

3 LA CONCEPTION GÉNÉRALE DE LA STRUCTURE

L'architecte

La détermination, la hiérarchisation et la résolution des contraintes techniques s'effectuent en fonction des contraintes liées au programme et d'un choix architectural déterminé par l'architecte avec l'ingénieur. La conception originelle d'un projet, fonctionnelle et esthétique, doit nécessairement intégrer une réflexion sur le type de structure envisagé. Tout au long du processus de conception, l'architecte travaille généralement en collaboration avec un bureau d'études ou des ingénieurs-conseil spécialisés dans un domaine (structure, thermique, acoustique...).

Le bureau d'études

Le travail de l'ingénieur spécialisé en structures métalliques consiste à déterminer et établir, en relation suivie avec l'architecte :

- les efforts ou actions qui s'appliquent à la structure ;
- la stabilité de l'ouvrage mais aussi la forme structurelle optimale de l'ouvrage. Le choix du matériau de structure est également effectué à ce moment ;
- les réactions aux appuis qui découlent des actions exercées. La descente de charges constitue le document de synthèse de ce travail ;
- les sections requises pour chaque partie de l'ossature de manière à assurer la sécurité de la structure. La question de l'assemblage est également développée. Plusieurs combinaisons d'efforts ou cas de charges sont envisagées. La note de calcul est le document qui rassemble ces éléments.

Les bureaux de contrôle interviennent pour vérifier les plans et les documents présentés par l'architecte et le bureau d'études.

L'entreprise

Dès lors que l'appel d'offre est lancé sur la base de l'avant-projet détaillé (APD), la consultation des entreprises se fait auprès d'une entreprise générale ou en lots séparés. Les études de l'entreprise de construction métallique concernent la structure qui va être réellement construite, en passant par la préparation du travail dans les ateliers de fabrication, la phase intermédiaire de montage pour finir à la structure dans son positionnement final. À noter que la fabrication ne commence qu'après les études d'exécution et les approvisionnements, et qu'elle nécessite la coordination de deux plannings :

- le planning général de construction du chantier, connu et maîtrisé par l'architecte et la maîtrise d'œuvre dans son ensemble ;
- le planning de l'atelier de fabrication, généralement inconnu de la maîtrise d'œuvre, qui concerne l'ensemble des travaux à destination de divers chantiers. Il y a donc un délai à prendre en compte entre le lancement des études pour l'entreprise et le montage. Par la suite, la phase de montage est la plupart du temps très rapide.

Montage de la structure acier d'un immeuble de bureaux. Campus Verrazano à Lyon. Sud Architectes.



Les efforts appliqués à la structure

Les structures en acier qui assurent la stabilité d'un bâtiment reprennent des charges liées à trois composantes d'un bâtiment :

- sa composition : les charges permanentes ;
- sa localisation : les surcharges climatiques et sismiques éventuelles ;
- son type d'utilisation : les charges d'exploitation.

Il existe une grande diversité de règles et de normes relatives aux actions exercées sur les structures de bâtiment. L'Eurocode 1 règlemente les actions qui sont appliquées aux structures.

Charges permanentes

Elles comprennent le poids propre de la structure, le poids des planchers, le poids des parois intérieures – minces et épaisses – le poids des façades, le poids de la couverture, de l'étanchéité...

Poids surfacique de divers éléments

Éléments de structure en acier (<i>par niveau</i>)	30/60	daN/m ²
Charpente métallique (<i>fermes, pannes, chevrons</i>)	20/40	daN/m ²
Couverture acier inoxydable (<i>compris voligeage, lattis, feuillure</i>)	25	daN/m ²
Couverture tôle ondulée galvanisée (<i>compris voligeage</i>)	15/20	daN/m ²
Panneaux sandwich	12/15	daN/m ²
Bardage simple peau	8/10	daN/m ²
Bardage double peau	20/25	daN/m ²
Structure secondaire	8/10	daN/m ²
Bac acier (matériau seul)	8/10	daN/m ²
Cloisons	10/20	daN/m ²

Charges occasionnelles

Il y a aussi d'autres types d'actions occasionnelles ou accidentelles :

- les actions de nature géologique (séisme, poussée des terres) ;
- les chocs accidentels ;
- les déplacements imposés, les tassements d'appui ;
- les efforts de précontrainte ou de dilatation ;
- les charges liées à des phases provisoires de montage ;
- les actions liées à l'incendie déclenchées de manière accidentelle, etc.

L'ensemble de ces actions est évalué et pris en compte par les bureaux d'études techniques. L'entreprise en tient également compte lors de la phase chantier.

