

CONTREVENTER UNE STRUCTURE

1. Généralités

Exemple : pavillon "africain" au parc du Cinquantenaire à Bruxelles (date d'avant 1976). Une faible charge (toiture) est répartie sur d'assez nombreux points d'appui (6), eux-mêmes assez résistants (des troncs !). Tout cela est donc assez peu sollicité par le poids propre, et ne présente aucun risque de s'effondrer sous cette charge. Par contre, pratiquement rien n'était prévu pour contrer une charge horizontale telle que le vent (ou le vandalisme ?). Résultat : un déplacement important et un risque d'effondrement, qui ont obligé à empêcher l'usage du pavillon... Dommage !



Figure 1.1.ⁱ

Il faut donc se souvenir qu'à côté des charges de poids propre et d'exploitation, qui sont verticales, un bâtiment est également soumis à des charges horizontales. Il s'agit principalement du vent, bien sûr.

Remarque : plus un bâtiment est haut, plus les efforts de vent qui s'y appliquent sont importants, et donc plus le contreventement prend de place dans la conception structurale. On

ne verra ici que le cas des bâtiments ordinaires, en renvoyant vers d'autres sources pour le cas particulier des tours et immeubles hauts.

La charge de vent est aussi particulièrement critique en phase de chantier, lorsque toute la structure n'a pas été encore montée : "Durant la construction, à moins que l'ossature du bâtiment fournisse le contreventement via la rigidité de ses nœuds, il est essentiel qu'un contreventement temporaire soit fourni jusqu'à ce que le système de contreventement définitif ait été construit et soit capable de reprendre des charges ; sinon, les efforts du vent sur l'ossature non cloisonnée, et en particulier les forces de traînage ("*drag forces*") sur n'importe quel élément de dalle, pourraient être suffisants pour causer un écroulement complet de la structure. Le contreventement temporaire prend généralement la forme de câbles en acier"¹ [voir le point "Croix de Saint-André" plus loin].



Figure 1.2.ⁱⁱ

Mais des charges horizontales peuvent également être générées par :

- les séismes (en Belgique, il faut en tenir compte dans les régions de Liège et Mons) ;
- les accidents ;
- sur un pont, le freinage et l'accélération des véhicules.

¹ (Hilson, 1993) (traduction personnelle), p. 27.

Une structure doit donc disposer d'éléments structuraux qui permettent de reprendre ce type d'effort. Ces éléments composent le *contreventement*² de la structure. Dans la structure finale, ces éléments de contreventement peuvent être combinés avec la structure principale destinée aux charges verticales, ou former un ensemble distinct d'éléments structuraux, qui se rajoute à la première.

En réalité, le contreventement présente encore 2 autres enjeux.

Tout d'abord, comme il est souvent positionné entre autres dans les plans de façade, il interagit, sur le plan architectural, avec les intentions concernant les élévations du bâtiment.

Exemple : centre John Hancock à Chicago (SOM, 1969), haut de 100 étages.



Figure 1.3.ⁱⁱⁱ

Ensuite, le contreventement sert également à assurer un fonctionnement efficace des colonnes. En effet, il assure que les appuis haut et bas d'une colonne ne puissent se déplacer latéralement l'un par rapport à l'autre. Cela modifie fondamentalement le comportement des colonnes au flambement, et améliore grandement leur résistance à ce phénomène. Par conséquent, les colonnes dans une structure contreventée nécessitent moins de matière, et encomrent moins l'espace. Cela est illustré dans le tableau suivant, qui compare systématiquement le cas sans contreventement (et donc sans déplacement latéral possible entre les appuis d'une colonne) et avec contreventement, au travers du facteur μ [1] qui

² Angl. : *windbracing*. Néerl. : *het windverband* ; une structure contreventée est dite *windstijf*. Attention à la confusion terminologique fréquente : le contreventement est à distinguer de "la reprise du vent par une façade (perpendiculairement à sa surface)". En effet, celle-ci concerne plutôt la résistance de la façade en flexion sous l'action du vent (comparable à une dalle sous charges fixes), qui se ramène donc à la fonction "soutenir un praticable".

représente la longueur de flambement de la colonne (à minimiser, cf. cours sur le flambement) : $L_{fl} = \mu L [m]$ avec $L [m]$ la hauteur de la colonne (voir page suivante).

Le matériau structural fait également sentir son influence dans le domaine du contreventement : en effet, tout ce qui suit suppose à la structure une résistance en traction. Ce n'est *a priori* pas le cas pour notamment la maçonnerie, qu'il faut armer par ailleurs à cet effet. À l'inverse, le béton armé a amené cette résistance à la traction, ce qui a révolutionné l'architecture "minérale" : "Le premier sens du monolithisme [du béton armé] est celui de la résistance à la traction [on pourrait rajouter sans doute l'encastrement des nœuds] ajoutée à la résistance propre du béton à la compression par son union intime avec l'acier, créant ainsi une matière pierreuse-ferreuse échappant aux vicissitudes des constructions maçonnées astreintes aux lois d'une statique de la compression pure dans chacun des joints constructifs qui la morcellent. Il s'agit donc là d'une notion statique dont les conséquences formelles sont immenses."³

En pratique, imaginons à présent une simple ossature en cube. On pourrait bien sûr contreventer les six faces du cube, et on serait sûr qu'il est contreventé. Mais on pressent qu'en fait il n'est pas nécessaire de contreventer toutes les faces pour obtenir le même résultat. C'est intéressant pour avoir plus de liberté dans la composition architecturale de ces faces. Mais quel est exactement le nombre minimum de faces qu'il faut contreventer ? C'est ce que nous étudions au point suivant.

Ensuite, nous passerons en revue les différents dispositifs structuraux permettant de contreventer une face de ce "cube", soit une maille structurale. Enfin sera abordée la répartition du contreventement au sein d'une structure complète.

³ CÊTRE Jean-Pierre, "La colonne du Musée des Travaux Publics de Perret", in (Gargiani, 2008), p. 420.

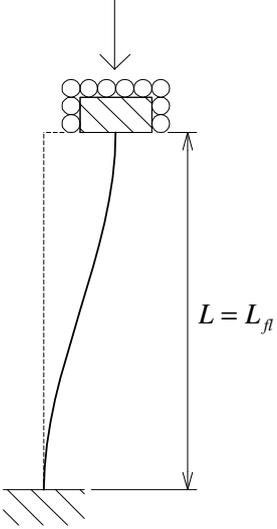
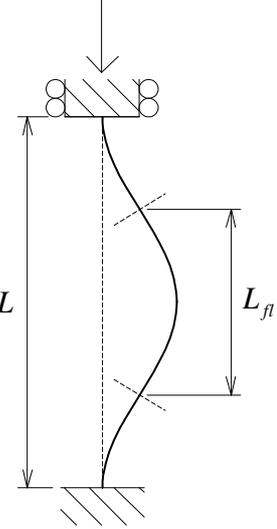
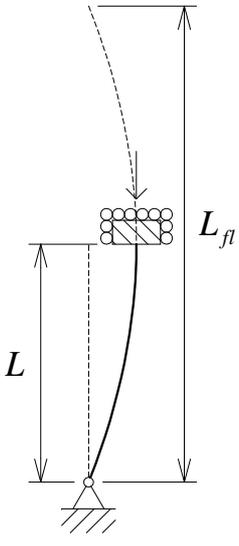
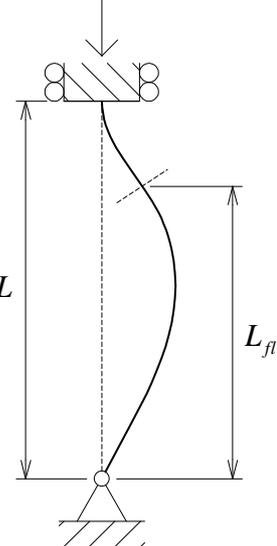
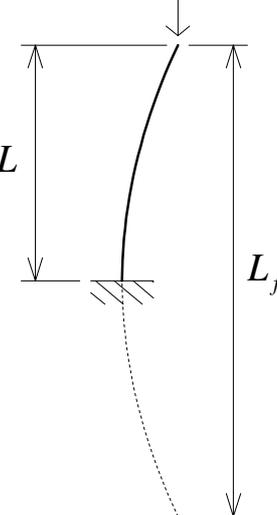
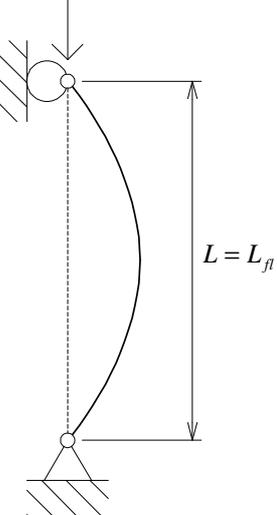
conditions d'appui	sans contreventement	avec contreventement
bi-encastree	 <p>$L = L_{fl}$</p> <p>$\mu = 1 [l]$</p>	 <p>$\mu = 0,5 [l]$</p>
articulee - encastree	 <p>$\mu = 2 [l]$</p>	 <p>$\mu \approx 0,7 [l]$</p>
"configuration minimale"	 <p>$\mu = 2 [l]$</p>	 <p>$L = L_{fl}$</p> <p>$\mu = 1 [l]$</p>

Tableau 1.4.

2. Disposition sur un "cube"

Considérons une maille d'ossature parallélépipédique. Combien de faces faut-il contreventer pour que la maille devienne stable ? On peut remarquer qu'en fait, dans une structure réelle, 2 mailles sont déjà potentiellement contreventées :

- la maille inférieure : les 4 "pieds" correspondent soit à des fondations censées être fixes en translation verticale comme horizontale, soit à un appui sur l'étage du dessous, qui est censé être contreventé aussi.
- la maille supérieure : en effet, on a souvent (mais pas toujours) une dalle de sol pour l'étage du dessus, ou comme toit plat. S'il s'agit d'une dalle en béton armé, elle est rigide dans son plan et donc contreventée (voir point "Diaphragme" plus loin).

Il reste alors les 4 mailles latérales. La question est alors : combien de plans verticaux de contreventement faut-il rajouter pour que la maille devienne stable ?

Comme un élément de contreventement n'est en mesure de stabiliser que dans son propre plan, "un seul voile dans une structure n'apporte pas de stabilité générale.

À première vue, disposer 2 voiles à angle droit pourrait sembler offrir une solution générale : chaque voile fournit la résistance aux forces appliquée dans l'une de ses directions principales.

[Remarque : les 2 plans ne doivent pas nécessairement être perpendiculaires l'un à l'autre, ça marche aussi avec un autre angle, mais évidemment de moins en moins bien à mesure que les éléments sont plus alignés l'un sur l'autre.]

Cependant, si ces forces sont appliquées à la dalle de toit à l'extrémité éloignée de l'un de ces murs, on observe que des déplacements torsionnels surviennent, comme montré à la figure [ci-contre], et du coup la structure dépendra pour sa stabilité de la rigidité torsionnelle du "L" formé par les deux murs.

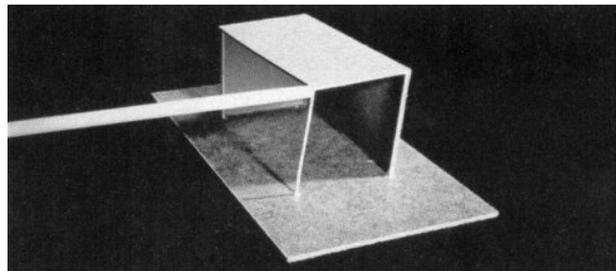
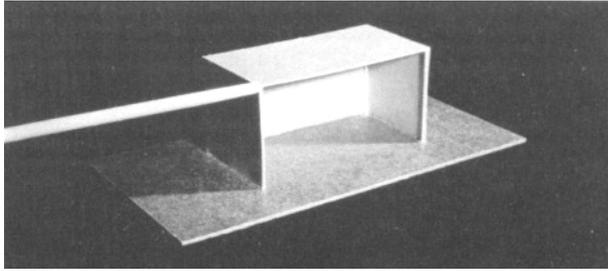


Figure 2.1.^{iv}

C'est généralement peu fiable, spécialement avec une section ouverte telle qu'une forme en L.

Ajouter un 3^e voile assure que quand un moment résulte d'une charge appliquée parallèlement à mais décalée par rapport à la ligne de résistance de l'un des murs de refend, les deux voiles restants [en conjonction avec les mailles supérieure et inférieure] procurent un couple résistant, donnant ainsi de la stabilité à la dalle de toiture et éliminant les effets torsionnels sur l'assemblage de refends. C'est illustré à la figure [suivante].

Figure 2.2.^v

cela découle du fait qu'un mur de refend ne peut reprendre efficacement une charge que dans son propre plan, et si tous les murs étaient parallèles entre eux, alors il n'y aurait pas d'élément disponible pour reprendre une charge appliquée perpendiculairement à la direction des murs. C'est le cas quel que soit le nombre de murs parallèles en présence.

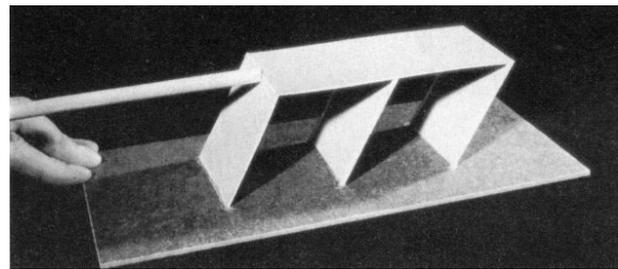
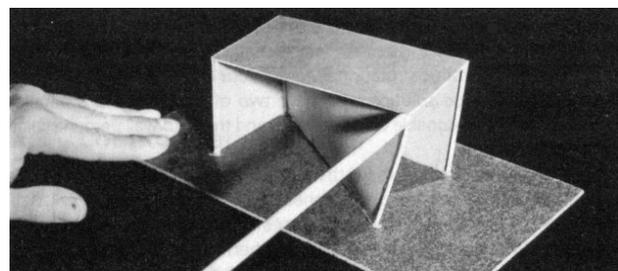
De même, les lignes de résistance, c'est-à-dire les sommets des plans contenant les murs de refend, ne doivent pas se joindre en un point. Si c'était le cas, alors n'importe quelle charge appliquée ailleurs qu'à l'intersection engendrerait la rotation de la dalle de toiture, puisque qu'aucun de ces murs ne pourrait fournir un moment résistant autour du point d'intersection. Ce type de comportement est illustré à la figure [ci-contre].

Même si les lignes de résistance s'intersectent presque en un point, les forces résultantes sur les murs, pour produire l'équilibre rotationnel de la dalle de toiture, seraient énormes. Une bonne solution consiste à avoir deux voiles parallèles, à une distance raisonnable l'un de l'autre, et le 3^e mur perpendiculaire aux deux autres.

Les conditions minimales pour la stabilité dans le plan de la dalle de toiture peuvent dès lors être résumées comme : 3 murs de refend qui ne sont pas tous parallèles, et dont les lignes de résistance ne s'intersectent pas en un même point."⁴

⁴ (Hilson, 1993) (traduction personnelle), pp. 19-23.

On peut donc observer qu'une condition de base pour la stabilité est de mettre en place 3 murs de refend à chaque étage d'une structure. Cependant, il y a des contraintes quant au positionnement de ces murs. Par exemple, les 3 murs de refend ne doivent pas être tous parallèles ;

Figure 2.3.^{vi}Figure 2.4.^{vii}

On peut faire l'analogie avec une poutre isostatique : pour être stable, celle-ci a également besoin de 2 réactions perpendiculaires d'un côté, et une verticale de l'autre, soit 3 non parallèles ni concourantes.⁵

En généralisant, on peut dire qu'une maille quadrangulaire a besoin d'avoir 5 faces contreventées sur 6 pour être stable face aux charges latérales⁶.

⁵ (Hilson, 1993), pp. 19-23.

⁶ Voir aussi la vidéo réalisée par Denis Delpire : www.youtube.com/watch?v=REPt51YIaiU.

3. Dispositifs de contreventement d'une maille structurale

3.1. Généralités

Au point précédent, les contreventements étaient supposés réalisés par des murs-diaphragmes, tout comme ce qui se passait dans les faces inférieure et supérieure avec les dalles. Mais en fait, pour réaliser un contreventement dans un plan, il existe d'autres possibilités qu'un mur :

- insérer des croix ;
- insérer des diagonales ;
- encastrer les nœuds ;
- incliner les colonnes.

