule est la plus suggestive (fig. 12.c) parce qu'elle exprime d'une manière intuitive les caractéristiques statiques et cinématiques d'une liaison simple.



L'articulation (liaison souple ou assemblage souple) est définie par deux corps en contact en un seul point de manière à empêcher tout déplacement relatif ; toute rotation autour de l'axe passant par ce point de contact restant possible (fig. 13.a).

La réaction a pour point d'application le point de contact mais la direction et la valeur en sont inconnues. L'articulation peut être remplacée par la réaction R (direction et valeur inconnues) ou

par ses composantes R_z et R_x d'après le système de coordonnées choisi (fig. 13.b).

La figure 13.c est la représentation usuelle, mais la représentation pendulaire (fig. 13.d) met en évidence plus clairement les propriétés cinématiques de l'articulation.

L'encastrement (liaison ou assemblage rigide) est défini par deux corps en contact de telle manière qu'aucun déplacement ni rotation réciproque ne soit possible.

Pour l'encastrement, la force de liaison R (la réaction) présente trois inconnues : la valeur, la direction et la position par rapport au centre de gravité G de la section de l'encastrement (fig. 14.b). Il est convenable de remplacer la réaction R par ses composantes R_z et R_x (d'après le système de coordonnées choisi) et le moment M de la réaction R par rapport au centre G de la section d'encastrement (fig. 14.d). Habituellement, les efforts (ou forces de liaison) qui se développent dans la section d'encastrement pris en compte dans les calculs sont le moment de l'encastrement et les composantes de la réaction d'après les axes de coordonnées choisis.

La figure 14.a est la représentation usuelle, mais la représentation pendulaire (fig. 14.c) met en évidence plus clairement les propriétés cinématiques de l'encastrement.

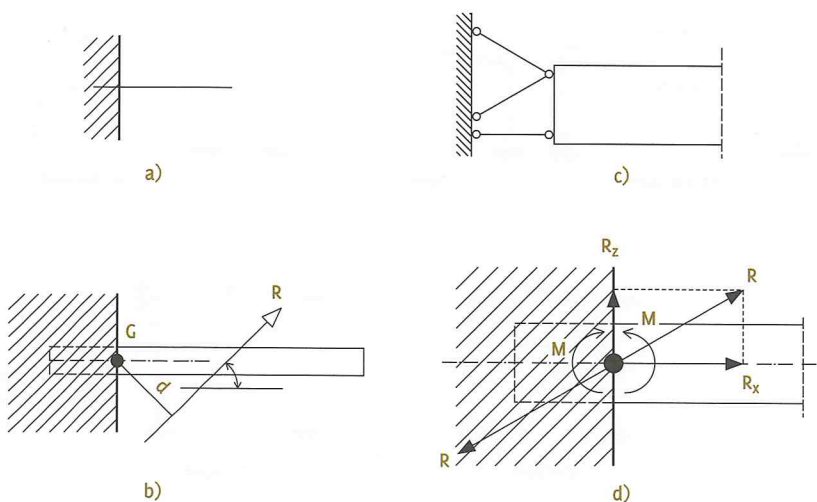


Fig. 14: Encastements

SYSTÈMES STATIQUES

Au stade du calcul, la première opération est la détermination des réactions d'appui. Pour que la structure soit stable, les réactions d'appui doivent équilibrer les actions extérieures ; les réactions peuvent donc être déterminées à l'aide des conditions d'équilibre. Pour une structure plane chargée avec un système de forces dans son plan, la mécanique (la statique appliquée) offre trois conditions d'équilibre. Si les réactions d'appui de la structure ne comportent pas plus de trois inconnues, les trois conditions d'équilibre du plan suffisent pour leur calcul ; la structure est statiquement déterminée ou isostatique.

Cela se réalise par l'une des trois conditions suivantes :

- par trois articulations simples ;
- par une articulation et un appui simple au-dessus ;
- par un seul encastrement.

Si les réactions d'appui de la structure comportent un nombre d'inconnues supérieur à trois, donc supérieur au nombre d'équations fournies par les conditions d'équilibre, le problème est indéterminé ; des conditions supplémentaires tirées de l'étude des déformations viennent fournir de nouvelles équations : autant que d'inconnues en surnombre.

Une telle structure est hyperstatique ; le degré d'hyperstaticité (ou d'indétermination statique) est égal au surnombre des inconnues.