Charges climatiques

Le vent

D'après les règles NV65/99, La France est divisée en quatre régions plus ou moins ventées. Les paramètres à incorporer au calcul de la charge surfacique exercée par le vent sont l'effet de site (site protégé, normal, exposé), l'effet de masque, l'effet des dimensions. On distingue par la suite les actions exercées à l'extérieur du bâtiment, puis les actions exercées de l'intérieur. La forme de la toiture, l'effet de rive, le fait que le bâtiment soit ouvert ou fermé et le fait qu'il y ait des décrochements en élévation ou en plan influent également sur la valeur à prendre en compte localement. Pour les formes complexes, on procède à des essais en soufflerie avec des modèles réduits. Les résultats obtenus permettent de faire des extrapolations sur le modèle réel.

Les règles NV 65/99 seront remplacées à terme dans les Eurocodes par l'EN 1991-1-4 (actuellement ENV 1991-2-4).

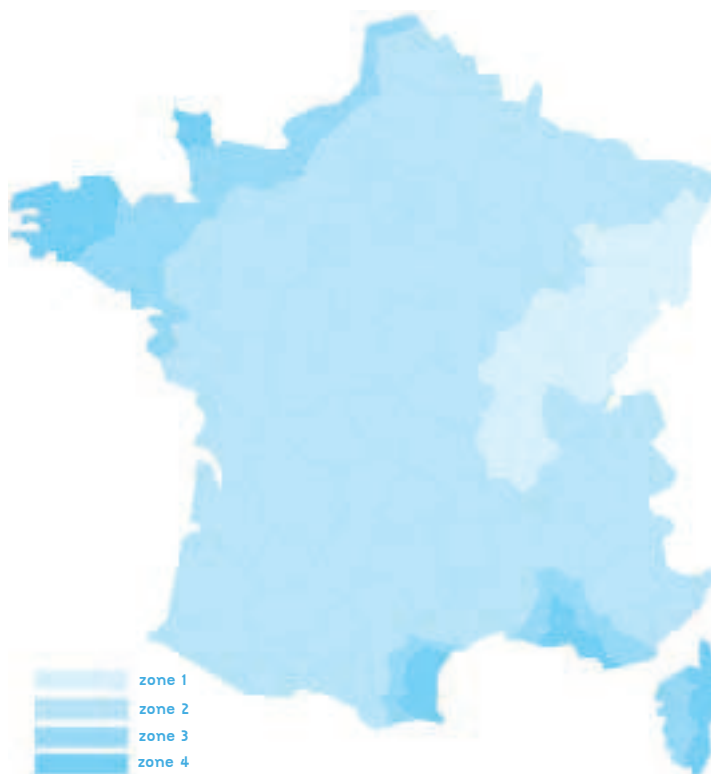
Vent – Carte des pressions dynamiques à prendre en compte suivant les régions de France, définies par la norme NV 65/99 (entre parenthèses les valeurs pour les sites exposés) :

Zone 1 : 50 daN/m² (67,5 daN/m²)

Zone 2 : 60 daN/m² (78 daN/m²)

Zone 3 : 75 daN/m² (93,8 daN/m²)

Zone 4 : 90 daN/m² (108 daN/m²)



La neige

Selon les règles Neige et Vent NV65/99 et les règles N84/95 pour les marchés publics, la charge surfacique de base de la neige varie suivant six zones géographiques. L'altitude et la pente des toitures influent également sur la valeur à prendre en compte.

Les règles N84 et NV 65 seront remplacées à terme dans les Eurocodes par l'EN 1991-1-3 (actuellement ENV 1991-2-3).

Neige – Carte des charges de neige à prendre en compte suivant les régions de France, définies par la norme NV 65/99 (entre parenthèses les valeurs pour les surcharges extrêmes et les charges accidentelles) :

Zone A : 35 daN/m² (60)

Zone B : 35 daN/m² (60 et 80)

