

Faculty of Science and Technology
Department of Architecture

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المعمارية

Polycopié de cours de la matière « Construction 1 »

Document établi par :

TAIBI Sofiane, MCB, FST de Mostaganem

Document expertisé par :

DJERADI Mustapha Ameer, MCA, département d'architecture de la FST de Mostaganem

AICHE Boussad, MCA, département d'architecture de l'UMM Tizi Ouzou

Sofiane TAIBI
Construction I



Table des matières

| | |
|---|----|
| I. Sollicitations | 12 |
| 1. Actions sollicitant un bâtiment..... | 12 |
| 2. Forces et ensemble de forces | 22 |
| 3. Solliciter/contraindre | 26 |
| 4. Equilibre de plus de deux forces dans un plan | 29 |
| 5. Liaisons et contreventements | 30 |
| II. Conception d'une structure..... | 34 |
| 6. Adaptation au sol : fondations superficielles et profondes | 34 |
| 7. Structures et éléments structuraux de l'édifice : éléments porteurs..... | 40 |
| 8. Rôles, sollicitations et déformations des éléments de la structure..... | 47 |

Préambule

Ce polycopié regroupe les cours enseignés durant le premier semestre de la formation en construction des étudiants de License II, filière architecture. Nous souhaitons à travers ce travail, en attirant l'attention sur le sens des mots, et en reprenant de grands maîtres bâtisseurs, architectes et ingénieurs confondus, porter un regard nouveau – du moins oublié - sur ce que signifie la construction. Selon François Auguste Choisy : « *le mot architectura est synonyme de science appliquée ; et l'architecture se partage en trois grandes divisions : Les édifices ; La gnomonique ; La mécanique. Le représentant d'un art si complexe, l'architecte, doit être initié aux connaissances suivantes : La géométrie pour dresser les projets ; Le calcul, pour évaluer les dépenses ; L'hygiène, pour assurer la salubrité des habitations ; L'astronomie et la musique, au point de vue des orientations et de l'acoustique ; Les lettres ; au point de vue de l'histoire de l'art ; Enfin la philosophie, au point de vue des devoirs : à ce sujet, Vitruve pose des préceptes qui sont un véritable code de la morale professionnelle* » (1909).

« *La construction est une science ; c'est aussi un art, c'est-à-dire qu'il faut au constructeur le savoir, l'expérience, et un sentiment naturel. On naît constructeur ; la science que l'on acquiert ne peut que développer les germes déposés dans le cerveau des hommes destinés à donner un emploi utile, une forme durable à la matière brute. Il en est des peuples comme des individus : les uns sont constructeurs dès leur berceau, d'autres ne le deviennent jamais ; les progrès de la civilisation n'ajoutent que peu de chose à cette faculté native. L'architecture et la construction doivent être enseignées ou pratiquées simultanément : la construction est le moyen ; l'architecture, le résultat* » (Viollet-le-Duc, 1854).

Choisy et Viollet-le-Duc, mais aussi Frank Lloyd Wright, Louis Khan, Kenzō Tange, Tadao Andō, Glenn Murcutt, Peter Zumthor, Hassan Fathy, Diébédo Kéré, etc., s'accordent tous sur le fait qu'architecture et construction sont synonymes. Pour nous, ce qui compte à travers nos cours, en plus d'inculquer aux apprenants les propriétés de la matière et ses possibilités constructives, et de mettre l'accent sur la dimension esthétique que prend l'acte de bâtir, et où il s'agit de faire « l'extraordinaire » avec « l'ordinaire », car « *L'architecture est un instrument de résistance à la banalisation du moderne* » (Botta, 2018). Ainsi, c'est avec les matériaux du quotidien, inscrits dans la réalité de la société algérienne, que nous devons apprendre à sublimer l'acte de bâtir, en sortant de nos habitudes constructives lesquelles sont nées d'une période axée sur l'urgence. Il s'agit également d'accompagner l'étudiant à développer un regard pragmatique de l'acte de bâtir ; de lui permettre de se défaire des tendances des dernières années à prendre pour modèle des architectures de prestige, expressives de notre ère où l'architecture est devenue un produit de consommation, et dont le destin n'est pas de durer.

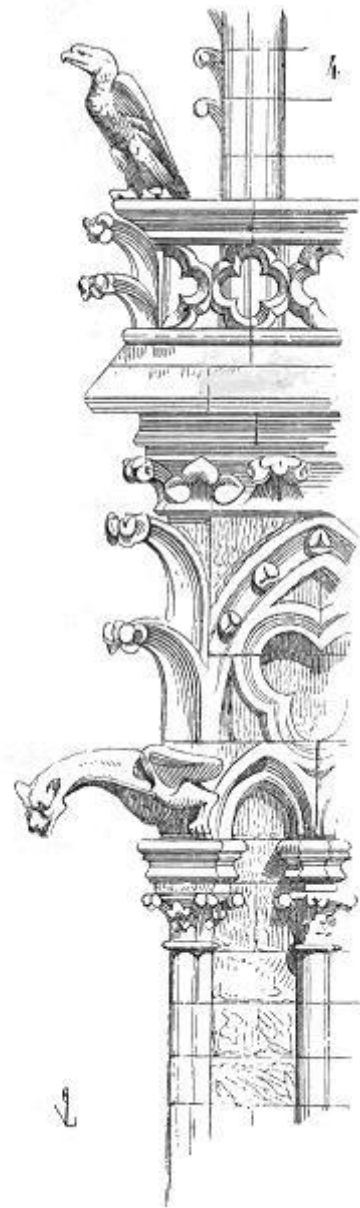
Chaque page de ce papier est conçue sur le principe de la chiralité. À gauche, des mots, et à droite des images. Les mots, du latin *muttum* (grognement, son), transposent ce qu'il y a de plus subtile, en l'occurrence la parole, en la forme de caractères noirs couchés sur un fond blanc. L'image, anagramme de « magie », vient appuyer le texte selon la compréhension de chacun et son épanouissement intellectuel. Dès lors, nous avons jugé bon de n'intituler ni sourcer aucune de ses représentations, laissant au lecteur la liberté de mettre les mots qu'il voudra sur chacune d'elles. Toutes les illustrations sont tirées de Google image. L'application gratuite **Google AI**, disponible sur ordinateurs et smartphones, permettra en quelques secondes de retrouver la provenance de chaque figure, dans la langue où le lecteur se sent le plus à l'aise. Enfin, une série de définitions tirées pour la plupart du dictionnaire raisonné de l'architecture d'Eugène Viollet-le-Duc, accompagne la fin de ce document.