Il faut noter que la présence d'une articulation diminue de 1 le degré d'hyperstaticité.

Une structure isostatique sous certaines conditions ou hyperstatique est stable. Une structure qui ne possède pas suffisamment de réactions d'appui pour réaliser l'équilibre statique avec les actions extérieures est un mécanisme, donc une structure instable. Son équilibre devra être assuré par une réaction supplémentaire, fournie le plus souvent par un contreventement. Il s'agit ici de ce qu'on appelle la stabilité statique. La figure 15 présente quelques systèmes statiques de cadres (portiques).

L'hyperstaticité d'une structure a pour conséquences :

- une bonne répartition des moments fléchissants avec des valeurs extrêmes plus faibles que dans une structure isostatique, ce qui a également pour conséquence des déplacements plus petits ;
- une bonne redistribution des efforts en cas d'endommagement d'une partie de la structure ;
- une grande sensibilité aux déplacements d'appui, tassements différentiels, variations de température, etc. ; les structures isostatiques sont très peu sensibles à de tels phénomènes.

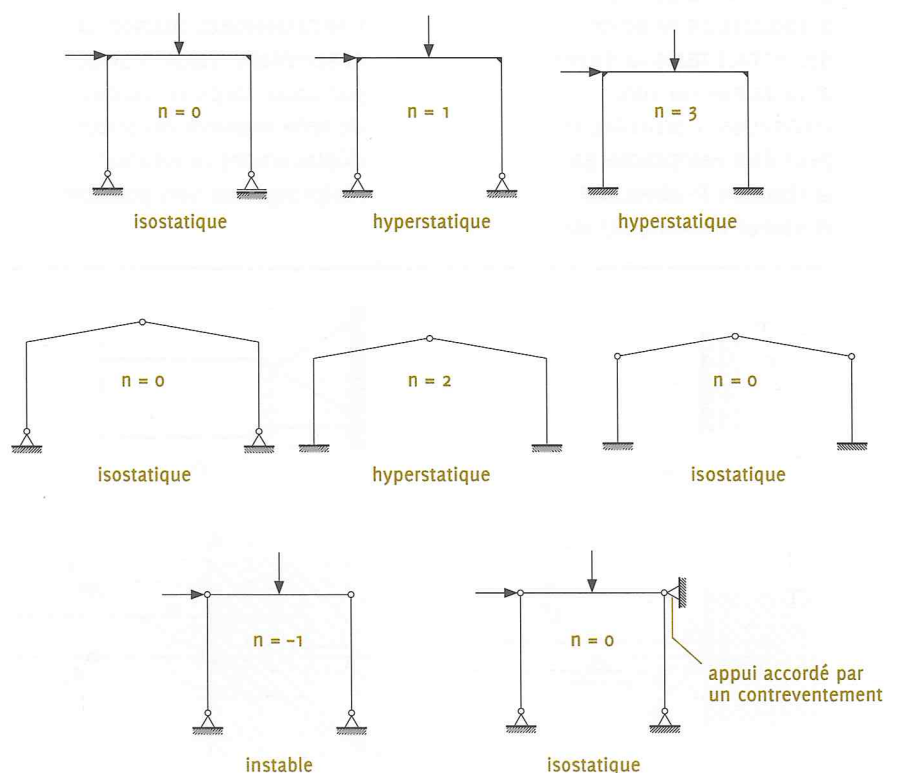


Fig. 15: Degré d'hyperstaticité n d'un portique

Les contreventements

Comme son nom l'indique, le contreventement doit reprendre l'action du vent. Il a cependant d'autres fonctions souvent tout aussi importantes.

Ainsi, les trois fonctions principales des contreventements sont

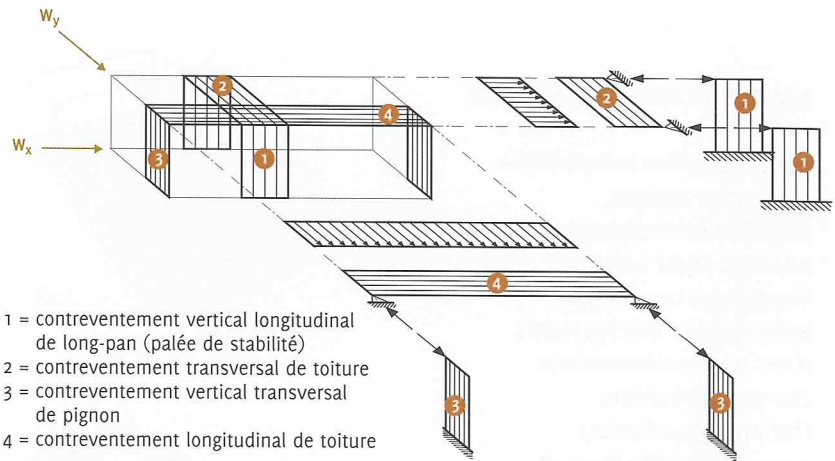
- assurer la stabilité statique de la structure,
- limiter les déformations,
- assurer la stabilité de la forme.