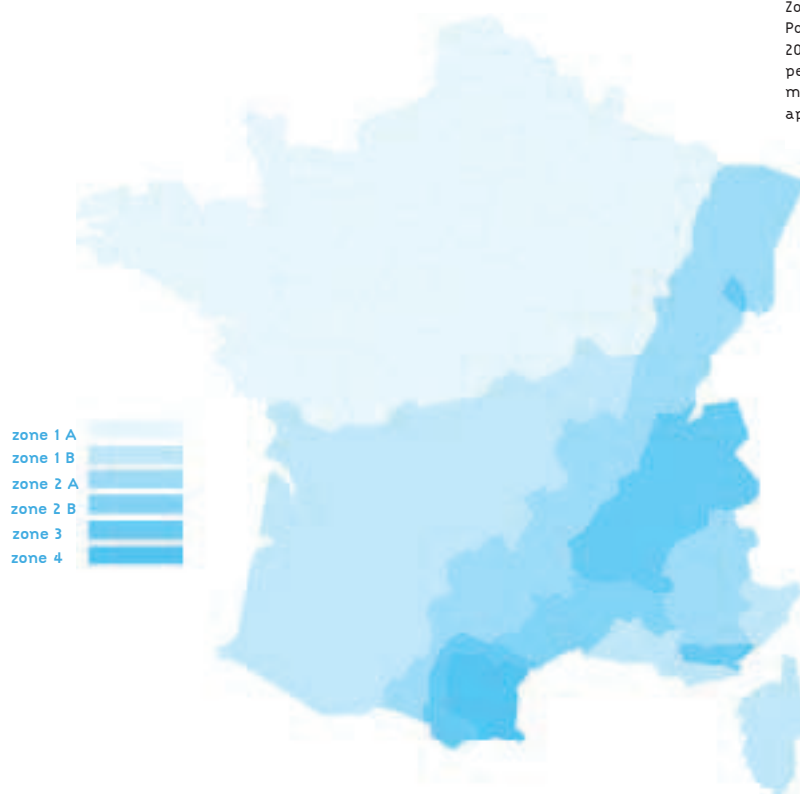
Zone 2 A : 45 daN/m² (75 et 80)

Zone 2 B : 45 daN/m² (75 et 108)

Zone 3 : 55 daN/m² (90 et 108)

Zone 4 : 80 daN/m² (130 et 144)

Pour des altitudes comprises entre 200 et 2000 m, les valeurs de base peuvent être majorées. D'importantes majorations doivent aussi être appliquées en montagne.



Surcharges d'exploitation

Les surcharges dites d'exploitation ou d'utilisation sont évaluées en fonction :

- du poids des personnes ;
- du poids du mobilier et des cloisonnements spécifiques ;
- des véhicules et de leur mouvement (dans le cas de parkings en super-structure, des ponts...).

Ces charges ou ces surcharges produisent des forces qui se traduisent en actions sur la structure. Elles peuvent être concentrées ou uniformément réparties. Les valeurs des charges à prendre en compte sont déterminées à partir de la norme NF P 06-001. Elle sera remplacée à terme dans l'Eurocode par l'EN 1991-1-1 (actuellement ENV 1991-2-1).

Surcharges d'exploitation uniformes

Logements	150	daN/m ²
Bureaux	250	daN/m ²
Bâtiments scolaires (salles de classe)	250	daN/m ²
Bâtiments hospitaliers et dispensaires (chambres)	150	daN/m ²
Archives	500	daN/m ²
Bâtiments à usage sportif	500	daN/m ²
Bâtiments à usage sportif (places debout)	600	daN/m ²
Bâtiments industriels	300/500	daN/m ²
Escaliers et passerelles dans locaux industriels	200	daN/m ²
Parkings	250	daN/m ²

La stabilité de l'ouvrage

L'équilibre

L'équilibre définit un état et une position de la structure où l'ensemble des forces qui sont appliquées se composent de manière à ce que la force résultante soit nulle. On distingue les actions qui sont les efforts exercés sur la structure, des réactions qui sont les efforts exercés par les appuis sur la structure. La résultante des actions et celle des réactions doivent s'équilibrer, tant du point de vue des forces que de celui des moments.

L'équilibre peut être stable ou instable. Dans le cas d'un équilibre stable, une modification légère des actions exercées sur la structure entraîne un changement temporaire de la position de la structure, mais celle-ci tend à revenir vers sa position initiale. C'est ce type d'équilibre qui concerne la conception de structure.

Les liaisons entre éléments

Une partie d'une structure donnée est toujours reliée avec un ou plusieurs autres éléments, que ce soit une autre partie de la structure ou le sol. Les conditions de liaison (ou d'appui) définissent les mouvements bloqués et par là même les réactions qui peuvent apparaître. Il y a six degrés de liberté pour une extrémité de barre dans l'espace : trois degrés de translation et trois degrés de rotation. Dans le plan, il y a trois degrés de liberté, deux de translation et une de rotation.

Parmi les nombreux types de liaison entre les éléments constructifs, on peut distinguer trois grandes familles.