Principes généraux de la construction

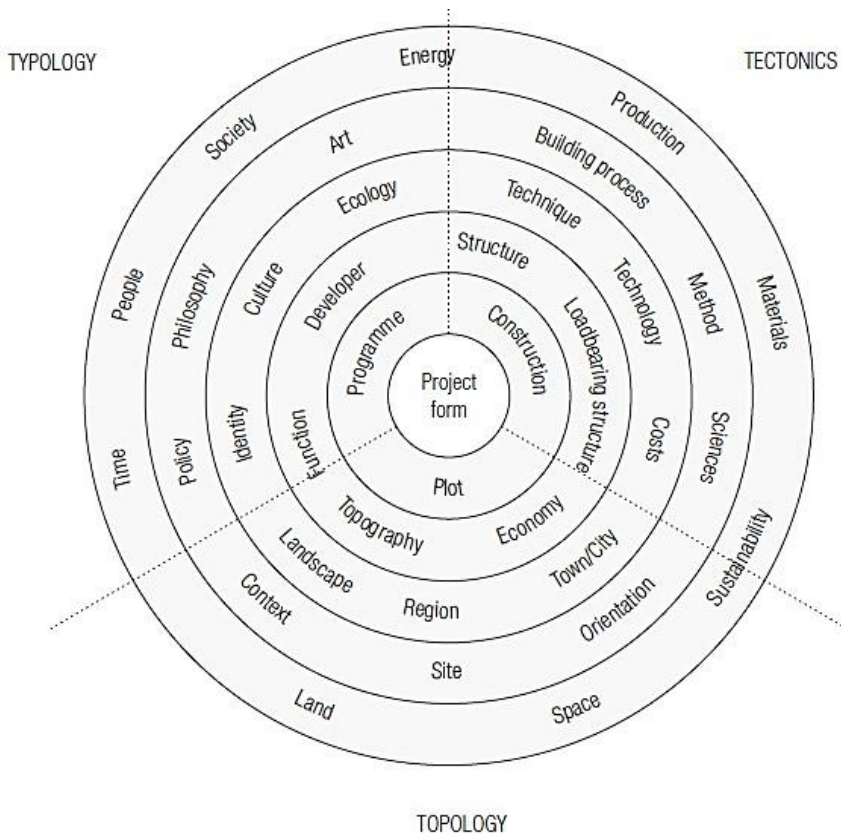
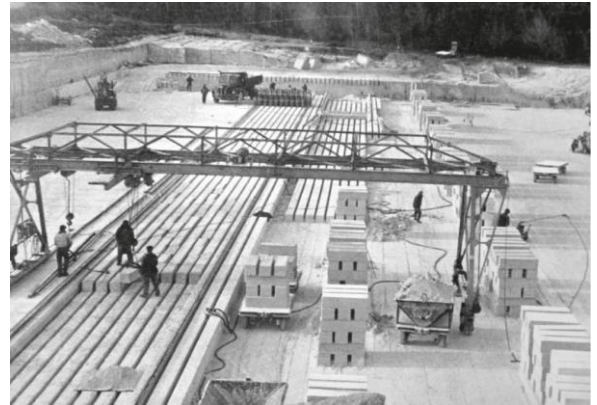
Introduction

Une architecture expressive et puissante, née d'un processus de conception élégant, clair et organisé, ne peut voir le jour qu'en étroite liaison avec un concept ou une idée, laquelle doit fondamentalement être aussi claire, ordonnée, complexe mais non compliquée, à l'image de la Nature. C'est à travers ce processus que les fragments et divers composants structurels du bâtiment, initialement indépendants les uns des autres, sont disposés de sorte à former un corps organisé complet et une « Architecture ». Dès lors, les fragments et le tout matérialisés par l'édifice, se complètent et s'influencent mutuellement. C'est le passage de la construction en tant que métier, à l'architecture en tant qu'art, de l'assemblage à la tectonique.

Cette nuance, difficile à saisir à premier abord, est pourtant essentielle dans la formation du futur architecte. En effet, il ne s'agit plus de décrire les techniques de construction en tant que profane, à l'image de la littérature courante – certes pertinente mais axée principalement sur les technologies - qui ne fait que relater les méthodes employées au cours de la réalisation d'un ouvrage quelconque, mais de chercher le « sens » dans l'emploi des matériaux et techniques au service d'une idée « organisatrice ». Les exigences techniques des matières premières et des composants sont constamment vérifiées au regard de leur effet architectural. « Du bruit jaillit la musique ».