Explorons-les.

3.2. Diaphragmes

3.2.1. Principe

Conceptuellement, en cas de sollicitation latérale transmise dans son plan à une paroi rigide, dans cette dernière vont s'activer les deux diagonales (à condition que les coins de la plaque soient effectivement fixés au reste de la structure) : une en compression et une en traction, qui vont ramener cette charge vers les fondations et donc contribuer au contreventement.

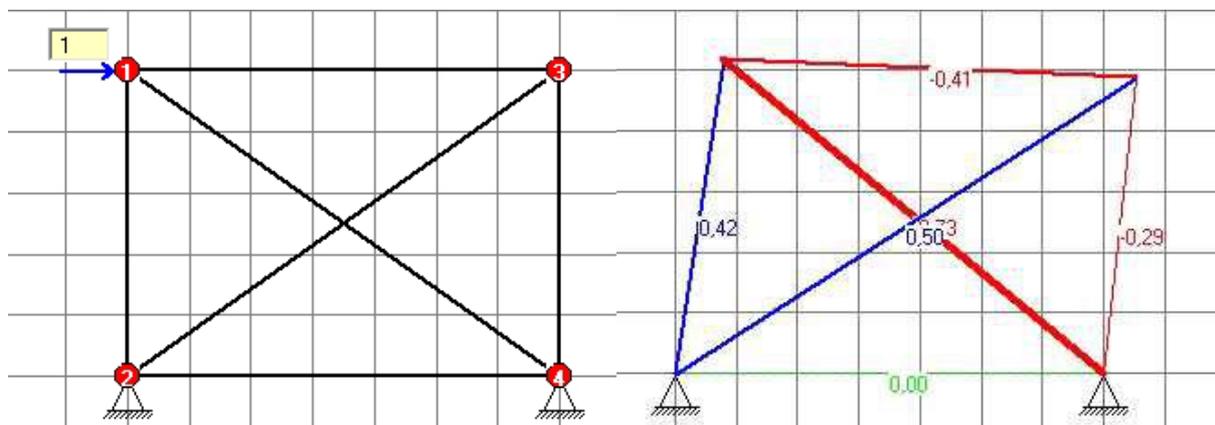


Figure 3.2.1.1.

Où trouve-t-on de tels plans rigides dans la structure d'un bâtiment ? Certains éléments structuraux déjà présents peuvent jouer ce rôle, ce qui est intéressant en termes de conjonction de fonctions au sein d'un seul et même élément. Par contre, quelques conditions doivent être remplies : l'élément doit être suffisamment rigide dans son plan, et fixés (aussi en traction) aux 4 coins.

À défaut d'une capacité de résistance en traction (du fait du matériau ou d'un manque d'ancrage aux 4 coins), seule la diagonale en compression sera effective.

Exemple : maison traditionnelle à Liège. L'ossature en pierre est remplie de maçonnerie (qui ne dispose pas d'une résistance en traction significative). C'est en quelque sorte l'inverse de la croix de câbles (voir plus loin).



Figure 3.2.1.2.^{viii}

Listons quelques possibilités courantes d'éléments structuraux qui peuvent agir en tant que diaphragme :

- les dalles et toits plats. Mais par exemple un simple plancher posé sur poutres n'aura pas la rigidité suffisante ; pour cela, il faut lui adjoindre des plaques (par exemple d'OSB), clouées sur les poutres. De même, un élément de dalle unidirectionnelle (plancher mixte, hourdi) ne présentera généralement pas une rigidité suffisante dans son plan que pour servir au contreventement, sauf à mettre en place des liaisons appropriées entre les éléments de plancher ou une couche de compression coulée sur place.
- les murs, en ce y compris les parois en bois. On peut remarquer qu'un seul élément remplit alors jusqu'à 3 fonctions : supporter, contreventer et cloisonner. Pas mal pour "juste un bête mur"...
- les cages d'ascenseur (et d'escalier), si elles sont fermées. Elles sont avantageuses car elles combinent généralement plusieurs parois, connectées à angle droit, et donc plusieurs plans de contreventement complémentaires entre eux. À la limite, les gaines techniques peuvent servir de même, sauf que leurs proportions plus élancées les rendent généralement moins effectives de ce point de vue (voir plus loin le point sur les proportions optimales).

- les parois vitrées ; un plan de contreventement ne bloque donc pas nécessairement la vue.



Figure 3.2.1.3.^{ix}

Si ces éléments existants ne peuvent être exploités pour le contreventement ou ne sont pas suffisants, on peut aussi "étirer" des colonnes dans le plan dans lequel on désire du contreventement. Comme pour les gaines techniques, les proportions obtenues sont en général non optimales, mais cela représente une contribution appréciable au contreventement.

Exemple : banc fixe pour les amphithéâtres Opéra de l'ULg à Liège (Daniel Dethier, 2013). Les pieds sont des plans de contreventement très élancés, mais c'est possible vu l'ampleur limitée des efforts (il ne s'agit que de mobilier) et la haute résistance du matériau acier.

Exemple : musée des civilisations méditerranéennes à Marseille par Rudy Ricciotti (2013) (voir page suivante). Le profil est progressif, aboutissant à une section en ovale allongé.



Figure 3.2.1.4.^x



Figure 3.2.1.5.^{xi}

Mais on verra au point suivant que des proportions si effilées sont rares. En général, le système du diaphragme, pour efficace et versatile qu'il soit, par ailleurs bloque la circulation et la vue, ce qui peut le rendre peu pratique. On est donc souvent amené à le remplacer par ou le compléter avec les autres morphologies présentées ci-après.

3.2.2. Proportions optimales

L'étude pour les diagonales (voir plus loin) montre l'avantage d'une inclinaison assez couchée sur l'horizontale. Ici, le mur étant plan, il y a moins de risques de flambement, mais il demeure une limite au-delà de laquelle il va se voiler. On pourrait considérer que, dans l'idéal, les diagonales seraient inclinées entre 45 et 60° par rapport à la verticale. Transposé en termes de proportions du panneau lui-même, cela donne un rapport allant approximativement de 1:1 à 1:2.

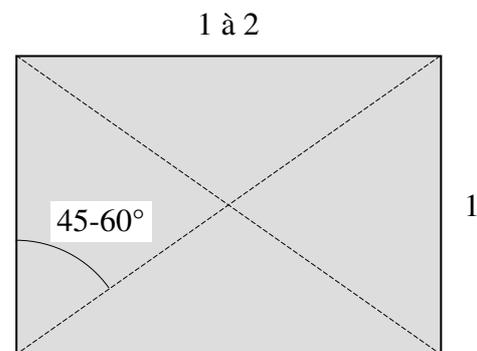


Figure 3.2.2.1.

Cela a son importance notamment dans le percement de murs contreventants.

Exemple : dépôt de tram à Anderlecht (~1900). Les charpentes métalliques ne peuvent contreventer dans le sens des façades ; c'est donc aux murs à rue de le faire. Si les fenêtres avaient été ouvertes en milieu de maille d'ossature, soit à mi-distance entre deux colonnes, il en aurait résulté deux trumeaux de part et d'autre, assez élancés, et donc dans lesquels les diagonales actives auraient été assez verticales. À l'inverse, les ouvertures ont été ménagées

en bord de maille, de manière à créer un unique trumeau, le plus large possible, présentant donc les diagonales les plus horizontales qui étaient possibles.

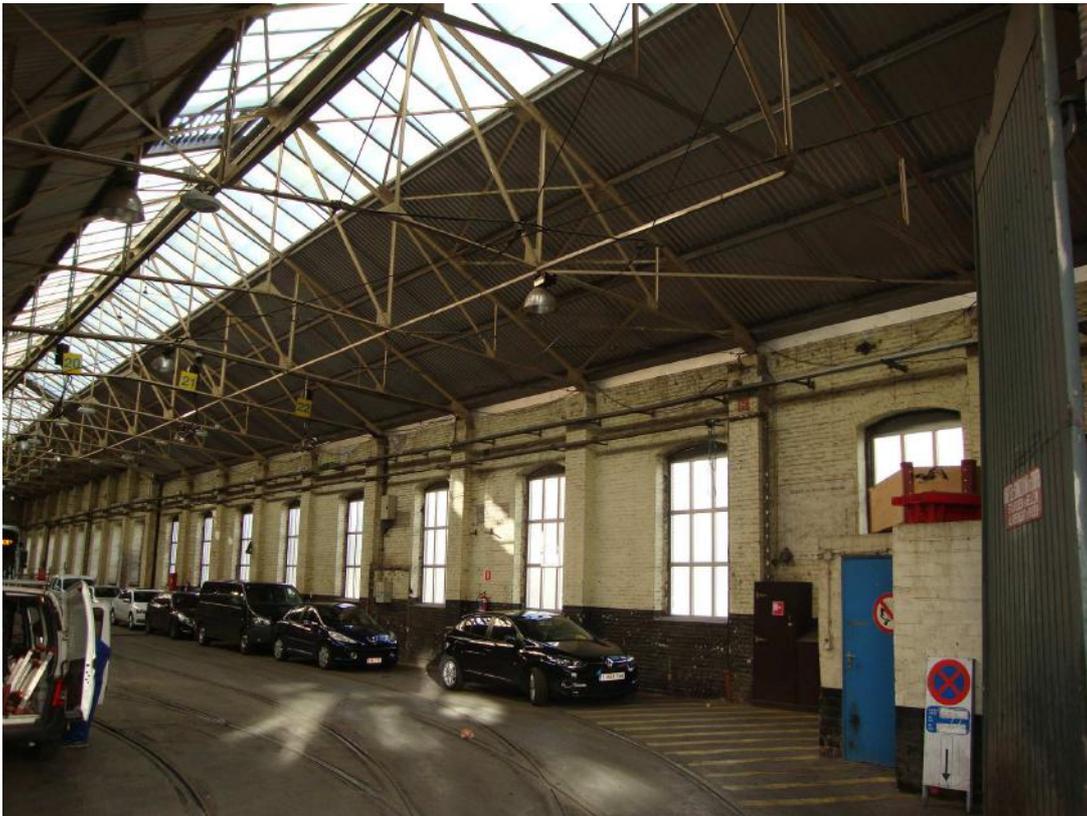


Figure 3.2.2.2.^{xiv}

3.3. Croix de Saint-André

3.3.1. Principe

Si l'obstruction physique ou visuelle accompagnant un diaphragme ne convient pas pour contreventer une maille, on peut se souvenir qu'en fait en son sein, ce sont principalement les 2 diagonales qui travaillent. On peut donc ne garder que celles-ci : en créant des triangles, indéformables au contraire de quadrilatères, elles rigidifient la maille orthogonale.

Remarque : malgré leurs apparences similaires, ne pas confondre la croix avec les colonnes croisées (voir plus loin) ; ces dernières composent plutôt une croix indépendante, non inscrite dans une maille (absence de montants verticaux).

En pratique, on peut bien sûr composer la croix de 2 barres capables de reprendre tant la traction que la compression : l'effet rigidificateur serait alors maximal. Cependant, les barres devraient alors être toutes deux dimensionnées pour résister au flambement, pour le cas où elles sont sollicitées en compression. On peut même les aider à ce sujet en les connectant

entre elles à leur intersection, ce qui divise par deux leur longueur de flambement. Néanmoins, elles vont rester relativement épaisses et donc visuellement présentes.

Mais en fait, une seule diagonale suffit déjà à trianguler et donc à stabiliser la maille (même si c'est alors moins raide qu'avec deux diagonales rigides), ce qui mène à des configurations plus "aérées". Deux raisonnements sont possibles :

- soit on choisit de garder la diagonale qui travaille en compression. Dès lors, elle doit être capable de résister au flambement et sera donc relativement épaisse. Elle sera alors également capable de reprendre de la traction lorsque la force sera exercée dans l'autre sens ; au final, une seule diagonale suffit donc bien dans tous les cas (voir le point suivant sur les diagonales).

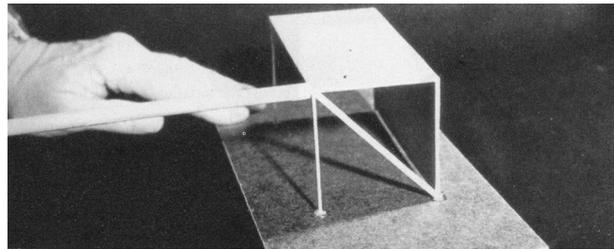


Figure 3.3.1.1.^{xv}

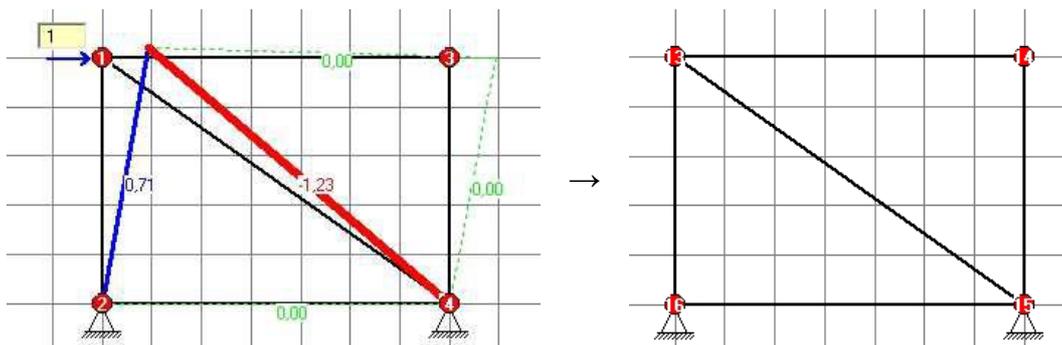


Figure 3.3.1.2.

- soit on choisit de garder la diagonale en traction, mais lorsque la force agira dans l'autre sens, il y a un risque qu'elle soit trop mince et flambe ; elle ne sera donc pas capable d'agir.

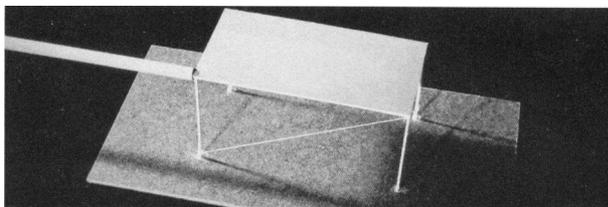


Figure 3.3.1.3.^{xvi}

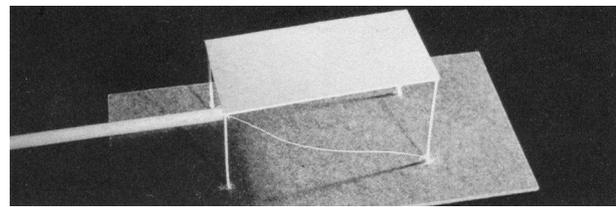


Figure 3.3.1.4.^{xvii}

Par conséquent, il faut placer les deux diagonales, en paire d'opposées, pour qu'il y en ait toujours une qui reprenne la charge (en traction).

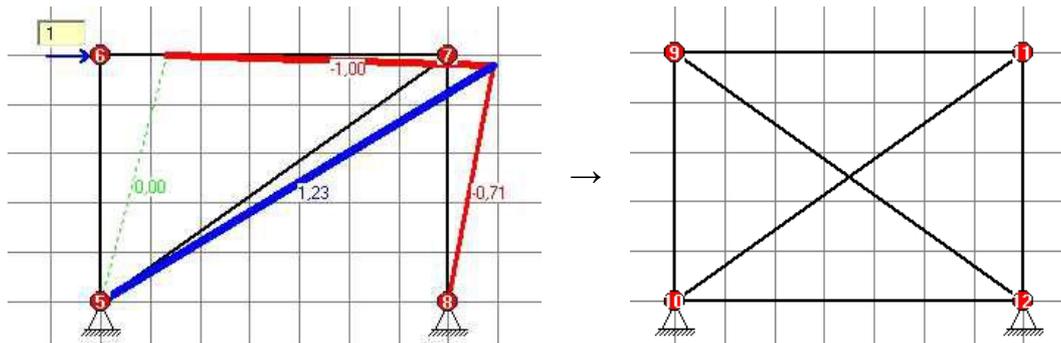


Figure 3.3.1.5.

C'est généralement cette version "light" de la croix qui est préférée, exploitant la possibilité de ne la composer que de barres travaillant uniquement en traction, plus fines et donc plus discrètes.