L'appui simple

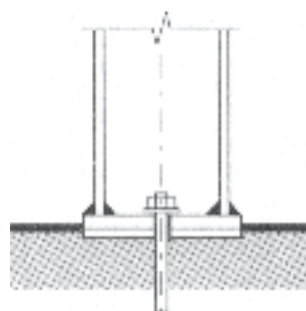
Ce type d'appui bloque une translation suivant une direction et n'admet donc que des charges suivant cette direction. Le cas le plus classique est la poutre ou le poteau qui repose sur une maçonnerie avec interposition d'une semelle ou d'un sommier de répartition. L'appui peut comporter une possibilité de glissement pour prendre en compte la dilatation (tels que des rouleaux). Ce type d'appui est couramment utilisé dans les ponts de grande portée.

L'articulation ou la rotule

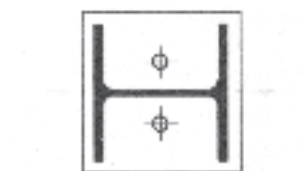
Dans le plan, l'articulation bloque les deux translations possibles et autorise la rotation. L'élément peut pivoter autour d'un axe. L'articulation exerce donc une force de réaction qui est composante de deux vecteurs parallèles aux deux translations bloquées. Dans l'espace, la rotule cylindrique permet une rotation autour d'un seul axe, les cinq autres degrés de liberté sont bloqués. La rotule sphérique quant à elle permet les trois rotations, les trois translations étant bloquées. Elle est peu utilisée.



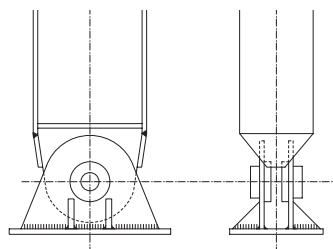
Appui simple à dilatation poutre sur poteau.

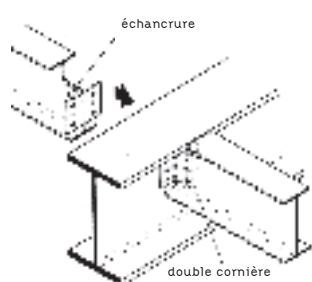


Pied de poteau articulé. Bien que la platine soit fixée par deux boulons, ce type d'appui est considéré comme articulé. Cf. Bibliographie [12, p.60].

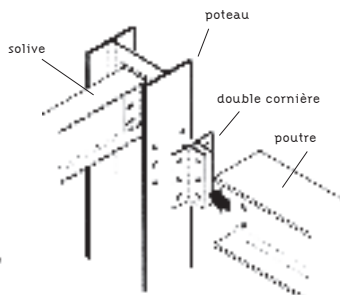


Appui articulé d'un poteau sur un massif en béton. L'articulation se fait au moyen d'une rotule.

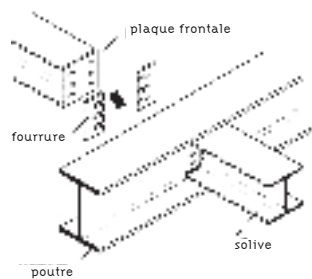




Assemblage articulé poutre-solive.

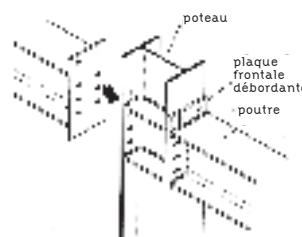


Assemblage articulé usuel poteau-poutre.



Assemblage rigide poutre-solive.

Cf. Bibliographie [12, p.139, 140 et 142].



Assemblage rigide usuel poteau-poutre.

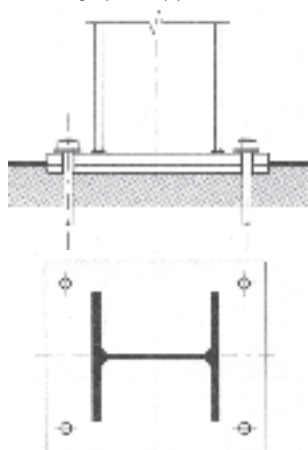
L'articulation simplifie le calcul des structures car elle empêche la transmission des moments de flexion (valeur nulle du moment à l'articulation), facilite leur montage et permet aux structures de mieux prendre en compte les petits mouvements (dilatations, tassements différentiels...). On classe dans la catégorie des articulations les appuis de poteaux de faible section comportant une semelle et deux boulons de scellement.