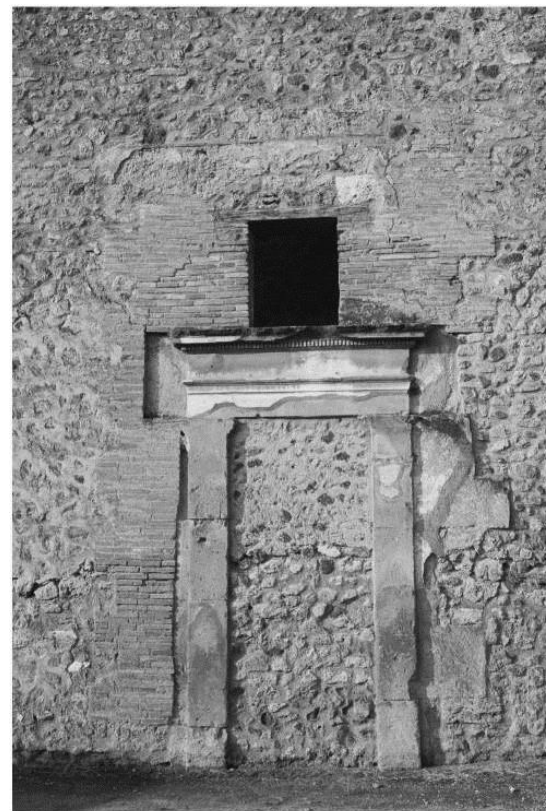
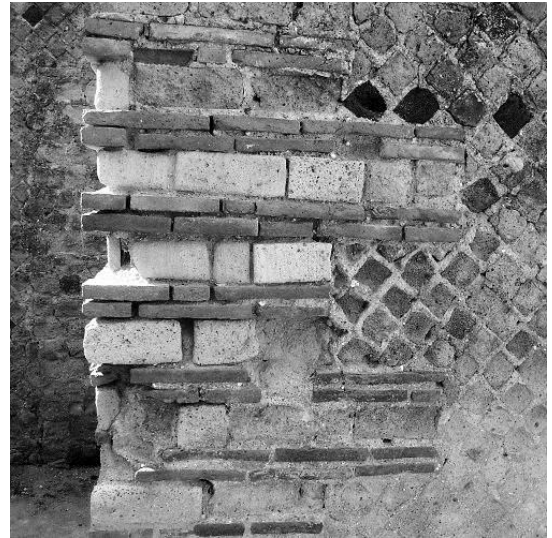


À terme, la forme architecturale n'est plus perçue comme un but à atteindre mais comme un résultat de différentes phases et méthodes, laquelle n'est là que pour en marquer la réussite ou l'échec : ce sont les concepts, les processus et les systèmes. Le terme « concept » décrit les modalités organisationnelles et de composition des espaces et de l'édifice. Ce sont des procédures d'analyse et d'interprétation qui se sont avérées particulièrement efficaces et utiles à travers l'histoire, lors du développement des méthodes de construction. Les « processus » sont les mesures préparatoires antérieures au démarrage des travaux de construction, intégrant également les modalités spécifiques de montage sur chantier. Enfin, les « systèmes » font référence aux techniques et différents assemblages des matériaux en tant que matières premières, pour former des modules (ex. murs, colonnes ou cellules) et composants, lesquels étant au service du concept du projet forment des ensembles cohérents, élégants et structurellement viables.



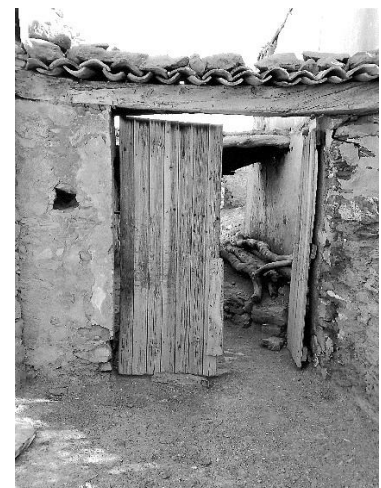
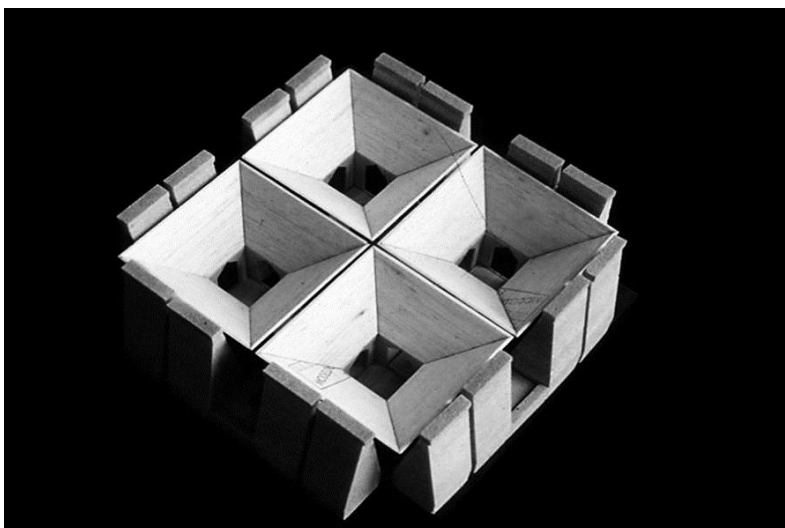
L'architecte Christoph Elsenner, propose un enchevêtrement entre ces trois principes et trois autres, lesquels présentent des articulations multiples sur lesquelles peut s'accorder le plus grand nombre, et desquels est produite la forme d'un bâtiment. Ce sont en anglais *Tectonics*, *Topology* et *Typology*. De même que dans un diagramme synthétique, Elsenner propose pour chaque terme d'autres mots clés et proches synonymes. *Tectonics* ou Tectoniques, faisant référence à la stratification et aux assemblages dans leur acception la plus noble, est accompagné de termes tels que Matériaux, Pérennité, Méthodes, Structures porteuses, Coûts, etc. Il s'agit des différents aspects techniques entrant dans le processus de mise en œuvre d'un projet d'architecture, du choix technique et esthétique des matières à usiter et de leur emploi dans l'élévation de structures élégantes, et espaces répondant avec conformité à une fonction.