3.3.2. Modalités

Concrètement, comme on ne demande pas aux diagonales de résister en compression, la croix peut être constituée de câbles ou tirants. La discrétion apportée par leur finesse se paye cependant d'une souplesse qui les mène à "bâiller"⁷ sous leur poids propre ; non seulement c'est inesthétique, mais cela retarde également leur mise en tension sous charge, et donc leur effet rigidificateur pour la maille. Deux solutions existent pour éviter cela :

- s'ils sont disposés dans un plan vertical, les deux câbles peuvent être fixés l'un à l'autre en leur intersection ;
- les deux câbles doivent être systématiquement précontraints ; cette précontrainte engendre à son tour des efforts supplémentaires sur la structure principale.

Pour éviter cette sursollicitation de la structure, on choisit parfois de tout de même placer deux diagonales rigides (par exemple des tiges), juste assez que pour reprendre leur poids propre sans fléchir de manière visible. Par contre, sous charge horizontale, la diagonale en compression flambe et donc n'agit pas pour le contreventement : seule celle en traction travaille, comme avec les câbles.

Exemple (voir page suivante) : bâtiment métallique industriel type, présentant des croix composées de cornières.

⁷ Anglais : *sagging*.

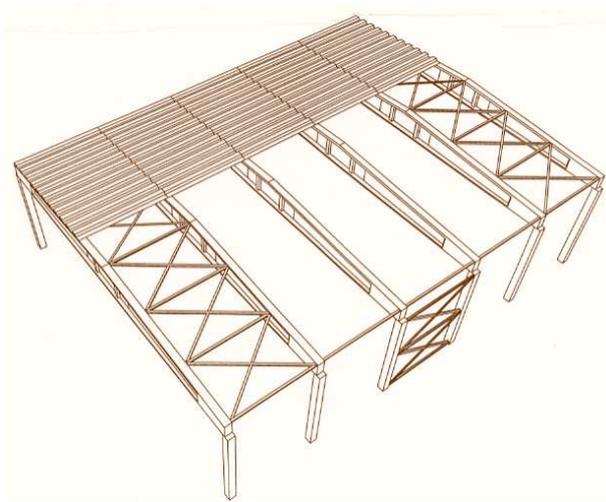


Figure 3.3.2.1.

Enfin, on remarquera qu'en ce qui concerne la configuration, les deux diagonales peuvent être disposées en fait à l'intérieur comme à l'extérieur de la maille à contreventer :

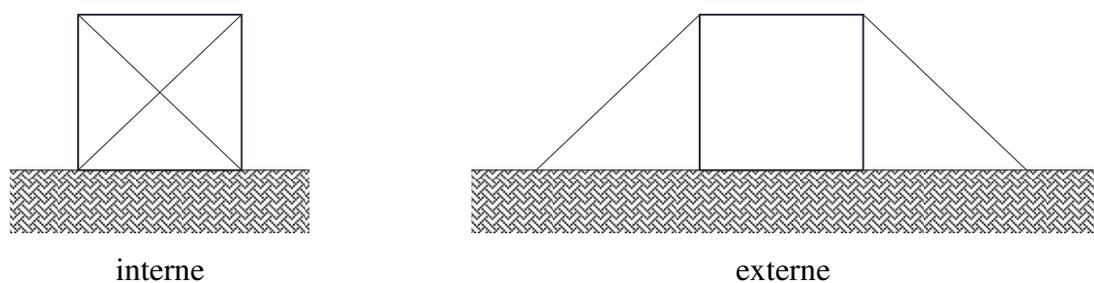


Figure 3.3.2.2.

La configuration externe permet bien sûr de dégager l'intérieur de la maille.

Exemple : immeuble de bureaux pour Komatsu Seiren à Nomi (Japon) par Kengo Kuma (2015) (voir page suivante). Le bâtiment est ceinturé d'une série de câbles diagonaux en fibre de carbone. Ce dispositif vise à la base à assurer la résistance au séisme, sans encombrer l'espace intérieur du bâtiment, mais par la même occasion il génère un espace intermédiaire à la périphérie du bâti (dont malheureusement l'usage n'est pas clair : zone piétonne à l'abri de la circulation des véhicules sur le parking ?).

Toutefois, la configuration externe présente 2 désavantages :

- dans le cas de câbles, comme ils ne se croisent plus, il n'est plus possible de les connecter entre eux pour diminuer leur flèche sous poids propre ; par conséquent, leur précontrainte devra être augmentée d'autant ;
- les diagonales extérieures risquent d'encombrer et sont donc plus susceptibles d'être positionnées suivant un angle assez proche de la verticale (c'est le cas dans l'exemple précédent) ; comme on le verra au point suivant, cela diminue leur efficacité, et mène donc à devoir leur conférer une section plus importante.

Figure 3.3.2.3.^{xviii}

3.3.3. Proportions optimales

Comme on le verra en détail dans le point consacré aux diagonales, celles-ci fonctionnent mieux lorsqu'elles présentent une position relativement "couchée" sur l'horizontale. L'allongement des diagonales qui en résulte n'est pas problématique ici puisqu'on ne cherche pas à résister au flambement ; la section des branches de la croix reste réduite et, dans le cas de câbles, autant rentabiliser leurs coûteux ancrages sur une plus grande longueur.

Par contre, plus le câble est en position "couchée", plus il bâille et plus il faut le précontraindre, ce qui se répercute sur le reste de la structure. On peut en conclure qu'un bon compromis semble de rester dans une inclinaison de 45 à 60° sur la verticale.

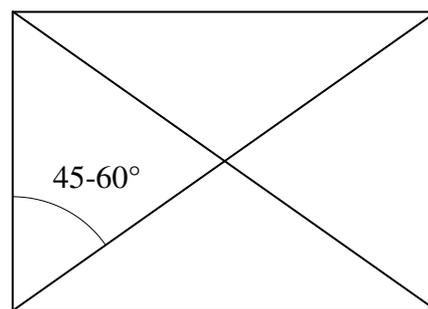


Figure 3.3.3.1.

3.3.4. Intégration dans l'architecture

Comme toute pièce oblique implantée dans une surface verticale, la croix peut limiter la position des ouvrants possibles. Si nécessaire, on peut envisager des variations géométriques

telles que la disposition en V, comme pour les diagonales (voir ce point plus loin). Par contre, par leur minceur, les câbles n'obstruent pas la vue au travers d'une paroi transparente.

De même, comme toute pièce oblique implantée dans une surface de circulation, la croix peut entraîner des problèmes de praticabilité, ce qui appelle à des aménagements spécifiques.

Exemple : auvent à la *Theaterplein* à Anvers (Secchi-Vigano⁸ + BAS et ARA, 2009). Des bancs circulaires empêchent la circulation en pied des diagonales. Mais leur usage semble limité.



Figure 3.3.4.1.^{xx}

3.4. Diagonales

3.4.1. Principe

On l'a vu, la croix de Saint-André limite les possibilités d'ouvertures et donc peut être assez contraignante architecturalement. Cela peut mener à préférer l'alternative déjà évoquée de la diagonale unique, en échange de sa présence plus affirmée.

Exemple : grille de portail à Rotterdam. L'inclinaison des "joncs" contribue au contreventement des cadres (qui n'en ont en fait pas vraiment besoin). La faible inclinaison des barres sur la verticale est défavorable (voir point suivant), mais compensée par leur grand nombre, qui permet un intéressant effet de légèreté visuelle.

⁸ www.secchi-vigano.eu/atS04/at%20S04_theaterplein.html.

Figure 3.4.1.1.^{xxi}

En ce qui concerne les conditions d'appui, si les diagonales sont encastrées à leurs extrémités, de la flexion en provenance de la structure peut y pénétrer et, par sa déflexion, y initier le flambement. Pour éviter cela, *a priori* les diagonales devraient être articulées.

Exemple : immeuble de logements *Neo Bankside* à Londres (Rogers Stirk Harbour, 2012). Le profil des diagonales, affinées à leurs extrémités, indique qu'elles sont bi-articulées.

Remarque : malgré l'apparence de croix, ce sont bien des diagonales ; observer la conjonction avec la maille de la superstructure : chaque maille ne contient qu'une diagonale, et non une croix.

Avoir disposé le contreventement dans les façades a permis qu'il n'y ait pas d'élément porteur à l'intérieur des appartements, ce qui laisse toute liberté pour les aménager.

Figure 3.4.1.2.^{xxii}

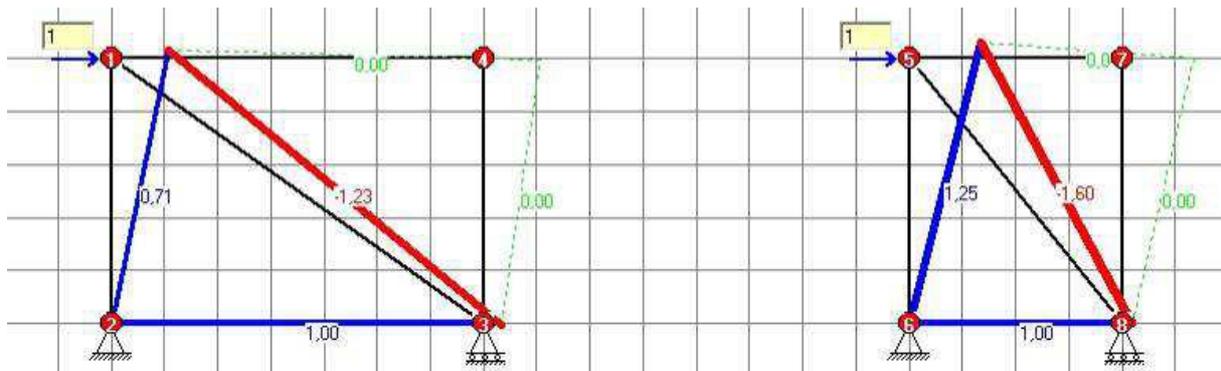
Ensuite, le recours aux diagonales, plutôt que des voiles en façade par exemple, préserve la transparence et les vues ; mais la proximité avec l'extension d'Herzog & De Meuron de la *Tate Modern Gallery* a créé des problèmes d'intimisation⁹...

Néanmoins, en pratique, il va souvent être plus facile de réaliser une connexion de type (semi-)encastré, mais on compte alors sur le fait que la diagonale soit nettement moins rigide que les éléments de l'ossature, ce qui limite la flexion qui va y transiter (cf. l'effet "éponge").

3.4.2. Inclinaison idéale

Comparons une diagonale plutôt verticale et une plutôt couchée sur l'horizontale, devant reprendre le même effort horizontal, et observons les efforts engendrés dans les différentes barres :

- cas où le vent souffle "contre" la diagonale, alors sollicitée en compression :



- cas où le vent va "dans le sens" de la diagonale, alors sollicitée en traction :

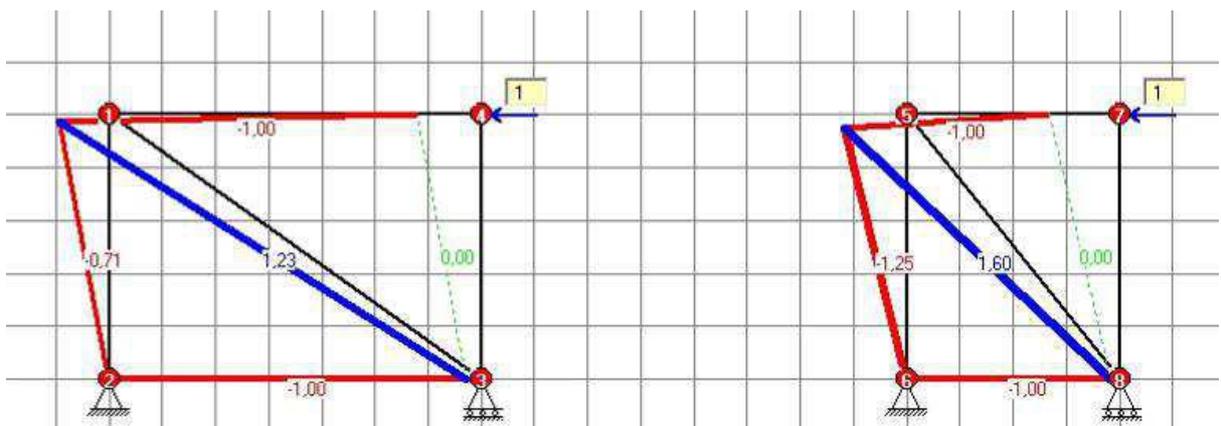


Figure 3.4.2.1.

⁹ www.dezeen.com/2016/09/07/tate-modern-gallery-visitors-accused-spying-neo-bankside-residents-observation-deck/.

Détaillons la situation par type de barre :

- barres horizontales supérieure et inférieure : leur type de sollicitation dépend en fait du positionnement de la maille contreventée dans l'ensemble de l'ossature, et de la position des appuis fixes ; on ne peut donc en présumer. Et l'intensité de la sollicitation est simplement égale à la charge, soit indépendante de l'inclinaison de la diagonale. Donc ce qui s'y passe est indifférent.
- colonne : elle peut se retrouver sollicitée soit en traction (ce qui est favorable) soit en compression, mais par ailleurs c'est toujours contrebalancé par l'action du pied de la diagonale sur l'étage inférieur de la structure (ou sur un appui). Par contre, cette sollicitation est moindre si la diagonale est couchée.
- diagonale elle-même : plus elle est couchée, moins elle est sollicitée ; cela peut se comprendre intuitivement dans la mesure où elle est alors mieux "alignée" sur l'effort à reprendre. Par contre :
 - elle est alors aussi plus longue, ce qui est défavorable pour le flambement ;
 - son poids propre est d'autant plus transversal à la diagonale, et engendre donc plus de flexion secondaire.

Pour choisir l'inclinaison de la diagonale, il y a donc conflit entre 2 logiques contraires, et le plus raisonnable semble de chercher un compromis en se rapprochant de 45° .

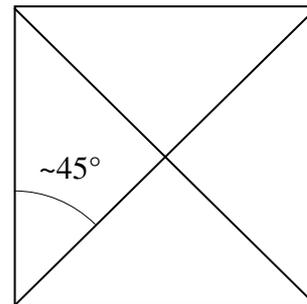


Figure 3.4.2.2.

3.4.3. Intégration dans l'architecture du bâtiment

Bien que moins contraignantes que les croix de Saint-André, les diagonales continuent tout de même à interférer significativement avec la trame orthogonale de l'ossature et donc avec l'architecture, quant à la fonctionnalité (elles peuvent gêner le positionnement, dans la maille considérée, d'un passage ou d'une fenêtre) et l'aspect (si les diagonales sont placées dans le plan d'une façade).

Techniquement, une solution pourrait être de positionner les diagonales à l'extérieur du bâtiment, mais cela encombre un espace alors perdu, et n'est donc généralement pas adopté.

Une première voie consiste à faire coïncider les diagonales avec celles qui existent déjà par ailleurs dans le bâtiment via les escaliers.

Exemple : ex-Institut Pasteur à Bruxelles (Uccle).

Si cette association n'est pas retenue et que les diagonales se développent donc au sein de l'ossature elle-même, on peut en fractionner le tracé pour ménager des zones libres (passage, ouvertures). Cela va également diminuer les longueurs libres et donc l'impact du flambement. Plusieurs dispositions sont envisageables¹⁰ :



Figure 3.4.3.1.^{xxiii}

- en V :

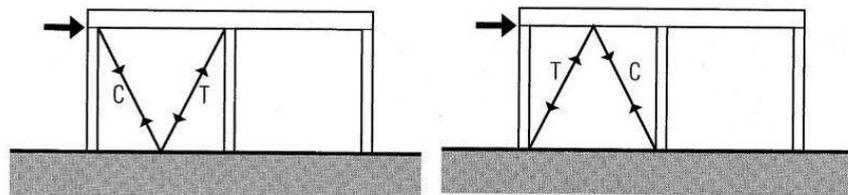


Figure 3.4.3.2.^{xxiv}

Exemple : pavillon "Atelier Leffe" aux Plaisirs d'Hiver à Bruxelles (2016) (voir page suivante). La disposition en V permet d'ouvrir des fenêtres à bonne hauteur dans les mailles contreventées.

¹⁰ On peut les rapprocher des différents types de treillis, s'ils étaient disposés verticalement.



Figure 3.4.3.3.^{xxv}



Figure 3.4.3.4.^{xxvi}

Exemple : gare de La Haye (ex-ministère de l'Urbanisme et Aménagement du territoire) (Jan Hoogstad¹¹, 1992). Là, le V inversé permet de conserver une praticabilité maximale en pied.