STABILITÉ STATIQUE

Nous avons déjà évoqué la notion de stabilité statique des portiques plans. Il s'agit ici d'assurer l'équilibre des charges horizontales agissant sur la structure, c'est-à-dire de garantir leur cheminement jusqu'aux fondations.

Une halle de forme simple est stable si chaque direction de l'espace est stabilisée, c'est-à-dire si un certain nombre de plans porteurs sont disposés de façon à constituer un système tridimensionnel. La figure 16 montre schématiquement un système fondamental de contreventement développé selon deux directions perpendiculaires. Un tel système de contreventement permet à lui seul d'équilibrer une force horizontale agissant dans n'importe quelle direction. Transversalement la stabilité statique est assurée, dans la plupart des cas, par des portiques à condition qu'ils soient stables (isostatiques sous certaines conditions ou hyperstatiques).

Parfois, dans des situations particulières (forts tassements différentiels, par exemple), la structure principale de résistance, le portique ayant



- 1 = contreventement vertical longitudinal de long-pan (palée de stabilité)
- 2 = contreventement transversal de toiture
- 3 = contreventement vertical transversal de pignon
- 4 = contreventement longitudinal de toiture

Fig. 16: Fonction des contreventements et transmission schématique des efforts horizontaux aux fondations

des articulations en chaque nœud, est statiquement instable (mécanisme) dans son plan. Les contreventements longitudinaux dans le plan du toit, appuyés sur les contreventements verticaux transversaux (dans le plan des pignons), vont rendre le système stable.

Le cadre formé par ces contreventements sera l'appui stabilisant pour les portiques transversaux.

Les portiques sont des structures planes, considérés

sans rigidité hors de leur plan (dit transversal). Donc, longitudinalement, les portiques forment un système instable, comme si nous avions des articulations au droit de chaque nœud (fig. 17.a).

Les contreventements verticaux longitudinaux disposés dans chaque long-pan, nommés aussi palées de stabilité, constituent les appuis nécessaires pour réaliser la stabilité longitudinale de la structure.