L'encastrement

L'encastrement que l'on appelle aussi « nœud rigide » interdit tout mouvement de translation ou de rotation au point d'appui. Une liaison par encastrement rend solidaire les éléments. Elle est plus efficace mais introduit des contraintes supplémentaires à prendre en compte. C'est le cas d'une poutre métallique scellée dans un massif en maçonnerie ou des assemblages par boulons (au moins quatre) ou soudures.

Pied de poteau encastré fixé par quatre boulons.

Cf. Bibliographie [12, p.60].



La stabilité dans le plan

Une fois l'équilibre et les liaisons définis, il est relativement aisé d'apprécier si une structure est stable ou non. Par la suite, il sera possible d'apprécier si les appuis de la structure sont absolument indispensables à la stabilité ou non.

Triangulation

En prenant le cas d'une structure articulée fermée à trois éléments, on est en équilibre et on remarque que « le triangle est indéformable » d'un point de vue géométrique. En soumettant un triangle articulé à ses trois nœuds à des efforts appliqués aux nœuds, il n'apparaît que des efforts de compression et de traction au sein des barres. Il n'y a pas de flexion parce que les nœuds sont articulés.

En prenant le cas de trois barres articulées entre elles et ouvertes, c'est-à-dire d'un cadre articulé, on peut dire sans le moindre calcul que la structure est instable. La triangulation est donc un moyen de stabiliser la structure et de rigidifier un plan.

Il existe d'autres moyens de rigidifier un cadre :

- la rigidification d'un ou plusieurs nœuds ;
- le remplissage du cadre articulé.

Structures isostatique et hyperstatique

Une structure est isostatique lorsqu'on a atteint le niveau minimal de degrés de liberté bloqués requis pour l'équilibre de la structure. En ajoutant un degré de liberté supplémentaire à une telle structure, on entraîne son instabilité. En renforçant au contraire ses conditions d'appui, c'est-à-dire en bloquant en fait un degré de liberté supplémentaire, on obtient une structure plus stable que l'on qualifie d'hyperstatique.

Plus généralement, une structure est isostatique s'il y a instabilité lorsqu'on articule un de ses éléments ou qu'on en enlève un. Les appuis et liaisons d'une structure isostatique se limitent alors aux seuls nécessaires. En revanche, s'il y a des appuis excédentaires, la structure est hyperstatique.

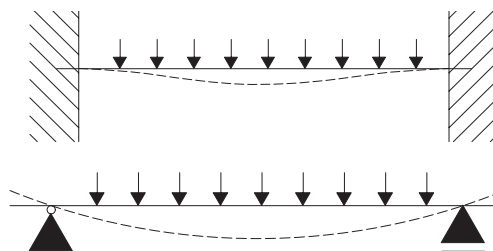
Cependant, en matière de structure, il n'y a pas de solution parfaite mais des solutions plus appropriées que d'autres en fonction des situations auxquelles il convient de répondre. La surabondance des liaisons rend le système hyperstatique plus rigide et plus tolérant à une redistribution des efforts en cas d'endommagement. En revanche, toute déformation dans sa géométrie – telles que celles liées aux dilatations thermiques, aux mouvements différentiels des appuis, etc. –, crée des contraintes supplémentaires qui se répercutent à l'intérieur du système et que celui-ci devra pouvoir prendre en compte. Les contraintes de montage peuvent aussi orienter le choix du système.

La stabilité dans l'espace - Contreventement

Assurer la stabilité d'une structure spatiale consiste à la rendre stable suivant au moins trois plans, dans deux directions non parallèles et suivant ses plans horizontaux. On cherche à faire transiter les efforts par des plans rigides pour les faire cheminer jusqu'aux appuis.

Parmi les différentes forces ou charges dynamiques qui transmettent des efforts horizontaux, on peut citer :

- le vent sur les façades ;
- les engins roulants ;
- les véhicules dans les parkings (les véhicules accélèrent et freinent, et génèrent par conséquent des efforts horizontaux) ;
- les séismes ;
- le feu.