Figure 3.4.3.5.^{xxvii}

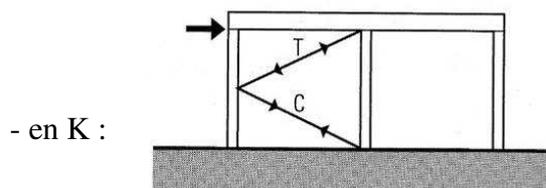


Figure 3.4.3.6.^{xxviii}

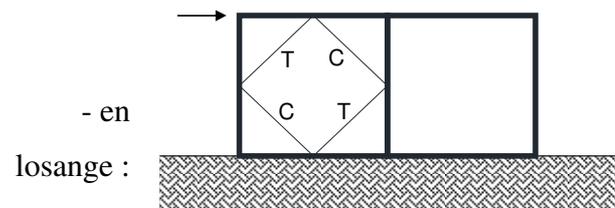


Figure 3.4.3.7.

¹¹ www.ectorhoogstad.com/nl/node/140.

Ces configurations alternatives peuvent aussi servir à maintenir une inclinaison favorable (cf. point correspondant) dans une maille dont la diagonale ne présenterait pas un angle optimal.

Exemple : salle de concert BIMhuis¹² à Amsterdam (3XN, 2005).



Figure 3.4.3.8.^{xxix}

3.4.4. Comparaison diagonales – croix de câbles

<i>avantages de la croix en traction</i>	<i>avantages des diagonales</i>
Malgré la haute technologie associée à la traction (acier à haute résistance, ancrages coûteux), les croix sont souvent moins chères que les diagonales uniques, car ces dernières doivent être renforcées, donc alourdies, pour pouvoir reprendre notamment le flambement associé à la compression.	La diagonale unique limite l'ampleur des zones "bloquées" pour y disposer des accès ou des fenêtres.
Les câbles ou tiges peuvent plus facilement s'adapter à des angles divers, tandis que la	

¹² www.3xn.com/#/architecture/by-year/99-muziekgebouw.

<p>diagonale a intérêt à rester aux alentours des 45° ; la croix en traction constitue donc une solution plus versatile, et mieux adaptée à des grandes dimensions.</p>	
---	--

3.5. Nœuds encastrés

3.5.1. Principe

Les diagonales et croix de Saint-André fonctionnent certes très bien, mais quand dans la maille il y a besoin de percements, de tels dispositifs représentent un obstacle. C'est pourquoi une solution qui est parfois préférée consiste à encastrer un ou plusieurs des nœuds de la maille, c'est-à-dire recourir à une ossature qui est déjà (semi-)rigide par elle-même, sans barres additionnelles. Cependant, cet avantage est obtenu au prix d'un fonctionnement non plus en traction-compression mais principalement en flexion, ce qui est moins économe en matériau (voir en fin de chapitre la comparaison des différentes morphologies de contreventement).

Voyons les différentes modulations possibles, et comment les nœuds encastrés s'incarnent dans les différents matériaux structuraux.

3.5.2. Modulations

Dans une maille, on a le choix d'encastrer 1, 2 3 ou les 4 nœuds (une maille dont les 4 nœuds sont encastrés est appelée un *cadre*).

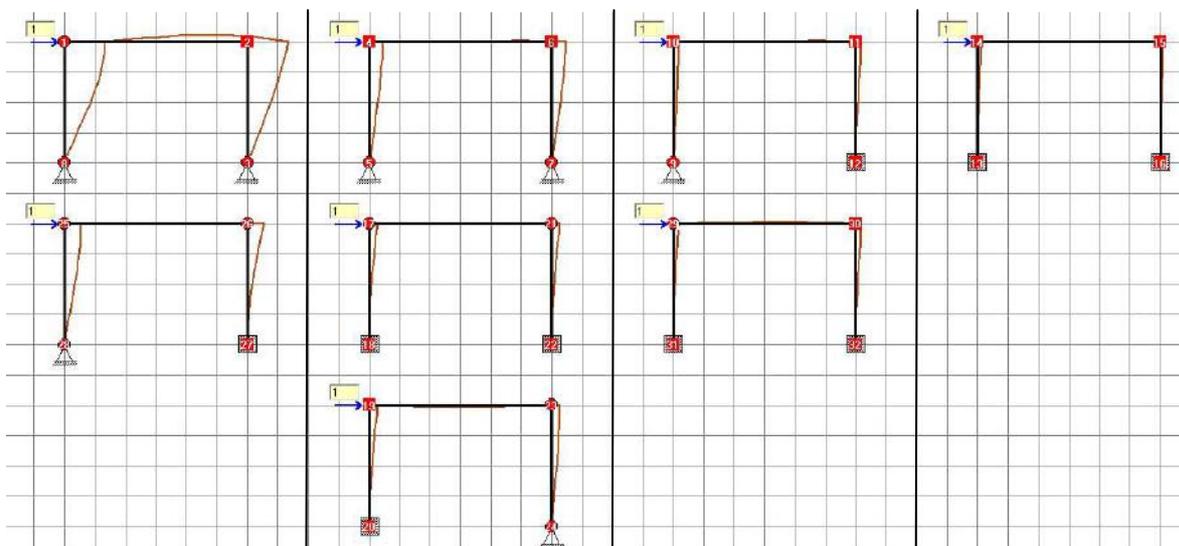


Figure 3.5.2.1.

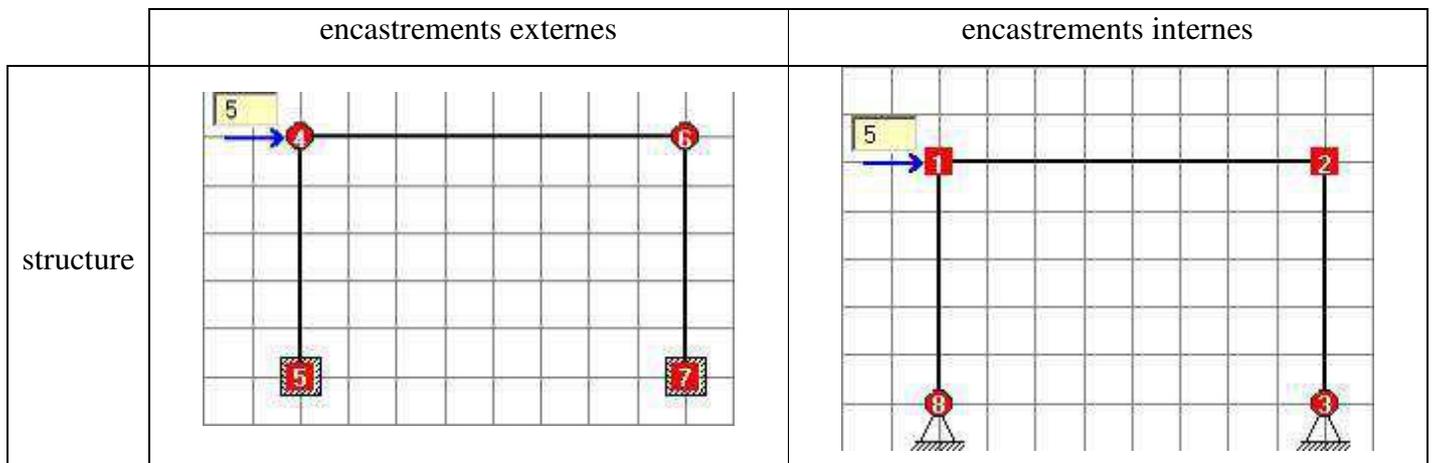
De manière évidente, plus il y a de nœuds encastrés, plus la maille sera rigide face aux charges latérales¹³.

En particulier, dans le cas où on encastre 2 nœuds, on pourrait se demander s'il vaut mieux choisir ceux du haut, qui appartiennent à la structure (on parle alors d'encastres internes), ou ceux du bas, qui peuvent éventuellement se confondre avec des points d'appui (encastres externes).



Figure 3.5.2.2.^{xxx}

Comparons les deux options (les échelles de représentation des efforts internes et déformation sont identiques dans les deux cas).



¹³ Voir aussi la vidéo de démonstration sur modèle MOLA :

<https://www.youtube.com/watch?v=ZdnO80eODNE>.

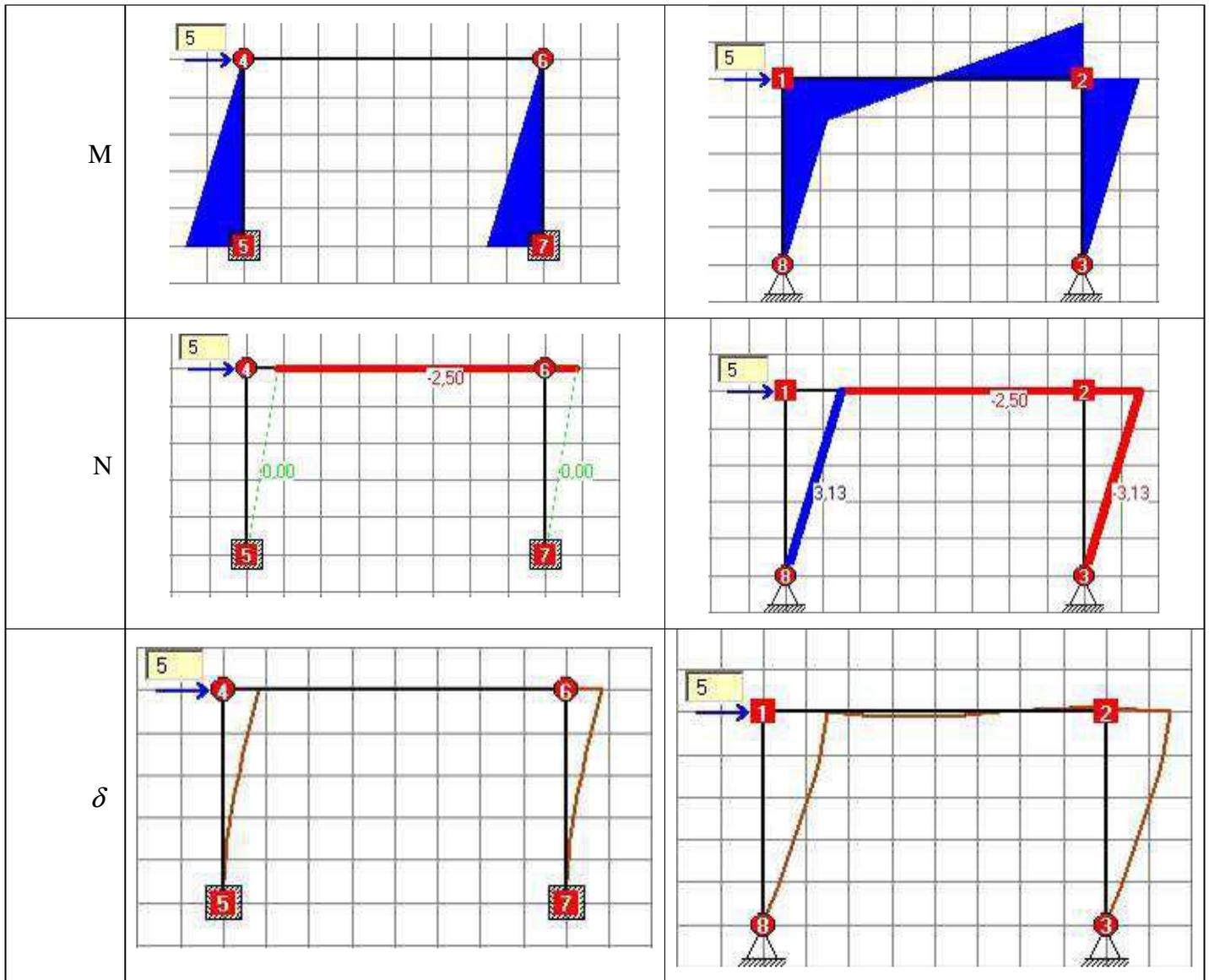


Figure 3.5.2.3.

On observe qu'avec des encastrements internes, les efforts internes sont plus importants (tant N que M), ce qui mène à une déformation également (et nettement) plus élevée. L'encastrement externe est donc plus efficace. On peut remarquer que cette observation est valable également si on n'encastre qu'un seul nœud (voir figure 3.5.2.1., 1^e colonne). Mais :

- le linteau reste alors biarticulé, ce qui ne l'aide pas pour reprendre les charges principales (verticales) ;
- il n'est pas facile (et généralement cher) de réaliser des fondations capables de résister en flexion.

Par conséquent, en pratique on se retrouve généralement à soit encastrement les 2 nœuds supérieurs (on parle alors de *portique*), soit les 4 nœuds.

3.5.3. Intégration architecturale

3.5.3.1. Généralités

Le fait qu'un nœud soit encastré se marque généralement par :

- soit l'ajout d'une pièce supplémentaire pour réaliser cet encastrement ;
- soit un épaississement local dans le plan de contreventement, pour aider la structure à reprendre les importants moments fléchissants qui s'y concentrent.

Cela dépend aussi du matériau structural utilisé. Passons ceux usuels en revue.

3.5.3.2. Acier

On ajoute généralement des goussets ou des équerres (angl. : *bracket*).

Exemple : cage d'ascenseur de l'ancien stock de tissus de l'entreprise Waucquez (début du XX^e s.), abritant aujourd'hui les Archives de la Ville de Bruxelles. Remarquer la découpe courbe des goussets, signe d'un travail encore presque artisanal.

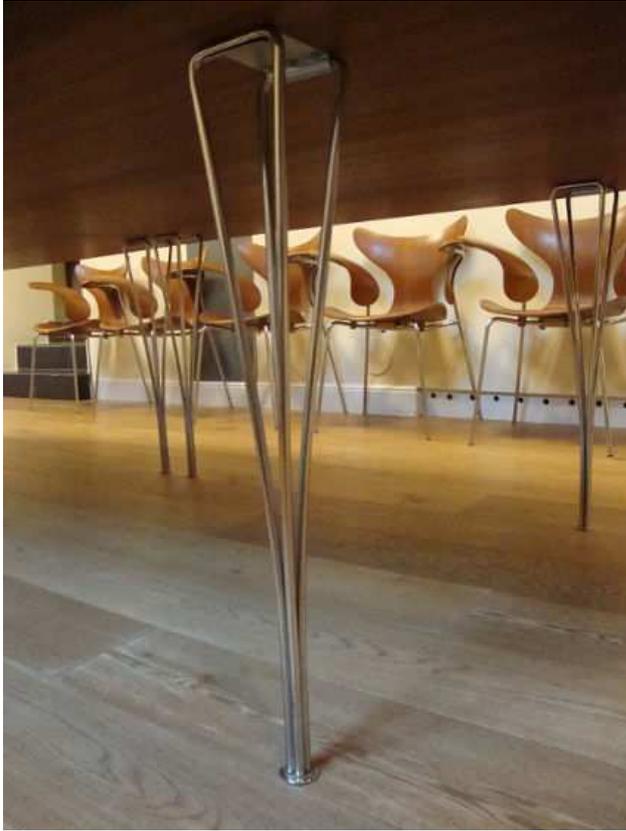


Figure 3.5.3.2.1. ^{xxxix}

La connexion étant en flexion, elle est surtout sollicitée dans ses bords (comme une poutre) ; on peut donc en arriver à évider le centre.

Exemple : pieds pour la table *Super-Elliptical* (Piet Hein & Bruno Mathsson, 1968) (voir page suivante). Par contre, le tracé courbe n'est pas idéal pour de telles barres potentiellement en compression.

En structure, cela correspond aux *jambes de force* (angl. : *knee braces*). L'évidement de l'angle peut mener à évider également linteau et montants, ce qui définit des treillis.

Figure 3.5.3.2.2.^{xxxii}

Exemple : portique d'affichage autoroutier.

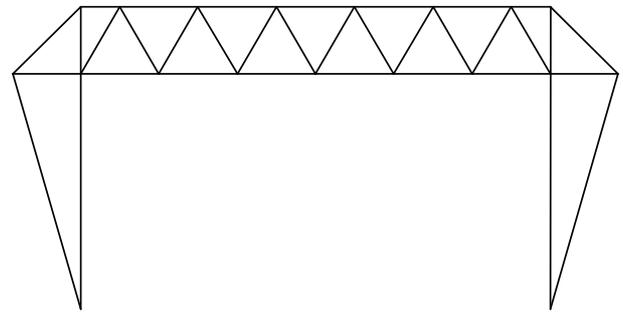


Figure 3.5.3.2.3.