En second lieu, c'est la localisation de l'édifice à réaliser qui est sous-entendue par le terme *Topology*. Topos, du grec ancien, signifiant l'emplacement, est bien évidemment déterminant dans la formalisation d'une architecture. Des termes tels que *Land*, *Space*, *Town*, *Orientation*, *Topography*, nous permettent d'en saisir le sens.



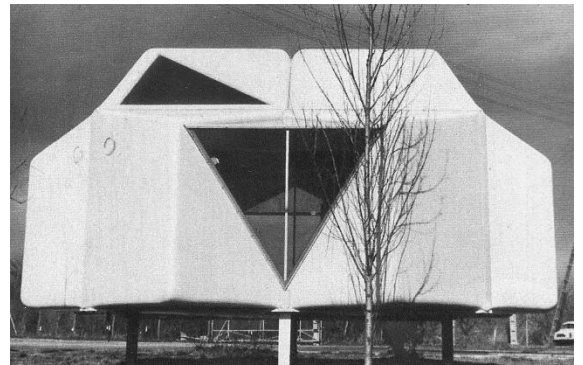
Pareillement, et ce avant la révolution industrielle, c'est le lieu de réalisation d'un bâtiment qui déterminera en majeure partie le résultat quant à sa forme, en fonction de la géologie du lieu, de sa végétation, de son climat, et des procédés mis en place pour transformer les matières premières à extraire in-situ, du moins pour ce qui se rapporte à l'architecture civile, pour en faire des appareils ou modules à assembler en structures porteuses. Les édifices ou espaces à agencer sont également orientés suivant l'axe héliotropique et les ouvertures et leurs dimensions sont calculées pour accueillir air et lumière naturels, etc.

Extumus, le terme *Typology* et où sont intégrés des concepts tels que *Time, People, Society, Identity, Ecology, Culture, Philosophy, Art, Programme*, fait appel à la mémoire et considère les prototypes et archétypes émanés de tout ce qu'une civilisation et culture, cristallisent de savoirs et traditions, qui participent entre autre à créer la richesse et diversité des architectures du monde, et auxquels le maître d'œuvre fait appel au cours des étapes de conceptualisation, notamment dans un souci de continuité du lège, et d'intégration au sein des architectures existantes. Les interconnexions de la technicité, de la typologie et du lieu, synthétise assez élégamment les paramètres de formalisation d'un projet d'architecture, de l'idée à la construction.



Sur la longévité du matériau

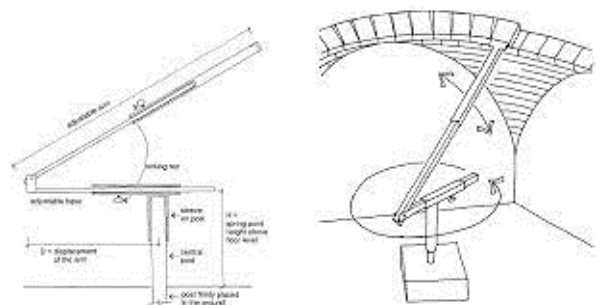
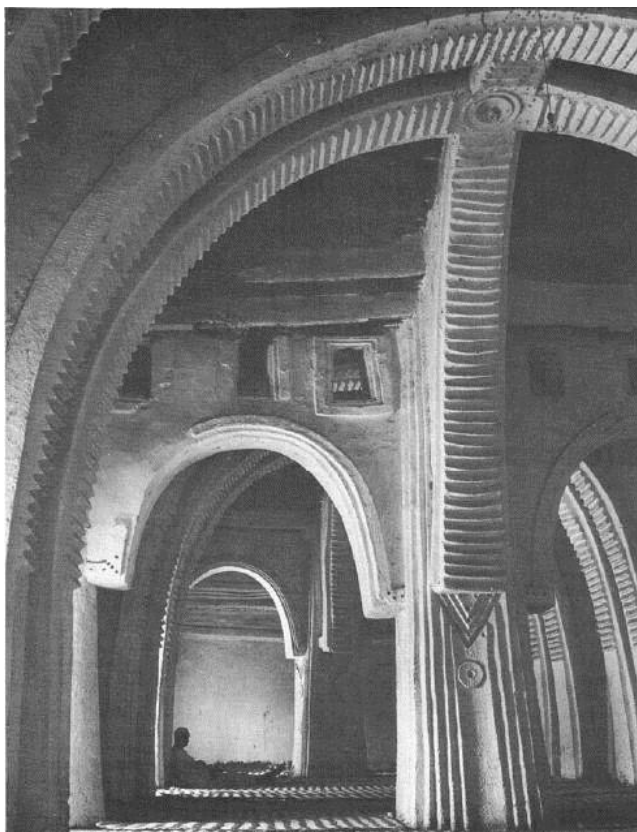
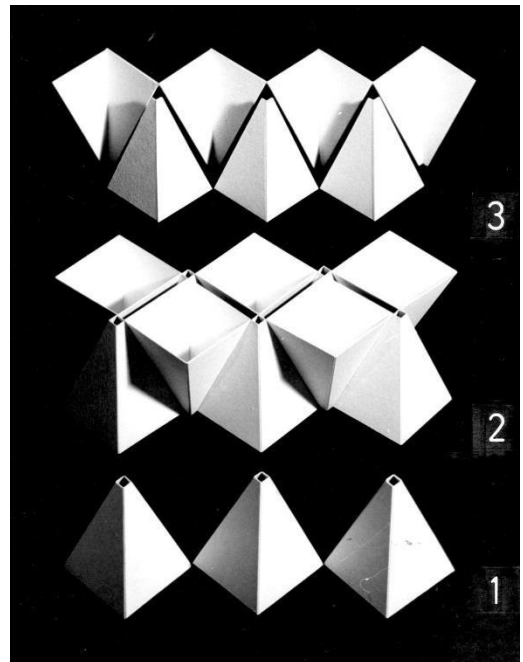
En fonction de l'emprise volumétrique de la structure porteuse au sein de l'édifice, viendront s'adjoindre d'autres éléments de cloisonnement, de parement, de fenestration, de menuiserie, etc. Avec les progrès technologiques des trente dernières années en termes de manufacture et de rapidité de production de tous les éléments qui participent au fonctionnement d'un bâtiment, s'ajoute un paramètre important : leur longévité. En effet, bien qu'il soit séduisant d'utiliser le matériel nécessaire et que ce dernier soit prêt à l'emploi, notre intérêt pour sa durabilité dépendra de nos connaissances en général mais également de notre implication dans le projet, qu'on soit maître de l'ouvrage c'est-à-dire propriétaire direct ou indirect de l'œuvre - et qu'on ait à vivre ou travailler au sein de cette enveloppe, ou au contraire qu'on en soit le concepteur ou encore le constructeur. Dans un monde où l'éthique et la déontologie s'amenuisent face au facteur économique, et à moins d'un sursaut qualitatif, la qualité de nos édifices diminue de plus en plus, pour des questions de rapidité de livraison et de réduction des frais de la construction (Fueg, 1986).