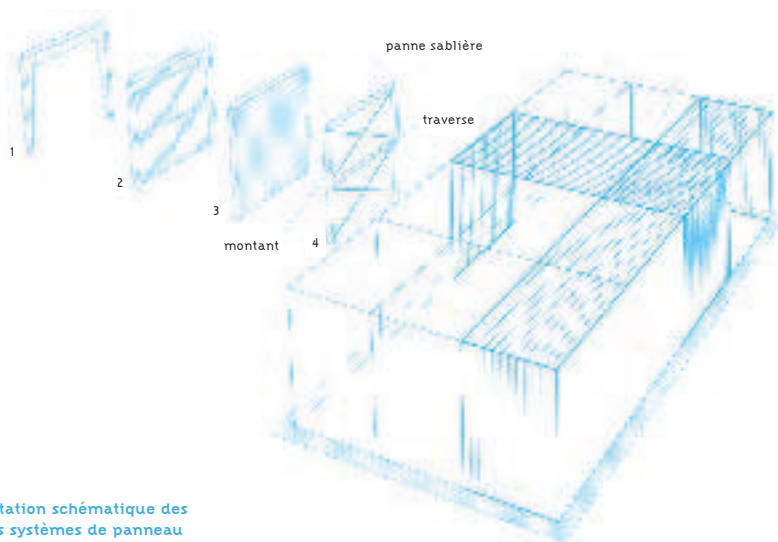


Systèmes isostatique et hyperstatique

Dans le cas courant d'une poutre uniformément chargée, la flèche d'une poutre encadrée à ses deux extrémités (système hyperstatique) est cinq fois plus faible que celle d'une poutre simplement posée sur ses appuis (système isostatique). Autrement dit, pour une même quantité de matière, le système hyperstatique est de loin le plus efficace.

Poutre triangulée dans un pont suspendu (ici le Golden Gate à San Francisco).





Représentation schématique des différents systèmes de panneau de contreventement :

On distingue quatre types de contreventement : en façades (long pan et pignon) et en toiture (longitudinal et transversal), représentés sur la figure principale. La rigidité en cisaillement est conférée à un panneau (de gauche à droite) par rigidification des nœuds de l'ossature pour créer un cadre portique (1), par un diaphragme en tôle d'acier (2), par un remplissage pour créer un voile en béton armé (3) ou par triangulation pour créer un contreventement en treillis (4). Cf. Bibliographie [12, p.68].

Contreventement par des croix de Saint-André. Foyer SNCF, Paris 12^e. Dubosc et Landowski architectes.



Du fait que le vent est l'action de type horizontal qui est la plupart du temps prépondérante, les dispositifs de stabilité sont aussi appelés dispositifs de contreventement. Si la question de la stabilité est en général très bien perçue pour ce qui concerne les charges ou actions verticales, il en va tout autrement pour ce qui est des charges horizontales.

En pratique, par mesure de sécurité, on prévoit toujours au moins deux dispositifs de contreventement dans deux plans verticaux non parallèles. Le contreventement vertical peut se faire par des voiles en béton armé ou par des palées de contreventement. Le contreventement horizontal est réalisé par les planchers, les toitures ou par des poutres au vent. Les contreventements verticaux doivent être situés impérativement à tous les étages de manière à permettre aux efforts horizontaux de redescendre jusqu'aux fondations. Cependant, ils ne sont pas nécessairement superposés.

En construction métallique, le dispositif de contreventement est en général réalisé par la stabilisation ou la rigidification de l'élément de base qui est le cadre articulé. Trois types de procédé permettent de rendre indéformable un cadre.

Le remplissage du cadre par un élément rigide dans son plan

Dans le cas d'un contreventement vertical, il peut s'agir d'un mur en béton ou en maçonnerie lié à la structure métallique. Dans le cas d'un contreventement horizontal, ceci peut correspondre à une dalle de plancher en béton.

La triangulation par des diagonales

L'installation dans un cadre d'une diagonale permet de le rigidifier. Pour assurer la stabilité du panneau dans les deux sens, il conviendra de tenir compte de la résistance à la compression de la diagonale (profil creux par exemple) ou de disposer une autre diagonale inversée dans le même panneau (contreventement en croix de Saint-André).

Toute forme de triangulation est admissible si les barres travaillant en compression résistent au flambement. Dans le cas d'un contreventement en croix de Saint-André, on peut utiliser des éléments plus fins travaillant en traction (câbles par exemple).

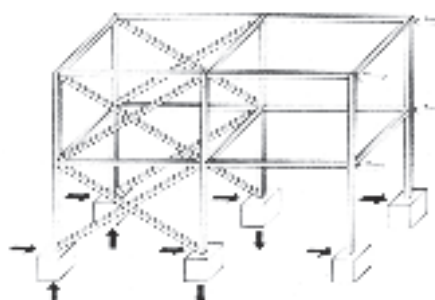
Par extension, lorsqu'une façade de bâtiment est soumise à un effort perpendiculaire de vent, elle n'offre en général pas de rigidité hors de son propre plan. C'est donc par le biais de structures secondaires, horizontales ou verticales, souvent en treillis que l'on appelle poutres au vent, que l'on retransmet cet effort aux plans rigides de contreventement.