3.5.3.3. Béton armé

En béton coulé sur place, les nœuds sont d'office encastés, de sorte que ce mode de contreventement soit automatiquement exploité, et qu'on n'ajoute pas d'élément supplémentaire. C'est parfois reflété par une variation de la section (au détriment de la simplicité du coffrage, et donc du prix).

Exemple : le siège de la BBL à Bruxelles (Gordon Bunshaft, 1959) (voir page suivante). Un test schématique montre qu'effectivement les efforts les plus importants se situent aux nœuds, d'où l'affinage du milieu des colonnes. Par contre, les linteaux restent soumis à des charges mobiles (déplacements des utilisateurs), de sorte que leur diagramme de moment peut varier ; dès lors, une section constante leur est donc maintenue.

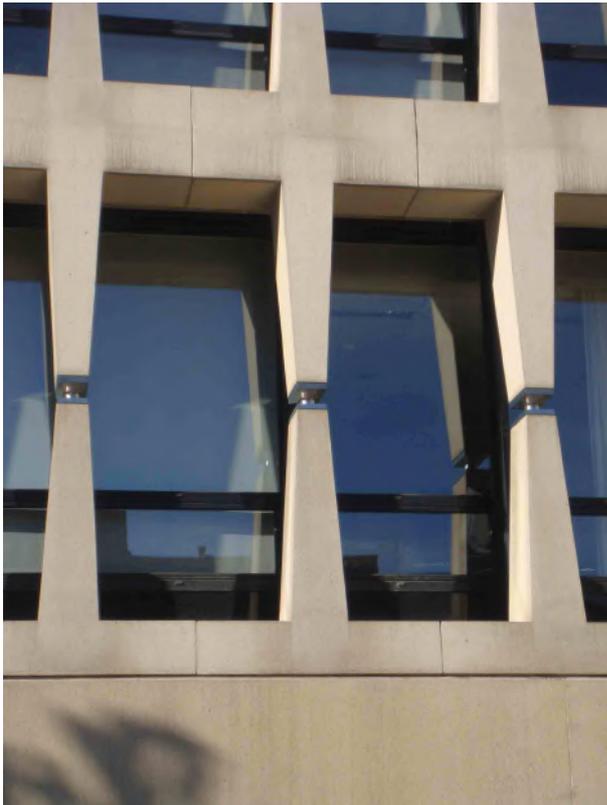


Figure 3.5.3.3.1. ^{xxxiii}

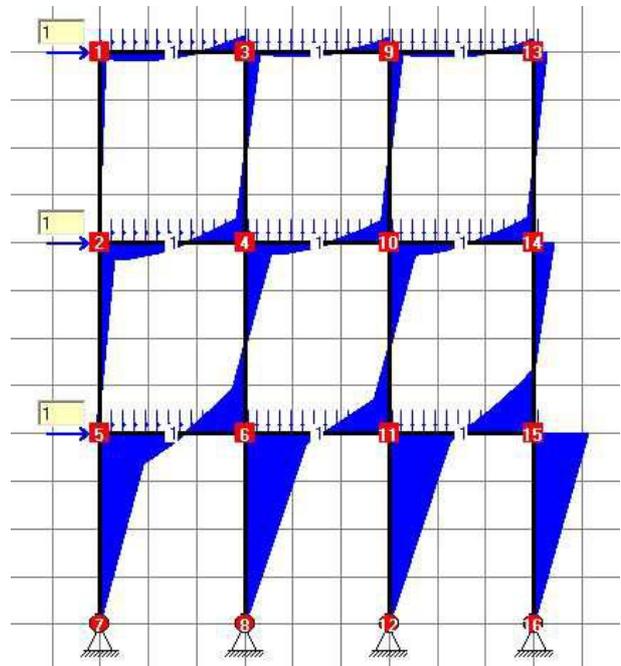


Figure 3.5.3.3.2.

Lorsque la structure touche le sol, on retrouve parfois le fait, discuté plus haut, qu'on évite un encastrement sur les appuis.

Exemple : couvent dominicain à Lille (Pierre Pinsard et Neil Hutchison, 1965).



Figure 3.5.3.3.3. ^{xxxvii}

Mais en béton armé, le renforcement local des nœuds ne passe pas nécessairement par l'élargissement de la section ; en effet, on peut aussi jouer uniquement sur la quantité d'armatures à l'intérieur d'une même section extérieure constante, donc de manière "invisible".

Exemple : le projet Dom-Ino du Corbusier (1914). Théoriquement, les volées d'escalier auraient pu constituer des triangles avec les colonnes pour apporter du contreventement, mais ce n'est pas le cas : les deux sont indépendants. D'ailleurs les escaliers sont bien décrits comme étant "portés" par les dalles. Cela est cohérent avec la philosophie du projet, qui cherche à limiter les éléments structuraux en présence pour offrir des plans et façades libres, pour une structure qui ne présumerait pas de l'architecture et pourrait donc s'adapter à de nombreux programmes et desideratas. En effet, le but était de reconstruire rapidement et à bas coût après les destructions de la 1^e guerre mondiale. Dans ces conditions, le contreventement ne peut être constitué que par tous les nœuds encastrés. Les nœuds ne sont pas épaissis, de manière à conserver une section constante aux colonnes et dalles, et ainsi simplifier les coffrages et rester économique.



Figure 3.5.3.3.4.^{xxxviii}

Mais le succès de ce modèle dans l'architecture moderne a aussi eu l'effet pervers de mener à une méconnaissance des autres morphologies de contreventement...

3.5.3.4. Bois

Avec ce matériau, il est techniquement difficile de réaliser un véritable encastrement, à cause de son fluage et de sa variabilité dimensionnelle en cas de variation du taux d'humidité. On va donc plutôt considérer que les connexions que l'on réalise sont des articulations. Si nécessaire, on va plutôt travailler en remplaçant un encastrement ponctuel par une "pince" : une combinaison de deux appuis proches, l'un travaillant en traction et l'autre en compression.

Exemple : table basse (Helge Bestergaard Jensen, Danemark, ~1955).



Figure 3.5.3.4.1.^{xxxix}

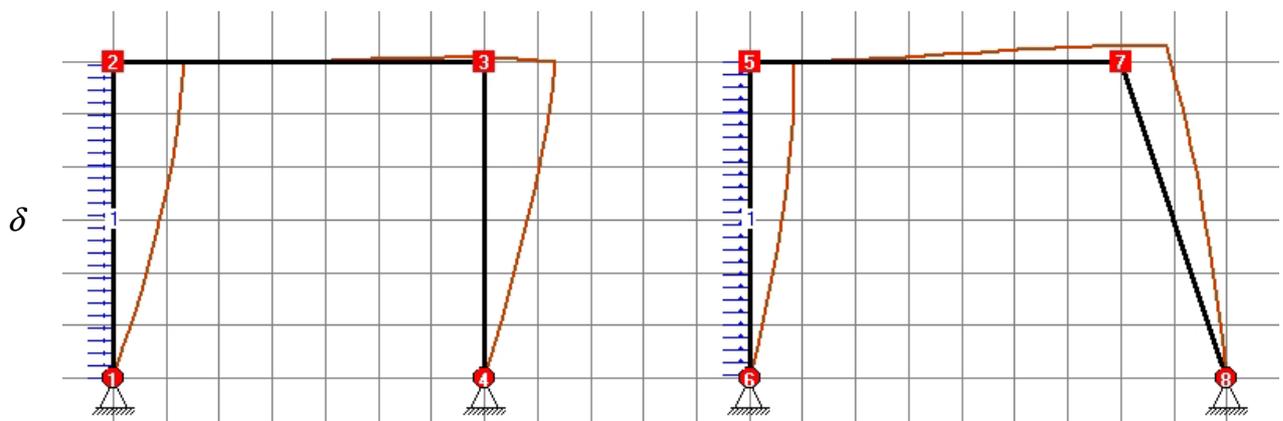
Une exception sont les structures en bois lamellé-collé, qui, par leur développement de section important, peuvent présenter assez de surface pour réaliser un encastrement à l'aide d'une couronne de boulons (voir page suivante). Néanmoins, il reste que c'est souvent l'assemblage, par ses besoins en surface (écartement minimum des boulons) qui détermine le dimensionnement, ce qui n'est pas très optimal...

Figure 3.5.3.4.2.^{x1}

3.6. Colonnes inclinées

3.6.1. Principe

On a vu que si on ne désirait pas encombrer la maille structurale d'un élément supplémentaire tel qu'une diagonale, on pouvait encastrer des nœuds pour fonctionner en (pseudo-)cadre, mais que c'est également plus coûteux en termes de consommation de matière. Un compromis consiste à incliner une ou plusieurs colonnes (les nœuds restant encastrés), ce qui permet de générer des trapèzes à la place des rectangles, et à fonctionner à la fois en flexion et en traction-compression. Cela demeure moins rigide que les triangles des diagonales et croix de Saint-André, mais c'est déjà mieux.



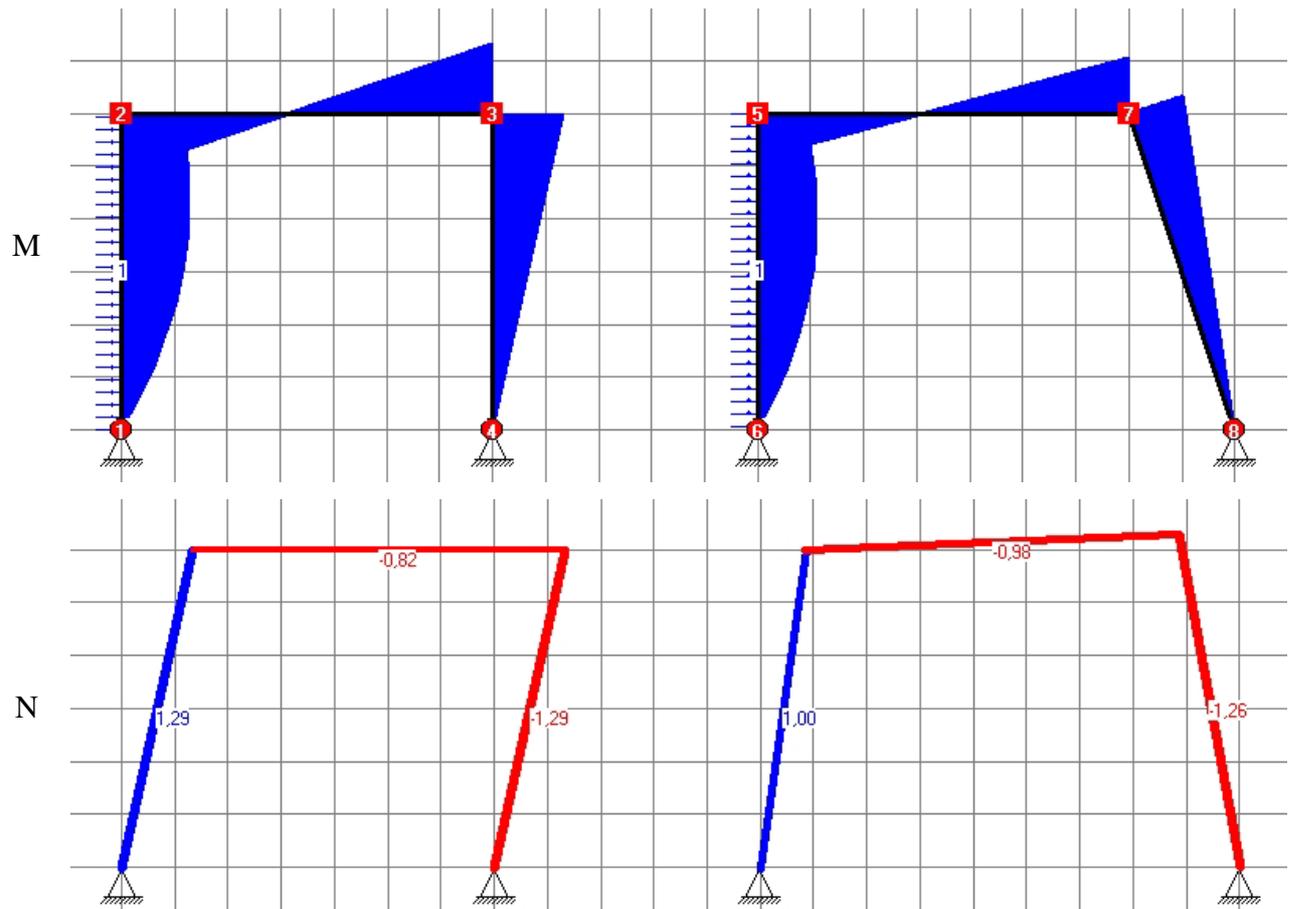


Figure 3.6.1.1.

Exemple : esplanade Saint-Léonard à Liège (Aloys Beguin - Brigitte Massart + Arlette Baumans, 2006) (voir page suivante). Remarquer le sommet de la colonne inclinée qui montre un encastrement (paire de boulons), de même que son pied (3 boulons en triangle). Cette démarche inhabituelle pour du bois, particulièrement pour une structure extérieure, est peut-être justifiée par l'échelle restreinte du projet.

Mais en termes de disposition, en fait il est plus efficace de prévoir les colonnes inclinées par paires opposées, ainsi qu'on le voit habituellement ; la figure suivante illustre la comparaison.



Figure 3.6.1.2.^{xli}

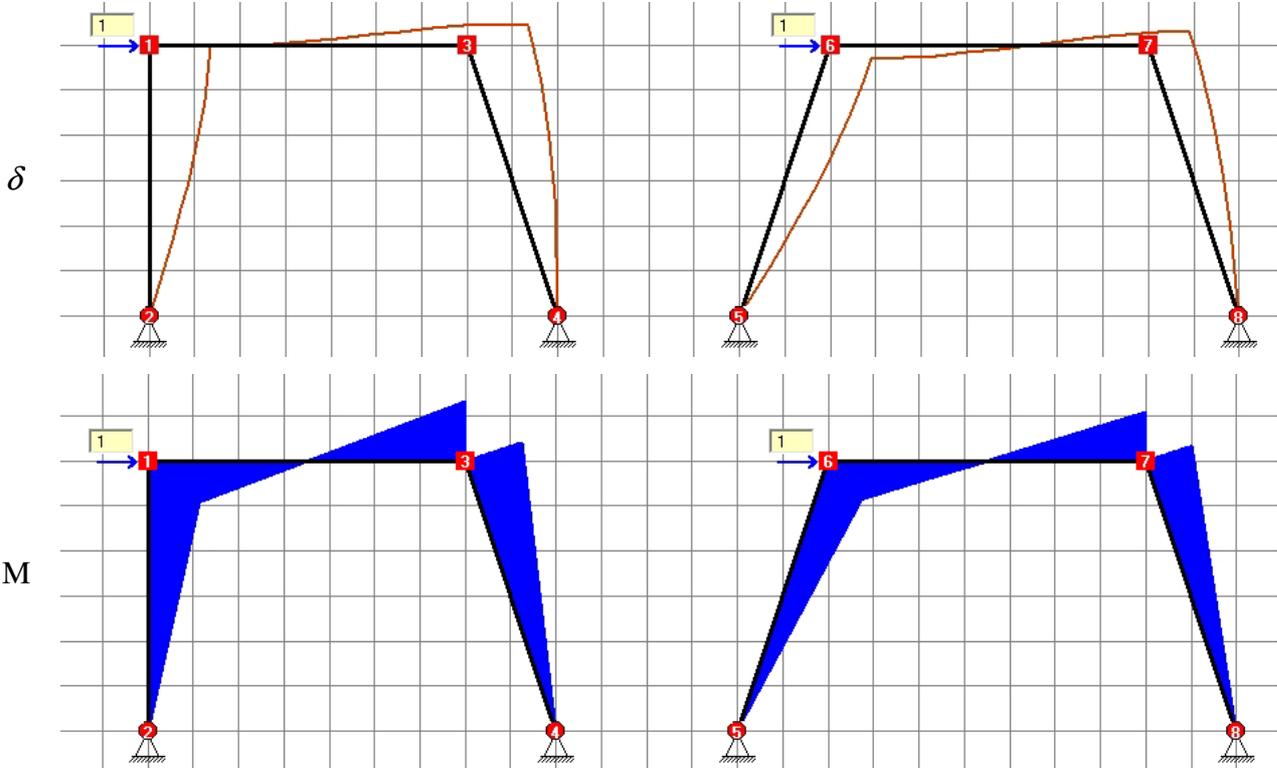




Figure 3.6.1.3.