Sachant qu'un bâtiment sera revêtu de l'extérieur mais aussi à l'intérieur, la nature des revêtements variant selon la destination des espaces à occuper (bureaux, logements, salles d'eau, espaces sanitaires, etc.), ce questionnement doit intervenir dans le processus de création de l'architecte. Par exemple, une moquette durera entre 10 et 12 ans alors qu'une céramique selon que son origine soit sédimentaire ou métamorphique, qu'elle soit en terre cuite ou non, variera entre 25 à 50 ans. Un linoléum se dégradera au bout de 25 ans et un parquet au bout de 40 ans. Une peinture ou lasure de qualité, durera entre 15 et 20 ans et un lambris en chêne nécessitera un entretien au bout de 40 ans. Les accessoires électriques (prises, interrupteurs, extracteurs de VMC, etc.) ne dureront pas plus de 12 ans. L'équipement au sein de l'édifice devra également être pris en considération. Une baignoire de qualité pourra être utilisée jusqu'à 50 ans, un meuble de salle de bain 25 ans et un lavabo en céramique 50 ans. Une serrure de porte extérieure durera quant à elle 20 ans au maximum (Deplazes, 2005).



Toutes ces informations purement techniques, peuvent être interprétées dans différents langages. Premièrement, c'est la santé des occupants de l'espace qui est à considérer. Un matériau durable ne causera en général pas de problèmes, s'il est ouvert dans des conditions adéquates. Un revêtement plâtre devra être exempt de tout contact avec l'eau ou la vapeur d'eau, alors qu'une pierre offrira beaucoup plus de choix quant à son usage en tant que matériau de structure ou de parement. D'autres paramètres interviendront dans le choix des matières : la couleur et la texture d'un objet, en plus de leur durabilité, seront appréciées dans leur rapport au reste des matériaux et objets participant à la construction de l'espace. Enfin, le bâtiment, à l'image d'un champ ou d'une pratique sociale, est un legs et un héritage. Ce dernier sera transmis de manière plus réduite à sa descendance, ou de universellement à l'humanité. L'humanité s'étant construite uniquement sur la mémoire, la pérennité des architectures est donc essentielle pour la survie de l'homme (Pouillon, 1976).



I. Sollicitations

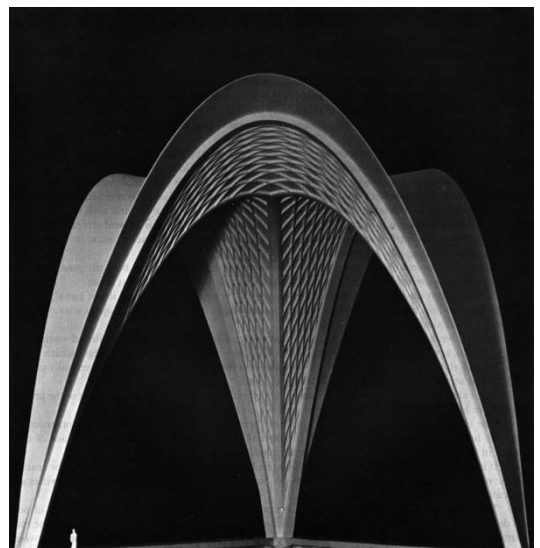
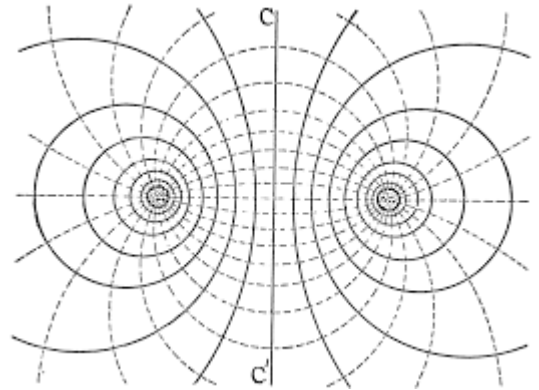
1. Actions sollicitant un bâtiment

La gravitation universelle, manifestée au quotidien, et de différentes manières, impacte l'individu mais également son environnement ; et contrairement aux croyances, la terre n'est pas un aimant géant permanent. Celle-ci au contraire et du fait que son noyau liquide - essentiellement constitué de fer mais aussi de nickel, génère un champ électromagnétique induit par son étoile : le soleil (Wheeler, 2014).