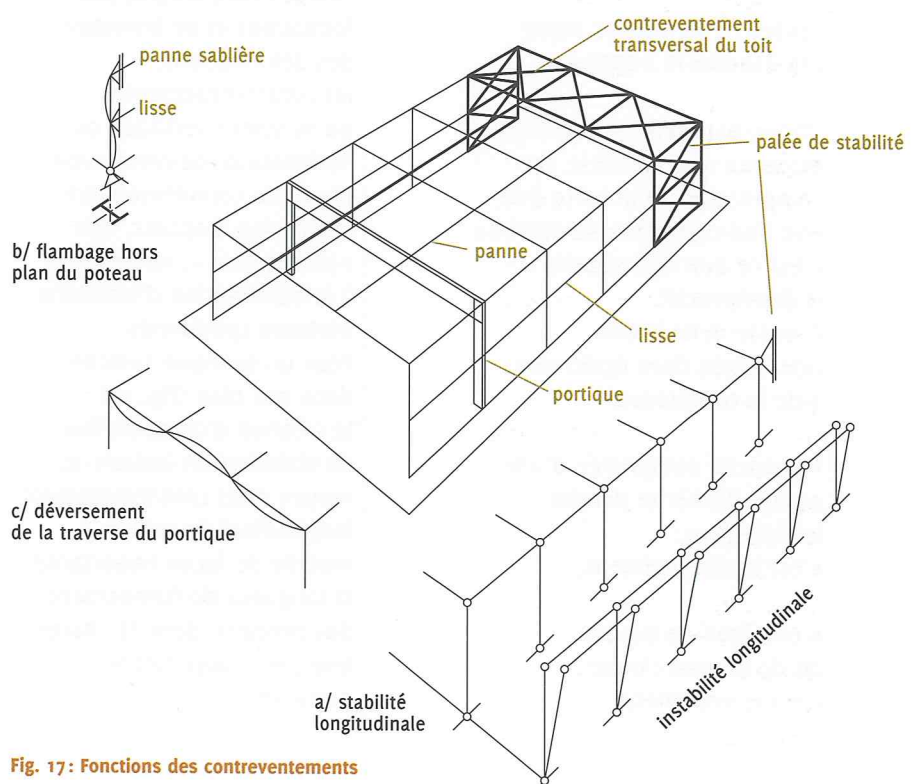


Fig. 17: Fonctions des contreventements

LIMITATION DES DÉFORMATIONS

Pour les halles industrielles avec pont roulant, les contreventements peuvent avoir un rôle important. Les charges horizontales transversales dues au fonctionnement des ponts roulants (freinage du chariot) ont un caractère local et en conséquence le portique directement chargé aura des déplacements latéraux bien plus grands par rapport aux portiques voisins.

Dans ce cas il est utile de disposer des contreventements longitudinaux contenus dans le plan de la toiture et assurer la collaboration aux déplacements entre les portiques et les contreventements.

Ainsi, l'effet local d'une force transversale sera réparti entre plusieurs portiques et comme suite, les déplacements transversaux seront réduits d'une manière importante.

STABILITÉ DE FORME POUR LES ÉLÉMENTS PORTEURS

L'acier, excellent en traction, présente une faiblesse en compression : une barre fine que l'on comprime se dérobe ; c'est ce que l'on appelle le flambement.

Il existe deux autres instabilités dues également à de la compression :

- la partie comprimée d'une poutre fléchie se dérobe latéralement : c'est le déversement ;
- une âme de poutre ou de poteau cloque : c'est le voilement.

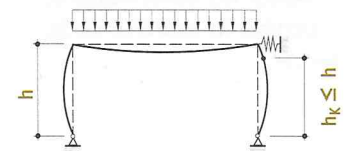
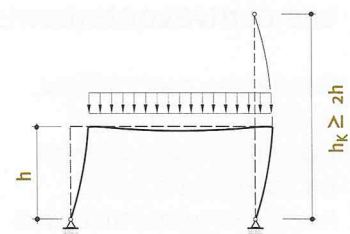
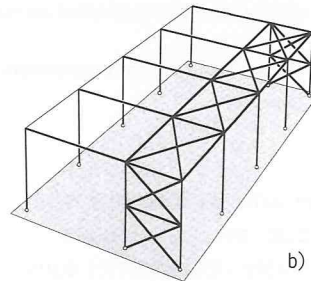
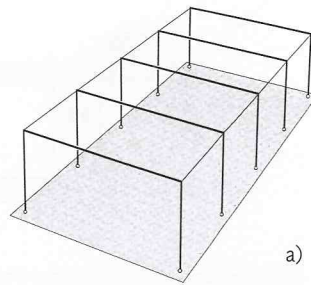


Fig. 18 : Stabilisation des poteaux de portique par contreventements longitudinaux de toiture

Pour lutter contre ses trois phénomènes, deux solutions :
 - augmenter la section des barres ;
 - diminuer leur longueur libre.

En plus de leurs fonctions de transmission des charges horizontales aux fondations et de limitation des déformations, les contreventements, qu'ils soient verticaux ou horizontaux, peuvent avoir pour rôle complémentaire la création d'appuis, dits « points fixes », nécessaires à la stabilisation d'éléments porteurs comprimés. Pour un portique sollicité dans son plan (fig. 18) la création d'un point fixe de stabilisation latérale au moyen d'un contreventement longitudinal de toiture modifie de façon importante la longueur de flambement des poteaux, donc la charge que peut supporter le portique.

Hors du plan du portique, la création d'appuis au moyen du contreventement transversal de toiture (fig. 17.c) permet d'augmenter la résistance au déversement de la traverse ; au moyen des contreventements verticaux du long-pan (les palées de stabilité) on réalise des points fixes qui réduisent la longueur de flambement des poteaux selon leur axe de faible inertie (cf. fig. 17.b). Il est important de rappeler la nécessité de la liaison entre l'élément stabilisé (le portique) et l'élément stabilisateur (le contreventement). Cette liaison est réalisée en toiture par les pannes et en long-pan par les lisses.