Exemple : hall de sport "Rempart des moines" à Bruxelles (Blondel + Ney, 2001). L'inclinaison des montants confère à l'ensemble un certain dynamisme qui se marie bien avec le programme. Malheureusement cet intéressant bâtiment, pourtant primé, est aujourd'hui menacé de démolition...



Figure 3.6.1.4.^{xlv}

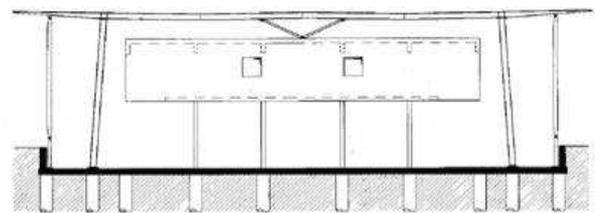


Figure 3.6.1.5.^{xlvi}

Exemple : station de métro Sainte-Catherine à Bruxelles (Olivier Noterman + Ney, 2005). L'inclinaison des colonnes est inversement proportionnelle à la charge que chacune reprend (charge qui diffère pour chaque colonne vu leur implantation aléatoire). Par contre, la direction d'inclinaison est aléatoire, afin de garantir une résistance latérale la plus homogène possible.



Figure 3.6.1.6.^{xlvii}

3.6.2. Disposition croisée

3.6.2.1. Généralités

Les colonnes inclinées peuvent également être combinées par paires en colonnes croisées (formant un X) ou en V.

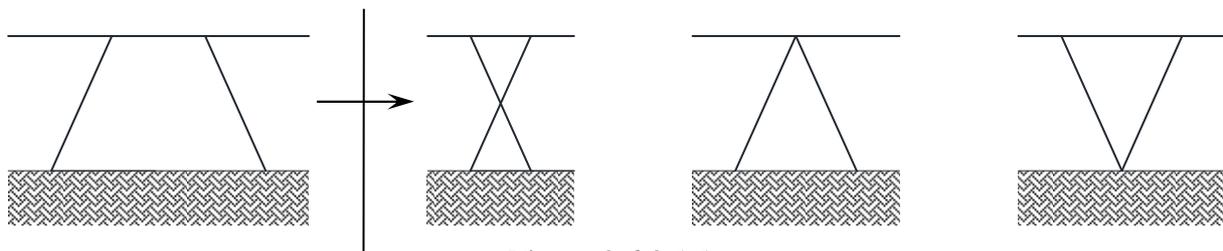


Figure 3.6.2.1.1.

Comme les colonnes "rassemblées" recréent des triangles entre elles, on pourrait espérer qu'elles forment un ensemble contreventant plus rigide que lorsqu'elles ne sont pas combinées entre elles et ne définissent que des trapèzes. Malheureusement, ce n'est pas le cas. En effet, étant rapprochées l'une de l'autre, les colonnes présentent globalement un moindre bras de

levier pour reprendre la charge horizontale, ce qui y engendre des efforts plus importants ; c'est illustré à la figure suivante dans le cas des colonnes en X.

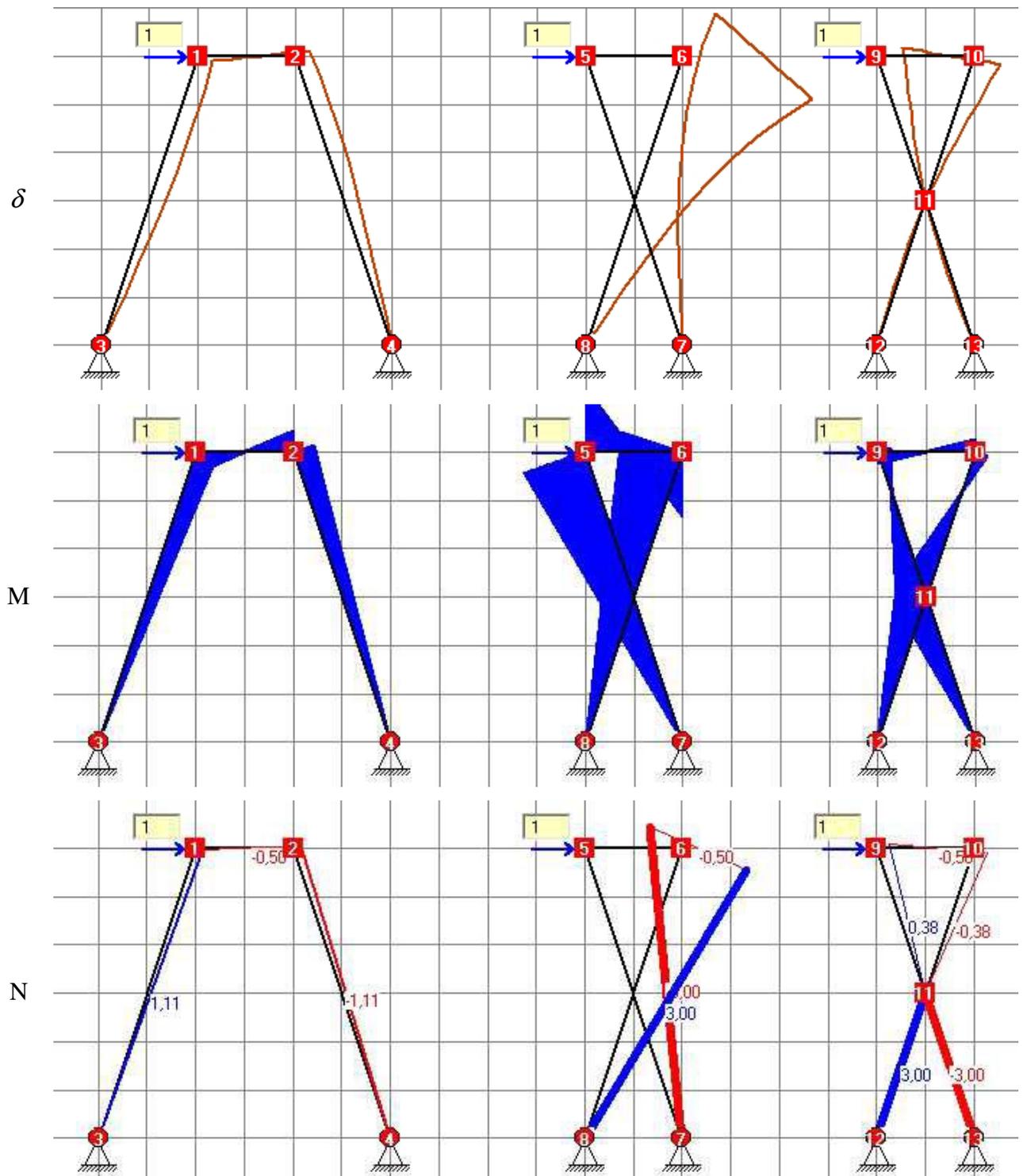


Figure 3.6.2.1.2.

Dès lors, on pourrait dire que ces configurations "rassemblées" ne sont intéressantes que si les deux colonnes étaient déjà à la base suffisamment proches pour qu'on puisse les croiser selon un angle favorable (voir plus loin), mais pas s'il faut les rapprocher par rapport à une position initiale.

Étudions-les séparément.

3.6.2.2. Disposition en X

Le croisement des colonnes, en diminuant leur longueur de flambement, est favorable du point de vue de ce phénomène, et permet d'alléger leur dimensionnement.

Exemple : centre de conférences *Square* au Mont des Arts, à Bruxelles (A2RC¹⁴ + Van Wetter et Abid, 2009) (voir plus loin). Les diagonales s'inscrivent certes dans une maille orthogonale globale, mais servent également à porter la charge du toit, donc on se trouve bien face au cas de colonnes inclinées. Elles déterminent l'expression de la façade, et s'opposent à la volumétrie rigoureusement géométrique de l'ensemble, qui donne son nom au bâtiment.

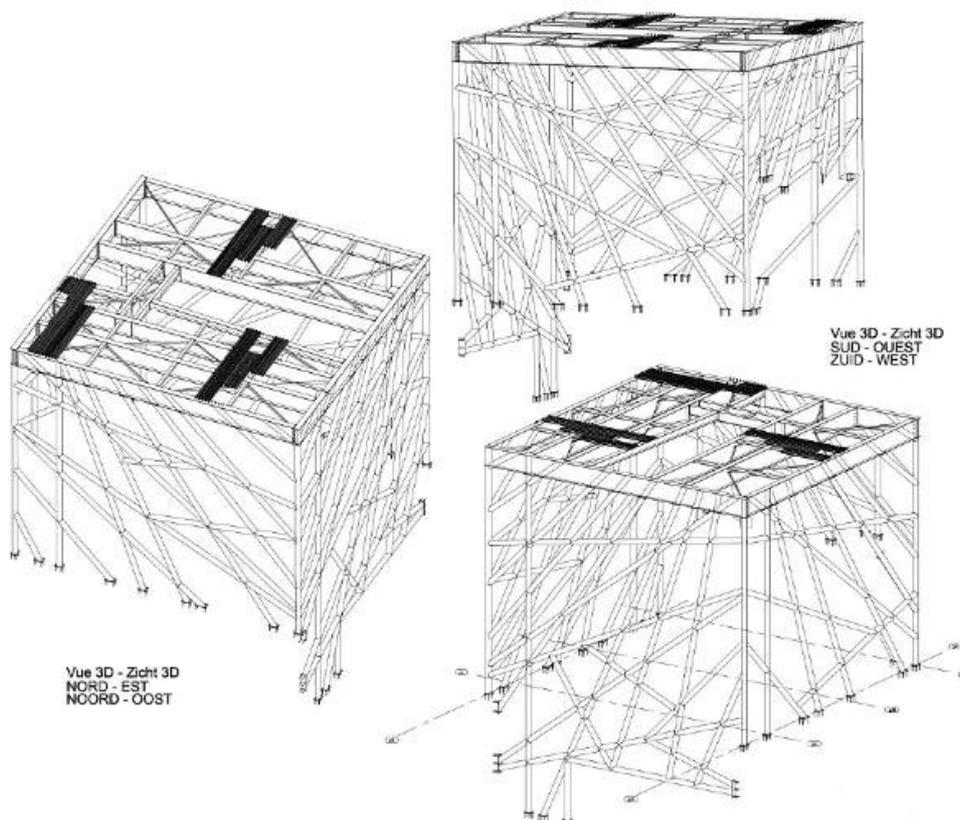


Figure 3.6.2.2.1.^{li}

¹⁴ www.a2rc.be/fiche-121-cgr.

3.6.2.3. Disposition en V

Une autre disposition alternative consiste donc à rassembler des colonnes inclinées par leur sommet, en un V (éventuellement inversé). On perd l'avantage côté flambement du croisement en X, mais par contre :

- pour le V inversé : en écartant plus les "pieds", on préserve un meilleur bras de levier pour reprendre les charges horizontales. Combiné avec la forme triangulaire, il donne de très bons résultats.
- le V, quant à lui, sollicite certes plus la structure, mais le résultat reste bien meilleur qu'avec le trapèze, et le nombre de fondations est divisé par deux.

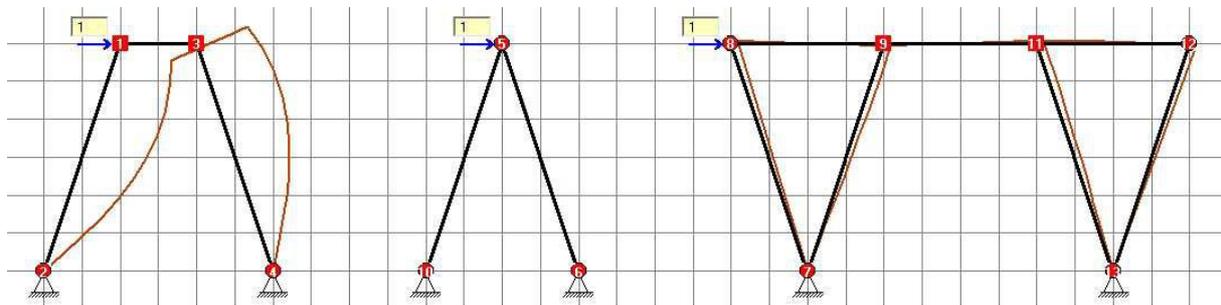


Figure 3.6.2.3.1.

Exemple : ensemble multifonctionnel "Village Léopold" à Bruxelles (Blondel + Ney, 2010). Les V inversés (dont certains se croisent pour former des X) en pied du bâtiment servent d'abord à répartir la charge sur les murs de soutènement du métro dessous, mais ils apportent aussi du contreventement dans leur plan. Par leur expression différente du reste du bâtiment, ils soulignent également la multifonctionnalité du bâtiment, qui était un des enjeux majeurs du projet dans cette zone de bureaux.



Figure 3.6.2.3.2. ^{liii}

3.6.3. Proportions optimales

Comme pour les diagonales, en soi une disposition fort inclinée serait plus efficace ; mais le poids propre des colonnes inclinées y engendre de la flexion supplémentaire, ce qui mène à devoir les redresser. Mais comme ce sont des éléments faisant partie de la structure primaire et donc assez imposants, cette restriction est plus prégnante que pour les diagonales, qui ne sont dévolues qu'au contreventement et donc d'un dimensionnement restreint. En pratique, on pourrait considérer par exemple une inclinaison de maximum 30° sur la verticale.

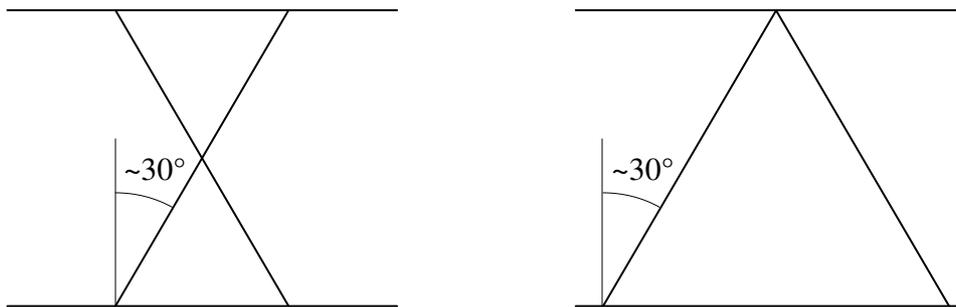


Figure 3.6.3.1.

3.6.4. Cas inversé : suspentes inclinées

Lorsqu'on reprend les charges verticales non en compression avec des colonnes mais en miroir, en suspension avec des tirants, là également l'inclinaison des suspentes peut contribuer à du contreventement, pour éviter un effet "balançoire". Une particularité est que comme les suspentes sont a priori d'office bi-articulées (car composées de câbles flexibles), la seule disposition possible est en paires de suspentes inclinées de manière symétrique.

Exemple : station de métro "Tomberg" à Bruxelles (1976) (voir page suivante). On remarque que les tirants ont été enfermés dans un capotage métallique, pour les protéger du vandalisme (problème du "maillon faible" dans les structures en traction).

3.6.5. Intégration architecturale

Comme tout élément oblique implanté dans le sol, les colonnes inclinées posent potentiellement un problème de praticabilité. Deux voies permettent d'apporter des solutions. Une première consiste à orienter le flux de passage parallèlement au plan d'inclinaison de la colonne.



Figure 3.6.4.1.^{liv}

Exemple : *Casa da Musica* à Porto (OMA, 2005). Le pied de la colonne inclinée est combiné avec un escalier. Ce dernier force un déplacement parallèle à la colonne, et plus bas, on peut se déplacer transversalement mais la différence de hauteur rend le gabarit moins dangereux.