Dès lors, c'est cette loi ou « la gravitation », contraint tout organisme vivant et toute production naturelle ou artificielle.

En construction, les influences causées par le champ gravitationnel sur un édifice et ses organes, le plus généralement horizontaux ou verticaux, seront décomposées en « actions ». Ainsi donc, les vents, les tremblements de terre, le poids de l'édifice, de ses occupants, du mobilier, les variations de température et d'humidité, les impacts, les transformations, etc., déformeront à échelle microscopique voire macroscopique, les composants des différents organes d'une architecture, et diminueront sa longévité.

Il est donc essentiel de s'enquérir des forces invisibles qui contraignent un édifice, d'une part pour prévoir son comportement dans le temps, et d'autre part pour concevoir des formes architecturales qui respectent le vivant (Jorgensen, Lundo, 2006).



1.1. Charges permanentes

Ces charges englobent à la fois les charges de poids propre et celles liées à l'équipement. Elles revêtent souvent une importance considérable par rapport à toutes les autres charges qui agissent sur les structures conventionnelles en béton et en maçonnerie. Cependant, il est possible de réduire leur impact en fonction du matériau utilisé et du concept adopté, que ce soit avec des matériaux tels que l'acier, l'aluminium, voire des métaux spécialisés, des tissus tendus ou des structures à câbles.

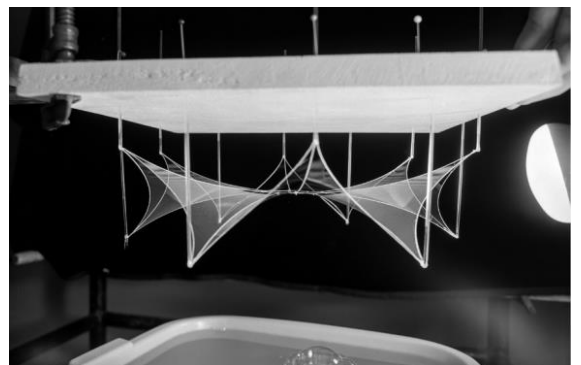


Il convient de noter que le poids peut parfois jouer en faveur de la stabilité dans certains cas, comme pour les murs de soutènement, les barrages, les contreforts et les constructions immergées.



En plus de ces charges, dans la plupart des situations, il y a les charges d'équipement qui s'ajoutent, telles que l'éclairage, le doublage, les écrans acoustiques, le chauffage, la protection incendie et les passerelles d'entretien. Leur poids peut varier de 20 à 100 kg/m² en fonction de la nature et de la densité de ces équipements. Il est essentiel de les déterminer dès les débuts du projet.

Il est également important de souligner que dans les structures conventionnelles, les charges permanentes constituent les charges les plus significatives.



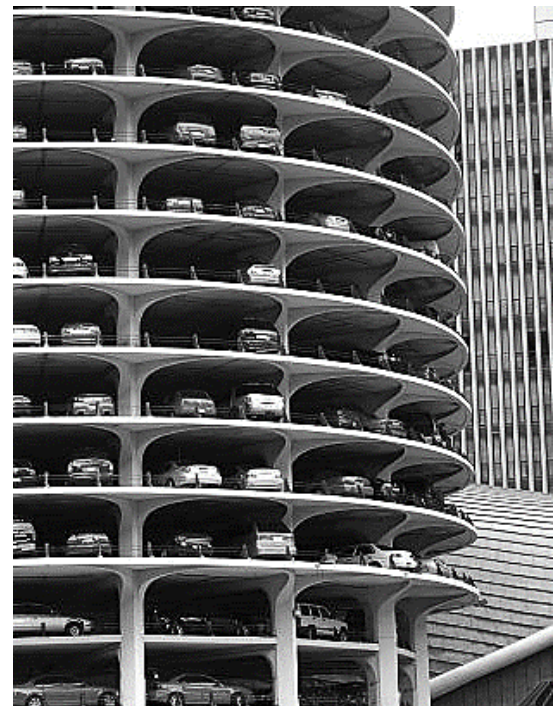
1.2. Charges d'exploitation et autres actions

Les charges directes sont intrinsèquement liées à la fonction des ouvrages. Elles englobent principalement les charges d'exploitation telles que les personnes, le mobilier, le stockage, les foules, les véhicules, les machines, etc. Ces charges sont établies conformément aux normes en fonction de l'usage prévu des espaces, ou directement déterminées par les utilisateurs, comme dans le cas des processus industriels. De plus, ces actions peuvent aussi découler de facteurs externes tels que les forces dynamiques engendrées par les machines en mouvement, les forces de freinage, les crues, ou encore les contraintes dues à la formation de glace (Crémet, 2004).



D'un autre côté, les charges indirectes sont celles pour lesquelles il est difficile de définir dès le début du projet les forces exactes qui les caractérisent. Elles induisent l'apparition de forces internes dans les structures et sont donc conditionnées par le schéma statique retenu. Parmi les exemples notables de ces charges, on peut mentionner :

- Les variations de température,
- Les tassements du sol,
- Le fluage et le retrait des matériaux,
- Les contraintes internes résultant des méthodes de fabrication des ouvrages, comme les différentes phases de construction, les opérations de soudage et les frottements.