La rigidification d'un ou plusieurs nœuds

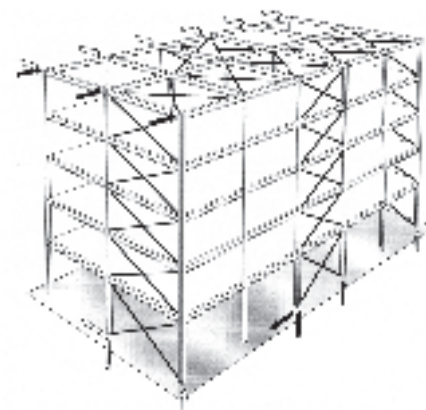
Cette option est utilisée pour les contreventements verticaux. On parle alors d'un portique, assemblage rigide de deux poteaux et d'une poutre (voir chapitre 4).

Un exemple de rigidification consiste à mettre en place sur des étages superposés des « portiques multiples ». L'utilisation de goussets ou de demi-triangulations permet de rigidifier les assemblages.

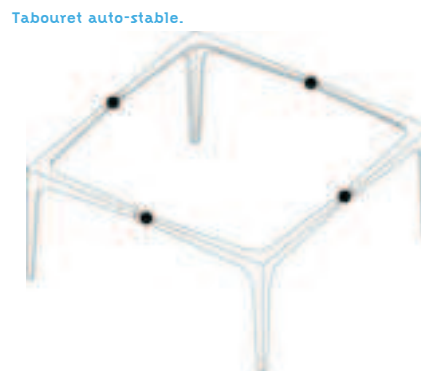
Une structure spatiale intéressante à nœuds rigides est le tabouret, élément auto-stable d'ossature constitué de quatre poteaux et de quatre poutres sur un étage. Des tabourets peuvent être superposés sur plusieurs étages.



Système de stabilité. Les treillis sont constitués de barres qui forment des triangles. Les axes des barres concourantes au même nœud doivent se couper en un seul point. Cf. Bibliographie [10, p.228].

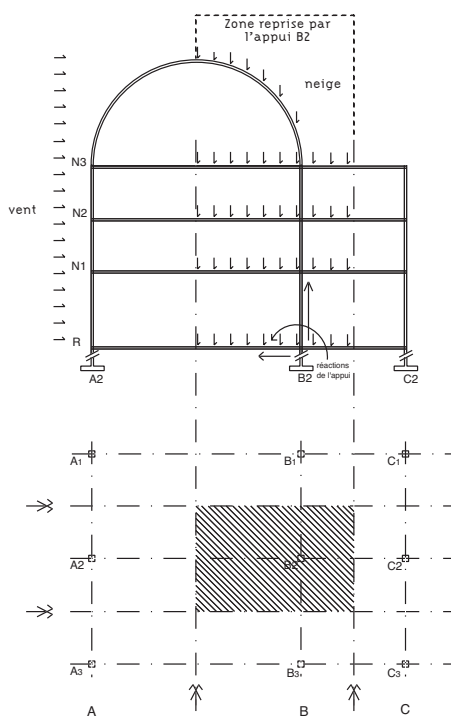


Stabilité par des palées de contreventements verticales et horizontales. Cf. Bibliographie [12, p.117].



Tabouret auto-stable.

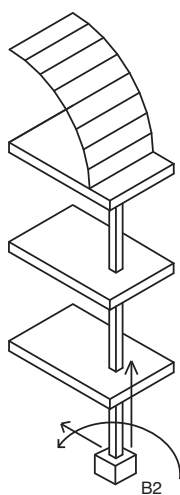
La descente de charges



La descente de charges

On rappelle que les actions sont les forces et couples liés aux charges exercées sur la construction. Les réactions sont les efforts qui apparaissent au niveau des appuis pour assurer l'équilibre et les sollicitations sont les efforts internes qui sollicitent la structure.

Une descente de charges consiste à évaluer toutes les forces qui transitent dans la structure porteuse du bâtiment, jusqu'au niveau des appuis et des fondations. À ce niveau, les appuis ont des degrés de liberté qui sont bloqués et qui génèrent donc des réactions. Les équations de l'équilibre des forces et des moments permettent de déterminer les réactions lorsque la structure est isostatique.