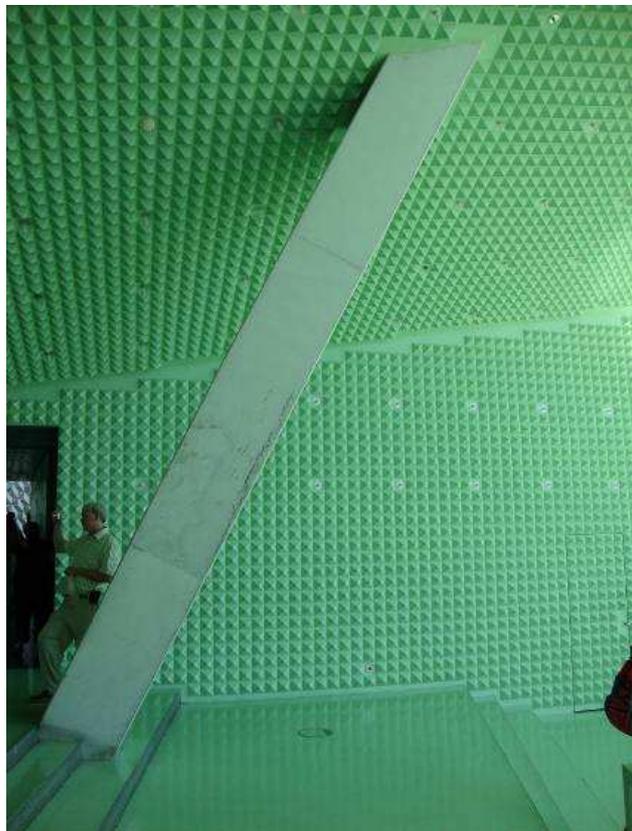


Figure 3.6.5.1.^{lv}

Une seconde voie consiste à mettre en place un dispositif qui empêche les usagers de circuler à proximité du pied de la colonne inclinée.

Exemple : ambassade d'Italie à Brasilia (Nervi, 1969-1979). En rez, les poteaux arrivant des étages sont réunis en pyramide inversée ("branches"). Le pied est entouré d'un simple creux peu profond, qui écarte la circulation de la zone de gabarit insuffisant. Modeste mais efficace...

On peut aussi placer un revêtement de sol peu engageant, comme du gravier.



Figure 3.6.5.2.^{lvi}

Cependant, on peut regretter qu'en général, cette zone ne corresponde à rien dans l'usage de cet espace. Une approche inverse consiste à rehausser le sol dans cette zone pour en empêcher l'accès ; au moins est-il possible d'en faire une assise.

Exemple : halle Honnorat à la gare de Marseille-Saint-Charles (Jean-Marie Duthilleul, 2007). Une zone de non-circulation est délimitée par un tube métallique, qui peut aussi servir d'assise (même si c'est inconfortable).



Figure 3.6.5.3.^{lvii}

Dans le cas particulier des colonnes croisées, si elles sont implémentées à l'échelle réduite d'un seul étage du bâtiment, alors il est impossible de passer entre elles, et il y a moins de risques de chocs qu'avec des colonnes inclinées isolées. Sur une plus grande hauteur, par contre, des dispositions similaires à celles ci-dessus doivent être prises.

Exemple : parc de stationnement *Voestalpine* à Linz (Autriche) par x Architekten (2008). L'adoption de colonnes croisées fait écho aux diagonales de la façade derrière. En revanche, le simple massif de béton positionné entre leurs pieds pour empêcher le passage ne trouve pas d'autre usage et n'est donc guère inspirant.



Figure 3.6.5.4.^{lviii}

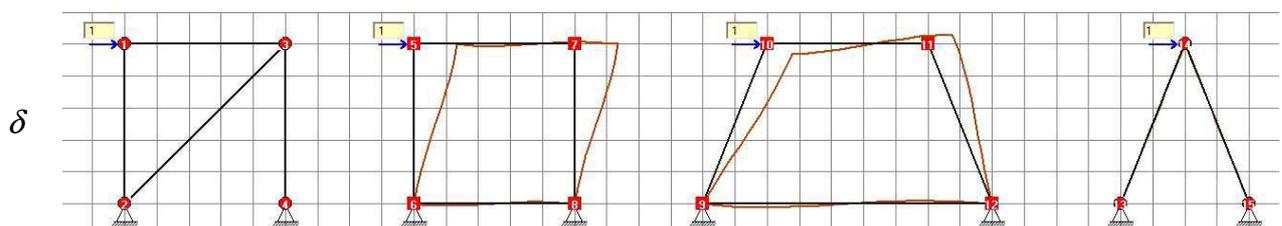
3.7. Comparaison des efficacités des différentes morphologies

Il est assez évident que le diaphragme, par la grande quantité de matière qu'il oppose au contreventement, est la morphologie la plus efficace.

Ensuite, il reste à comparer :

- la diagonale – à laquelle se résume la croix de câbles (hors précontrainte), une fois chargée, puisque l'un d'entre eux devient inactif ;
- les nœuds encastrés ;
- les colonnes inclinées, dans leur cas général en trapèze et celui particulier par exemple en V inversé.

Étudions le résultat.



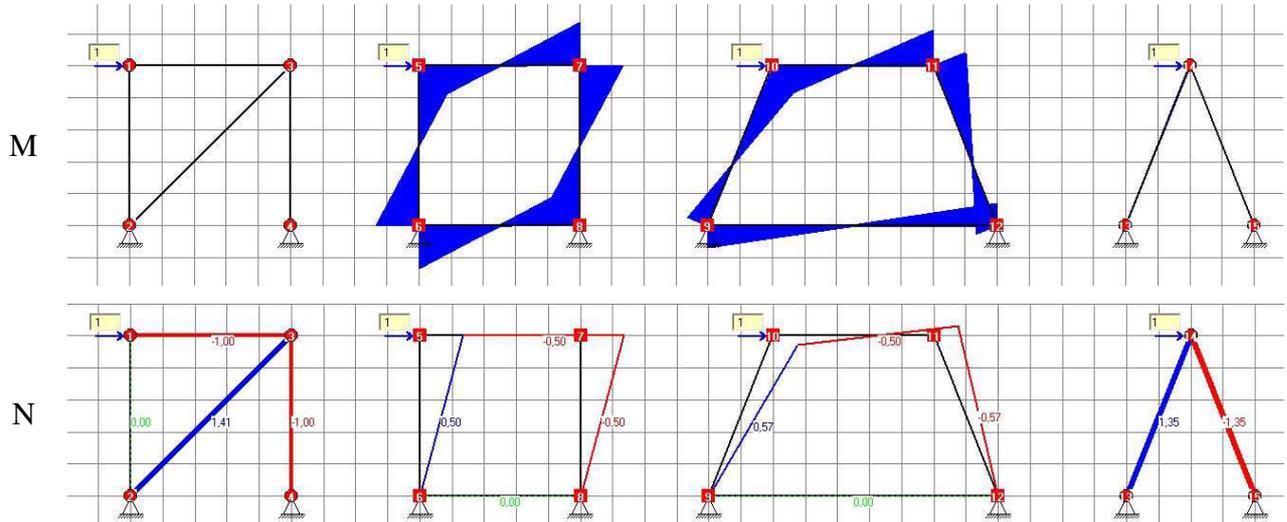


Figure 3.7.1.

On observe la supériorité indéniable de la diagonale et du V (inversé ou non, en fait), et on retrouve le petit avantage des colonnes inclinées sur l'ossature rigide standard. En pratique, plus la charge et la hauteur de la maille est importante, plus il faut se diriger vers les morphologies les plus efficaces.

4. Disposition sur l'ensemble d'une structure

4.1. Généralités

On peut distinguer :

- la disposition d'éléments de contreventement dans le plan ;
- la disposition d'éléments de contreventement sur la hauteur du bâtiment ;
- la disposition d'éléments de contreventement sur la longueur du bâtiment.

Détaillons-les séparément.

4.2. Disposition dans le plan

On peut extrapoler ce qu'on avait vu en début de chapitre sur une maille isolée : dans tout étage d'un bâtiment, en supposant que les deux dalles qui le délimitent agissent comme des diaphragmes, on a besoin de 3 plans verticaux de contreventement qui ne soient ni parallèles ni concourants. Souvent, un tel ensemble est déjà trouvé sous une forme compacte dans les cages de circulation verticale : ascenseur, escaliers, gaines techniques ; on parle de *noyau*. Parmi les noyaux potentiels, on peut aussi envisager les sanitaires, car eux aussi vont de pair avec une gaine verticale, dans ce cas pour l'évacuation des eaux usées ; de plus, le diaphragme peut contribuer à une isolation acoustique de ces sanitaires.

Ensuite se pose la question de la position de ce noyau dans le plan. En fait, la dalle peut être assimilée à une poutre horizontale, appuyée sur le noyau (et les éventuels autres dispositifs de contreventement) et chargée par le vent. Dans ces conditions, une position excentrée du noyau va mener à d'importants efforts de torsion autour de son axe. Dès lors, "[p]our beaucoup de structures hautes, une solution idéale est de positionner la cage au centre."¹⁵

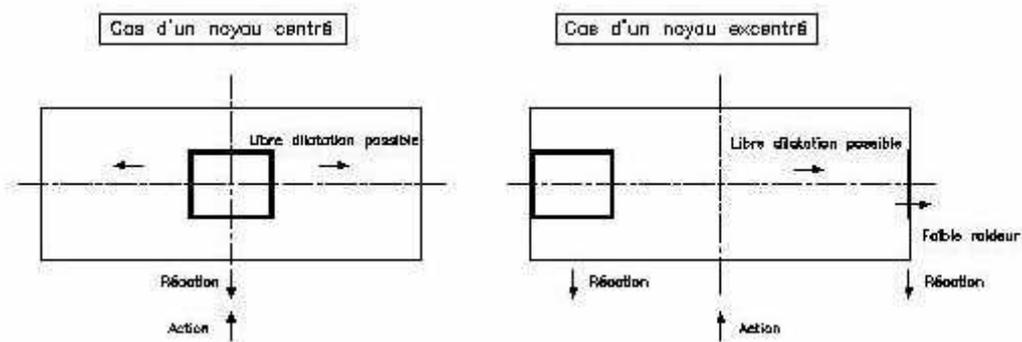


Figure 4.2.1.^{lix}

¹⁵ (Hilson, 1993), p. 27 (traduction personnelle).

Cependant, on peut désirer décentrer le noyau, afin de conserver un espace libre assez important à chaque étage. Dans ce cas, pour éviter la torsion susmentionnée, il faut ajouter un plan de contreventement à l'autre extrémité de l'étage, pour fournir un "appui" supplémentaire à la "poutre" et lui permettre de reprendre aisément la "charge"¹⁶.

Exemple : *Torre Agbar* à Barcelone (Jean Nouvel, 2005). Le noyau est décentré pour permettre une plus grande flexibilité d'usage de l'étage, dépourvu de colonnes. La façade porteuse en béton armé procure le refend nécessaire à gauche pour compenser ce décentrement du noyau. Pour autant, le dégagement de l'espace n'a pas été apprécié par les locataires : *"Tenants have complained that the tower's donut-shaped floorplan is awkward and the central lift shaft blocks sightlines between co-workers."*¹⁷

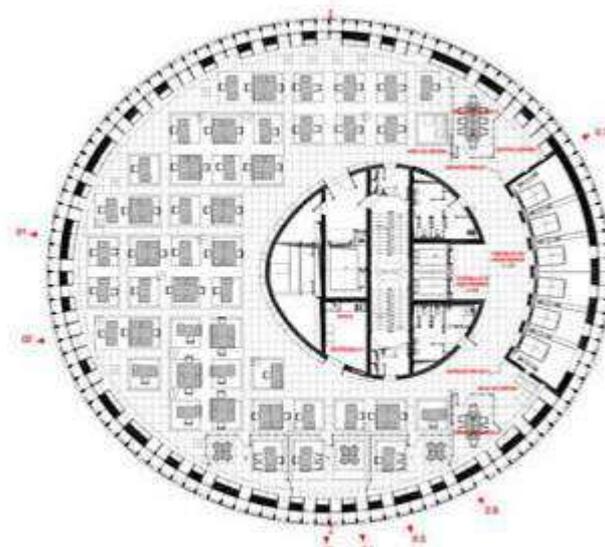


Figure 4.2.2.^{lx}

Dans le cas où l'on exploite plusieurs noyaux, il faut prendre garde au fait que cela risque d'empêcher la libre dilatation de la dalle suite aux changements de température, et donc d'y engendrer des fissures. La solution consiste à prévoir sur un des noyaux un joint périphérique qui permet à la fois la libre dilatation et au noyau de jouer son rôle de contreventement dans la direction perpendiculaire à la dilatation, comme le mur de refend dans le cas précédent.

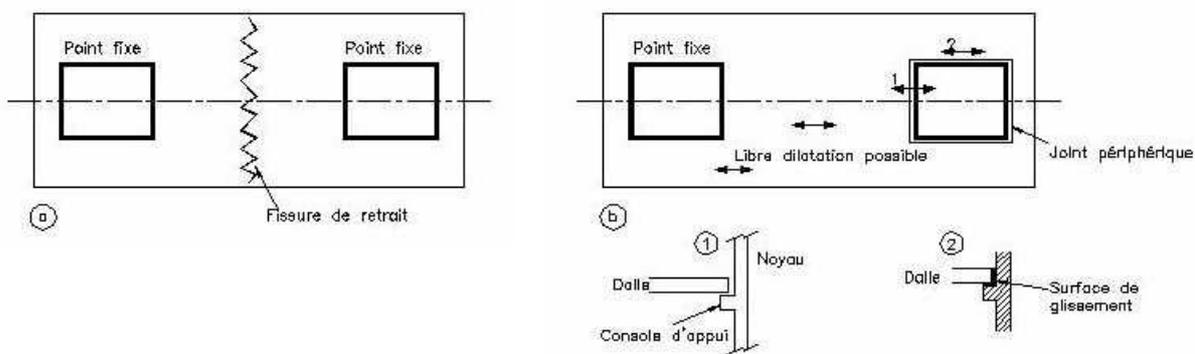


Figure 4.2.3.^{lxi}

¹⁶ (Hilson, 1993), p. 27.

¹⁷ www.dezeen.com/2017/01/18/impracticality-drives-tenants-jean-nouvel-barcelona-skyscraper-torre-agbar-spain/, au 18/1/2017.

Enfin, en ce qui concerne le choix de la position dans le plan de ces deux zones d'"appui", les écarter au maximum instaure certes le plus grand bras de levier possible, ce qui diminue les efforts engendrés dans ces "appuis" ; par contre, ce n'est pas optimal pour la dalle faisant office de diaphragme entre eux (cf. les règles de positionnement idéal des appuis des poutres) : laisser des "porte-à-faux" de chaque côté serait plus favorable. En pratique, un compromis doit être trouvé entre ces deux logiques contradictoires.

4.3. Disposition sur la hauteur du bâtiment

"Il n'est pas nécessaire que la position des 3 murs de refend soit la même à chaque étage. Le transfert de cisaillement au travers de chaque étage peut être traité comme un problème isolé. Un arrangement différencié est montré à la figure [ci-contre].

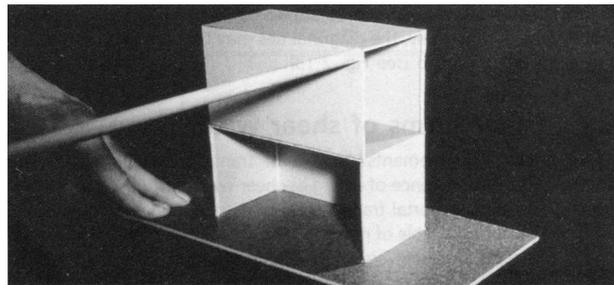


Figure 4.3.1.^{lxii}

Cependant, un arrangement répétitif est plus pratique à adopter, particulièrement lorsque des murs sont utilisés, car le poids des murs supérieurs est repris par ceux dessous. [Par ailleurs, e]n descendant le long du bâtiment, le cisaillement cumulé à transférer à travers un étage augmente, bien sûr."¹⁸

S'il y a un décalage entre étages comme à la figure ci-dessus, une condition de bon fonctionnement est que "les diagonales se touchent", même si elles se développent dans des plans différents.

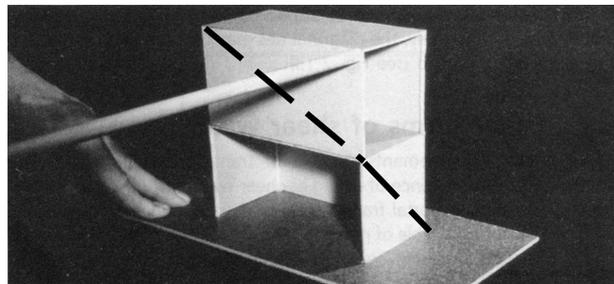


Figure 4.3.2.

¹⁸ (Hilson, 1993), p. 27 (traduction personnelle).

4.4. Disposition sur la longueur du bâtiment

Dans un premier temps, on pourrait penser qu'il est nécessaire ou avantageux de contreventer toutes les mailles sur la longueur d'une ossature. Cependant, on obtiendrait alors une structure trop hyperstatique¹⁹.