1.3. Charges climatiques

1.3.1. Vent

La vitesse du vent qui exerce une influence sur une construction découle de multiples facteurs, parmi lesquels :

- L'emplacement du projet,
- La topographie du site et son exposition, qu'il s'agisse de la proximité de la mer, d'une vallée ou d'une plaine,
- La nature du sol, qui peut être plus ou moins rugueux en fonction de son caractère urbain ou naturel,
- L'altitude de l'endroit,
- La hauteur de la structure elle-même.

La vitesse du vent se révèle être le paramètre le plus crucial pour évaluer son impact sur la construction. Cette vitesse varie considérablement en fonction du lieu et des conditions spécifiques du site. Étant donné la complexité de sa prédiction, les codes de calcul définissent la valeur de la vitesse du vent en se basant sur la situation géographique et la période de retour de l'événement, cette dernière étant généralement fixée à 50 ans. En l'absence de directives réglementaires, il est recommandé d'utiliser les données provenant des enregistrements d'aéroports. À mesure que l'altitude augmente, la vitesse du vent croît, car l'influence de la rugosité du sol diminue avec l'élévation. Les valeurs typiques se situent généralement entre 24 et 32 m/s.

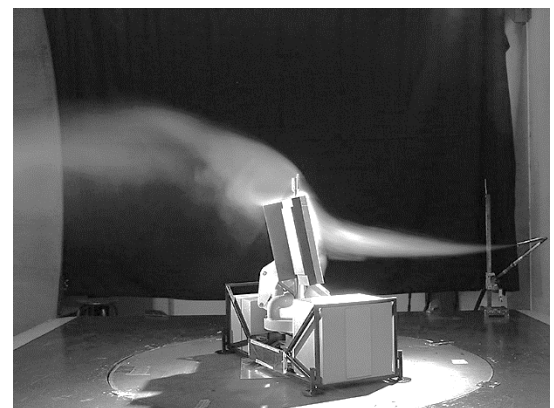
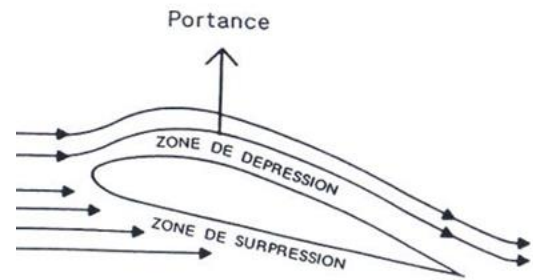
La pression exercée sur une construction est calculée en fonction de la vitesse du vent, et elle varie en proportion du carré de cette vitesse. Cette pression est influencée par divers facteurs, notamment la configuration du bâtiment, sa situation sur le site, les édifices environnants, la perméabilité des surfaces exposées au vent et la taille des éléments analysés.



Selon la forme et la hauteur des bâtiments, le vent engendre des forces de surpression et de dépression. Les forces de dépression, qui créent une aspiration, peuvent être particulièrement significatives et jouent un rôle déterminant dans la conception des toitures légères telles que les membranes tendues, les verrières et les revêtements métalliques. Aussi, es angles des bâtiments ainsi que les arêtes des toits subissent des contraintes nettement plus élevées que les surfaces planes étendues. Par conséquent, pour dimensionner les éléments spécifiques tels que les panneaux de façade, les angles de toiture et les bords des couvertures, des pressions de calcul plus élevées sont prises en compte par rapport aux éléments structuraux plus généraux.

Les structures ouvertes, comme les auvents, connaissent les efforts les plus importants en raison de l'effet combiné des pressions extérieures et des pressions intérieures résultant du vent qui pénètre dans les espaces. La forme de la couverture revêt une importance primordiale. Les réglementations déterminent les valeurs à utiliser dans les cas courants pour prendre en compte ces effets.

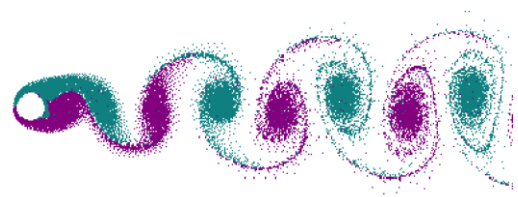
Dans des situations spécifiques, l'utilisation de tests en soufflerie s'avère fréquemment indispensable afin de comprendre les pressions aux divers points critiques de la couverture. Ces tests sont menés sur des maquettes allant de l'objet à analyser jusqu'à la reproduction intégrale du site et du quartier où la structure est implantée.



1.3.1.1. Actions dynamiques provoquées par le vent

Le vent peut induire des oscillations dans les structures élancées, qui se manifestent sous trois formes distinctes :

- Oscillations longitudinales et parallèles à la direction du vent, survenant lorsque la fréquence des rafales de vent est proche de celle de la structure.
- Oscillations perpendiculaires à la direction du vent, également appelées tourbillons de Von Kármán, fréquentes dans le cas des câbles et des cheminées en acier. Ces phénomènes se produisent généralement pour des vitesses de vent relativement faibles, de l'ordre de 10 à 15 m/s.
- Des mouvements de flexion et de torsion qui comportent un risque potentiel de résonance. Elles peuvent se déclencher même en présence de vents constants et résultent d'instabilités aérodynamiques dans la configuration de la structure.



Ces phénomènes ont été identifiés en premier lieu par les concepteurs d'aéronefs, et ils deviennent manifestes dans le domaine de la construction lorsque les structures sont caractérisées par leur souplesse et leur élancement. On les observe notamment dans des cas tels que les toitures légères, les cheminées et les tours en acier, les ponts suspendus ou haubanés, ainsi que les couvertures en toile. Un exemple très célèbre est celui du pont de Tacoma aux États-Unis, qui a été détruit lors d'une tempête en 1940 en raison de ces phénomènes d'oscillation incontrôlée.