Exemple :

La structure verticale B2 prend les charges des planchers et de la couverture suivant la surface délimitée autour de B2 (en hachuré sur le dessin). Ces charges comprennent le poids propre des structures primaires et secondaires dans ce quadrilatère, les charges d'exploitation, le poids de la neige, les efforts au vent transmis horizontalement et verticalement. Les autres structures verticales A, B1, B3 et C se répartiront le reste des charges, auquel s'ajoutera le poids de la façade. L'appui étant encastré, il reprend les charges horizontales du vent compte tenu du bras de levier entre la résultante de ces efforts et l'appui. On notera qu'il apparaît un moment fléchissant au droit de l'appui. Les réactions aux appuis ou encore les efforts cumulés au niveau de l'assise du bâtiment permettront de déterminer les dimensions des fondations.

La note de calcul

Les règles et normes de conception et de calcul en France appliquées actuellement à l'étude des projets de construction en acier sont les règles CM66 et leur additif de 1980. La nouvelle réglementation européenne des Eurocodes est aujourd'hui également applicable, complétée par les Documents d'application nationale (DAN) qui en précisent les paramètres.

Une fois que les différentes actions susceptibles de s'appliquer sont déterminées, la réglementation prévoit un certain nombre de combinaisons d'actions. En outre, les actions sont multipliées par des coefficients de pondération. Ceux-ci sont en général supérieurs ou égaux à 1. Des coefficients sont également appliqués aux valeurs de résistance des matériaux. Par ce moyen sont pris en compte :

- la possibilité que les actions aient des valeurs plus défavorables que les valeurs caractéristiques calculées ;
- les imperfections dans la réalisation des structures ;
- les incertitudes sur la résistance des matériaux...

Les Eurocodes font l'objet de plusieurs chapitres :

- l'Eurocode 1 définit les bases de calcul et les actions sur les structures ;
- l'Eurocode 2 fournit les règles de vérification des structures en béton ;
- l'Eurocode 3 fournit les règles de vérification des structures en acier ;
- l'Eurocode 4 fournit les règles de vérification des structures mixtes acier-béton ;
- les Eurocodes 5 à 9 fournissent respectivement les règles pour les constructions en bois, en maçonnerie, les fondations, les constructions parasismiques et les constructions en alliage d'aluminium.

État limite ultime (ELU)

Cet ensemble de combinaisons est destiné à assurer la sécurité de la construction. L'état limite ultime est atteint dans les cas suivants :

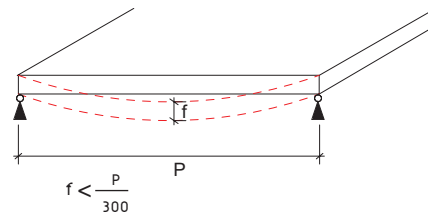
- perte d'équilibre de la structure ;
- formation pour tout ou partie de la structure d'un mécanisme de ruine ;
- instabilité de forme ;
- rupture d'un élément ;
- déformation plastiques excessives.

Pour cet état limite on procède à une vérification relative aux contraintes : la stabilité d'ensemble doit être vérifiée sous l'effet des combinaisons les plus défavorables des actions pondérées ; dans chaque élément, les contraintes maximales pondérées doivent être inférieures à celles qui provoquent la ruine de l'élément.

État limite de service (ELS)

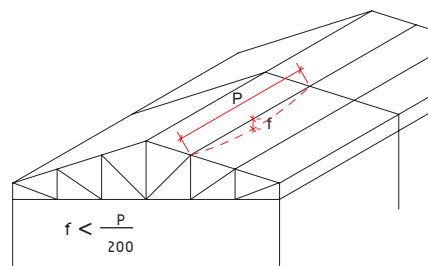
L'état limite de service est atteint lorsqu'une structure devient inapte aux fonctions normales pour lesquelles elle est conçue, en particulier lorsque des déformations excessives apparaissent. On procède donc à des vérifications relatives aux déformations où, sauf cas exceptionnel, les actions ne sont pas pondérées.

Les déformations de flexion sont en général déterminantes pour le dimensionnement de la structure. Ces critères imposent un surdimensionnement des structures par rapport à ce qui serait nécessaire pour simplement reprendre les charges.



Flèche d'un plancher

S'agissant des planchers courants pour les logements ou bureaux, la flèche due à la totalité des charges (voire uniquement des surcharges d'exploitation s'il y a contre-flèche) ne devra pas dépasser les $1/300^e$.



Flèche d'une panne de couverture

Pour les éléments de couverture, la flèche due aux charges permanentes et aux autres charges ne doit pas être supérieure au $1/200^e$ de la portée (soit 20 mm pour une panne de couverture d'une portée de 4 m).