Contre-exemple : bâtiment "Europa" à Bruxelles (Samyn, 2016). Toutes les mailles de la façade sont contreventées. C'est peut-être lié aux réglementations anti-attaques terroristes développées après le 11 septembre 2001, et qui ont profondément impacté la conception de l'enveloppe de ce bâtiment destiné à accueillir les dirigeants européens et mondiaux.



Figure 4.4.1.^{lxiii}

En fait, "à condition que les sommets de chaque baie soient interconnectés, il n'est pas nécessaire de contreventer chacune d'entre elles."²⁰ En pratique, on peut ne contreventer qu'approximativement une maille sur 5. "Cette manière de faire est préférable à contreventer tous les panneaux non seulement parce que c'est moins cher, mais aussi parce que cela produit une structure plus flexible qui est capable de s'accommoder de variations de température sans les contraintes additionnelles qui auraient lieu dans un structure plus rigide."²¹

Exemple : pavillon "Atelier Leffe" aux Plaisirs d'Hiver à Bruxelles (2016), déjà montré au point "Diagonales".

Exemple : étançonnage d'un bâtiment à Lisbonne (voir page suivante). Seule une travée verticale sur les 5 (principales) est contreventée, par des croix.

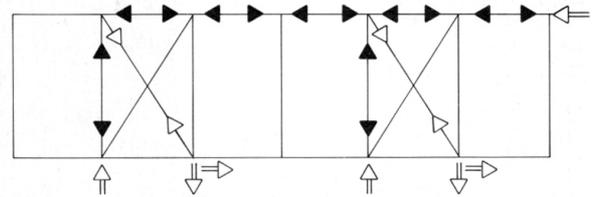
¹⁹ *Ibid.*, p. 30.

²⁰ *Ibid.*, p. 27 (traduction personnelle).

²¹ *Loc. cit.*

Figure 4.4.2.^{lxiv}

"Un arrangement typique est montré à la figure [suivante] où les avant-dernières baies d'une série sont contreventées. Le cisaillement à transmettre sera transmis par les nœuds et partagé de manière égale entre les deux panneaux contreventés."²²

Figure 4.4.3.^{lxv}

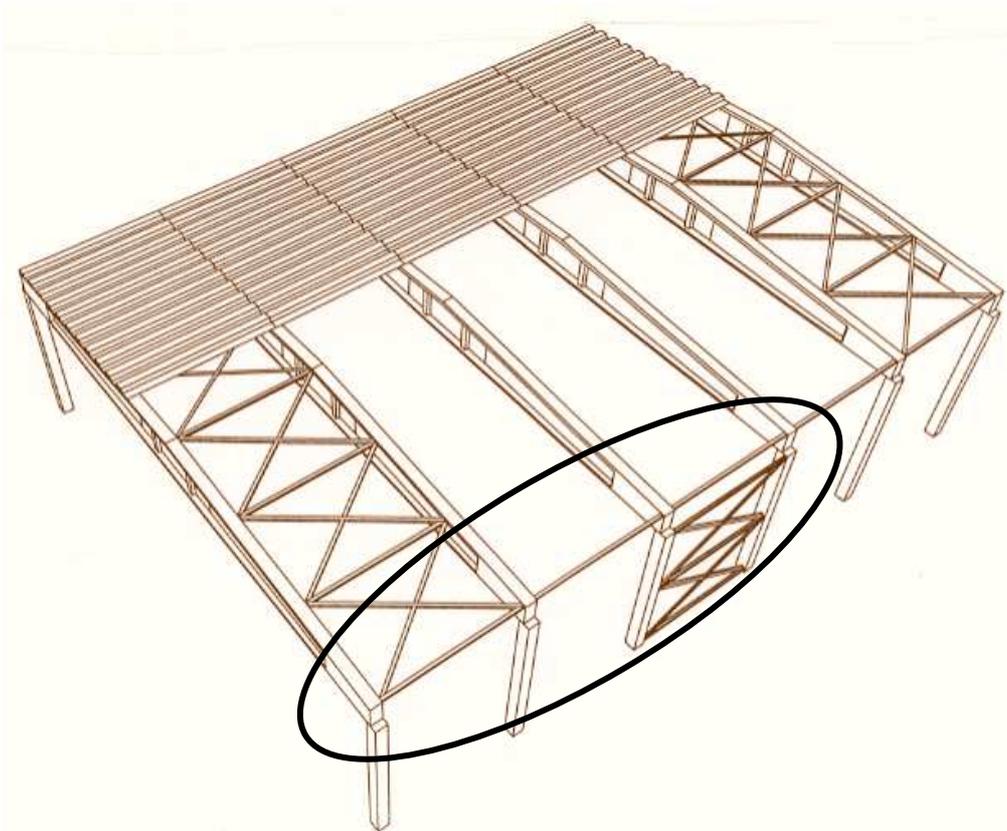
On retrouve la logique évoquée plus tôt, qu'il faut essayer de placer les contreventements comme des appuis pour une poutre, en ménageant si possible des "porte-à-faux".

4.5. Combinaison entre les différents plans de contreventement

Comme déjà suggéré, il faut qu'on puisse trouver une continuité des éléments de contreventement du pied d'une façade jusqu'au pied de celle opposée, en passant par des plans horizontaux (planchers ou toit).

Contre-exemple : bâtiment métallique industriel type. Il y a une disjonction entre les contreventements dans la toiture et ceux dans les façades longitudinales. Cela engendre une plus grande déformabilité, qui devra être compensée par un surdimensionnement de la structure.

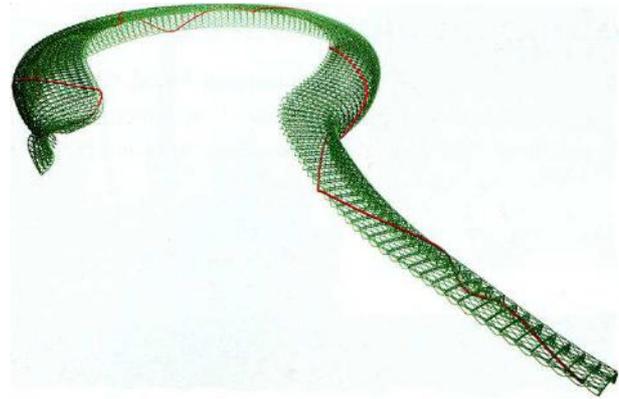
²² *Loc. cit.*

Figure 4.5.1.^{lxvi}

Cela peut revenir à *grosso modo* "torsader" une ossature.

Exemple : stade Kaohsiung à Taïwan (Toyo Ito, 2009). "L"anneau oscillant" est un élément qui s'enroule de manière continue autour des surfaces supérieure et inférieure du groupe de treillis en porte-à-faux [...], exprimant le concept de design d'une forme continue spiralée. L'anneau oscillant (tubes en acier de 318,5 mm de diamètre), arrangé à des intervalles de 2,5 à 3,5 m, est un élément tendu qui relie les groupes de porte-à-faux. Il fonctionne comme un élément de contreventement pour transmettre les forces horizontales dues aux charges de séisme ou de vent, en maintenant la raideur planaire du toit. [... De cette manière,] il a été possible de minimiser les sections des membres et de réduire le poids total du toit."²³ Cette morphologie, dérivée de la croix de Saint-André, donne à la toiture un aspect d'écaillés ; associée au plan ouvert et sinueux, elle confère au projet l'allure d'un dragon, figure positive dans la culture locale.

²³ WATANABE Hideyuki *et al.*, "Structural Design of Kaohsiung Stadium, Taiwan", Structural Engineering International, n°1, vol. 23, février 2013, p. 76 (traduction personnelle).

Figure 4.5.2.^{lxvii}Figure 4.5.3.^{lxviii}

Remarque : ici l'intégralité des mailles est contreventée. C'est sans doute lié au risque sismique élevé au Japon, qui mène à renforcer le contreventement par rapport aux normes européennes.

4.6. Outil de conception

Une maquette de structure est utile pour sentir si la structure est déjà suffisamment contreventée ou non, et tester des morphologies et leur positions pour remédier au problème.

5. Bibliographie

CHING Francis, ONOUYE Barry & ZUBERBUHLER Douglas, *Building Structures Illustrated*, éd. Wiley, Hoboken, 2014.

GARGIANI Roberto (éd.), *La colonne – Nouvelle histoire de la construction*, éd. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2008.

HILSON Barry, *Basic Structural Behaviour – Understanding Structures from Models*, éd. Thomas Telford, Londres, 1993.

WELLS Matthew, *Skyscrapers – Structure and Design*, éd. Laurence King, Londres, 2005.

Table des matières

Contreventer une structure	1
1. Généralités.....	1
2. Disposition sur un "cube"	6
3. Dispositifs de contreventement d'une maille structurale.....	9
3.1. Généralités.....	9
3.2. Diaphragmes.....	9
3.2.1. Principe.....	9
3.2.2. Proportions optimales.....	12
3.3. Croix de Saint-André	13
3.3.1. Principe.....	13
3.3.2. Modalités	15
3.3.3. Proportions optimales.....	17
3.3.4. Intégration dans l'architecture	17
3.4. Diagonales	18
3.4.1. Principe.....	18
3.4.2. Inclinaison idéale.....	20
3.4.3. Intégration dans l'architecture du bâtiment	21
3.4.4. Comparaison diagonales – croix de câbles.....	24
3.5. Nœuds encastrés	25
3.5.1. Principe.....	25
3.5.2. Modulations.....	25
3.5.3. Intégration architecturale.....	28
3.5.3.1. Généralités.....	28
3.5.3.2. Acier	28
3.5.3.3. Béton armé	29
3.5.3.4. Bois.....	32
3.6. Colonnes inclinées.....	33
3.6.1. Principe.....	33
3.6.2. Disposition croisée	37
3.6.2.1. Généralités.....	37
3.6.2.2. Disposition en X.....	39
3.6.2.3. Disposition en V	40

3.6.3. Proportions optimales.....	41
3.6.4. Cas inversé : suspentes inclinées.....	41
3.6.5. Intégration architecturale.....	41
3.7. Comparaison des efficacités des différentes morphologies	44
4. Disposition sur l'ensemble d'une structure	46
4.1. Généralités.....	46
4.2. Disposition dans le plan	46
4.3. Disposition sur la hauteur du bâtiment.....	48
4.4. Disposition sur la longueur du bâtiment	49
4.5. Combinaison entre les différents plans de contreventement.....	50
4.6. Outil de conception	52
5. Bibliographie.....	53

Iconographie

ⁱ Photographie personnelle, mars 2012.

ⁱⁱ Photographie de Denis Delpire, 2016.

ⁱⁱⁱ <https://structurae.info/ouvrages/john-hancock-center>, au 1-2-2017.

^{iv} (Hilson, 1993), p. 20.

^v (Hilson, 1993), p. 20.

^{vi} (Hilson, 1993), p. 21.

^{vii} (Hilson, 1993), p. 21.

^{viii} Photographie personnelle, novembre 2014.

^{ix} <http://ibois.epfl.ch/page12021.html>.

^x Photographie personnelle, novembre 2014.

^{xi} Photographie personnelle, novembre 2011.

^{xii}

http://3.bp.blogspot.com/_GsSO59irGfQ/TPpzy353VoI/AAAAAAAAAZY/cuQJ428GLJ4/s1600/Herzog%2BDeMeyron%2B12-2-10.jpg au 17-1-2014.

^{xiii} Photographie de Iwan Baan, dans VOYATZIS Costas, "Junya Ishigami's University project space", 13 mai 2008, www.yatzer.com/Junya-Ishigami-s-University-project-space.

^{xiv} Photographie personnelle, au 21-9-2015.

^{xv} (Hilson, 1993), p. 26.

^{xvi} (Hilson, 1993), p. 22.

^{xvii} (Hilson, 1993), p. 23.

^{xviii} <http://kkaa.co.jp/works/architecture/komatsu-seiren-fabric-laboratory-fa-bo/>, au 11-4-2016.

^{xix} Photographie personnelle, janvier 2013.

^{xx} Photographie personnelle, septembre 2016.

^{xxi} Photographie personnelle, novembre 2012.

^{xxii} Photographie personnelle, septembre 2014.

^{xxiii} Photographie personnelle, juillet 2009.

^{xxiv} (Ching, 2014), p. 209.

^{xxv} Photographie personnelle, janvier 2017.

^{xxvi} www.facebook.com/Leffe.be/photos/a.617194358480642.1073741841.199312043602211/617194875147257/?type=3&theater, au 31-1-2017.

^{xxvii} Photographie personnelle, janvier 2017.

^{xxviii} (Ching, 2014), p. 209.

^{xxix} Photographie personnelle, janvier 2017.

^{xxx} Cours de Michel Provost, ULB Architecture, 2016.

^{xxxi} Photographie personnelle, mai 2016.

^{xxxii} Photographie personnelle, avril 2016.

^{xxxiii} Photographie personnelle, février 2008.

^{xxxiv} Photographie personnelle, mars 2009.

-
- ^{xxxv} Photographie personnelle, juin 2016.
- ^{xxxvi} Photographie personnelle, juillet 2016.
- ^{xxxvii} Photographie personnelle, novembre 2013.
- ^{xxxviii} Site de la Fondation Le Corbusier, www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysId=13&IrisObjectId=5972&sysLanguage=en-en&itemPos=103&itemSort=en-en_sort_string1+&itemCount=215&sysParentName=&sysParentId=65, au 8-3-2016.
- ^{xxxix} www.swankysystems.jp/photos/ct-074main.jpg, au 11-12-2015.
- ^{xl} www.charpentes-fourmier.fr/nos-realisations/garage-automobile-le-poir-sur-vie-85, au 15-5-2017.
- ^{xli} Photographie personnelle, novembre 2012.
- ^{xlii} www.vitra.com/fr-be/living/product/details/a-table, au 18-1-2017.
- ^{xliii} Photographie personnelle.
- ^{xliv} <http://ludmillacervenyphotographe.tumblr.com/post/155714847555/la-cambre-horta-bruxelles-2016-reportage>, au 17-01-2017.
- ^{xlv} Page relative au projet sur le site de l'ingénieur, www.ney.be/en/projects_details/9.html, au 18 janvier 2012.
- ^{xlvi} Page relative au projet sur le site de l'ingénieur, www.ney.be/en/projects_details/9.html, au 18 janvier 2012.
- ^{xlvii} www.ney.be/fr/show.php?img=111_1grd.jpg.
- ^{xlviii} www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2000-/2000-p_04/4-800.jpg, au 18-1-2017.
- ^{xlix} Photographie personnelle, mars 2009.
- ^l www.brandveiligmetstaal.nl/upload/Image/Kantoren-Draagconstructies/Afbeelding%20011.jpg.
- ^{li} Illustration transmise par l'architecte, 2016.
- ^{lii} <https://samynandpartners.com/portfolio/nmbs-train-station-canopy>, au 2-2-2017.
- ^{liii} www.pblondel.be, au 2-2-2017.
- ^{liv} Photographie personnelle, mars 2009.
- ^{lv} Photographie personnelle, juin 2009.
- ^{lvi} OLMO Carlo & CHIORINO Cristiana (éd.), *Pier Luigi Nervi – L'architecture comme défi*, éd. Silvana, Milan, 2010, p.198.
- ^{lvii} Photographie personnelle, novembre 2011.
- ^{lviii} www.xarchitekten.com.
- ^{lix} Cours de Michel Provost à la Faculté d'Architecture de l'ULB, 2015-2016.
- ^{lx} www.arcspace.com/features/ateliers-jean-nouvel-/torre-agbar/, au 31-1-2017.
- ^{lxi} Cours de Michel Provost à la Faculté d'Architecture de l'ULB, 2015-2016.
- ^{lxii} (Hilson, 1993), p. 26.
- ^{lxiii} <https://samynandpartners.com/portfolio/new-headquarters-of-the-council-of-the-european-union>, au 31-1-2017.
- ^{lxiv} Photographie personnelle, juin 2016.
- ^{lxv} (Hilson, 1993), p. 27.
- ^{lxvi} Cours de Michel Provost à la Faculté d'Architecture de l'ULB, 2015-2016.
- ^{lxvii} www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2005-/2005-p_15/2-800.jpg au 17-5-2013.

^{lxviii} WATANABE Hideyuki *et al.*, "Structural Design of Kaohsiung Stadium, Taiwan", *Structural Engineering International*, n°1, vol. 23, février 2013, p. 76.