1.3.2. Neige

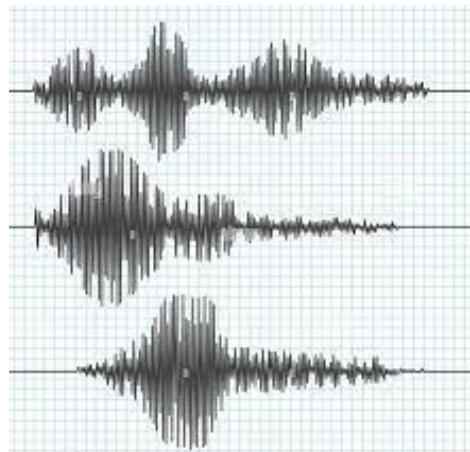
En moyenne, les charges de neige fluctuent généralement entre 35 kg/m² et 60 kg/m². Toutefois, en haute montagne, ces chiffres peuvent être considérablement plus élevés, atteignant même jusqu'à une tonne par mètre carré à des altitudes dépassant 2 000 mètres. Ces valeurs de base sont ensuite augmentées par un coefficient de sécurité lors du calcul de la résistance des structures. Par ailleurs, les charges dues aux avalanches sont des contraintes accidentelles.



1.3.3. Séismes

Un tremblement de terre se produit lorsque le sol subit une vibration due à une libération subite d'énergie, provenant de la déformation accumulée dans la croûte terrestre. La secousse sismique se propage sous forme d'ondes, à la fois en volume et en surface :

- Les ondes de volume engendrent des alternances de compression, de dilatation et de cisaillement perpendiculaire à la direction de l'onde.
- Les ondes de surface sont similaires à des vagues, provoquant à la fois la compression et le cisaillement.



Les mouvements du sol se produisent dans trois directions distinctes et indépendantes. Par conséquent, pour étudier une construction en contexte sismique, il est nécessaire d'avoir trois accélérogrammes¹ (dans les directions x, y et z).



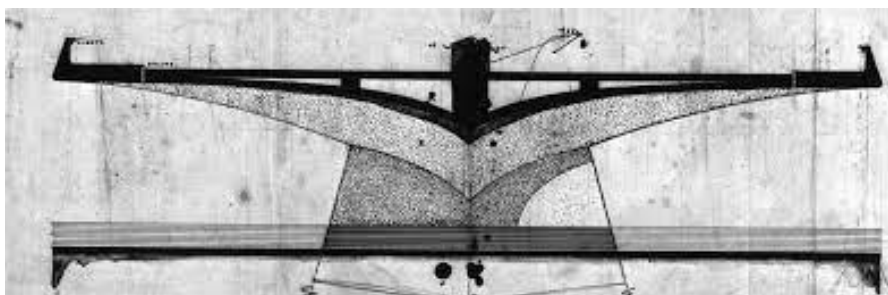
¹ Les accélérogrammes ou sismogrammes, sont des diagrammes montrant l'accélération au cours du temps. Ils sont généralement basés sur des relevés sismiques réels.

En général, l'intégration de l'action sismique dans la conception d'une structure implique la considération d'efforts horizontaux et verticaux additionnels, qui résultent de la réponse dynamique de l'ouvrage.

À titre indicatif, en France, ces charges horizontales peuvent varier de 0.1 g à 0.25 g selon les zones sismiques, et dans certaines régions, elles peuvent même atteindre **g** ou plus (par exemple en Asie). Ce facteur dépend de l'intensité sismique du lieu ainsi que de la réaction de la structure en fonction de ses périodes de vibration. Une structure souple subira moins de contraintes qu'une structure rigide.

L'intégration de l'action sismique dans la conception d'une construction intervient dès les premières étapes, car elle influe sur plusieurs aspects tels que :

- La découpe de la structure en blocs homogènes et la répartition régulière des masses dans l'ouvrage,
- L'emplacement et les caractéristiques des joints de dilatation,
- La mise en place du système de contreventement,
- L'utilisation de dispositifs d'appui spéciaux comme les appuis en néoprène,
- L'intégration de dispositifs spéciaux comme les amortisseurs.



1.4. Charges thermiques

Les variations de température peuvent devenir problématiques, en particulier lorsque la longueur des structures est significative. À titre indicatif, les variations de température ($\Delta\Theta$) considérées dans le nord du bassin méditerranéen, sont généralement de l'ordre de -40°C à $+30^{\circ}\text{C}$ par rapport à une température moyenne de 10°C . Ces valeurs peuvent être plus élevées en fonction des particularités de la structure, notamment pour les structures métalliques extérieures et les enveloppes en verre.

L'allongement (ΔL) d'une pièce de longueur L sous l'effet d'une variation de température est calculé selon la formule suivante :

$$\Delta L = \alpha \Delta \Theta L$$

Le coefficient de dilatation thermique de l'acier (α) ou du béton est généralement de l'ordre de 10^{-5} . Par conséquent, la variation de longueur (ΔL) pour un élément d'une longueur d'un mètre serait d'environ $-0,4$ à $+0,3$ millimètres en réponse à une variation de température. Si une structure peut se dilater librement, elle ne subit aucune contrainte. Cependant, lorsque la dilatation est entravée, des forces internes extrêmement considérables se manifestent. Ces forces sont équivalentes à celles qu'il faudrait appliquer à la structure pour la ramener à ses dimensions d'origine.

Les constructions traditionnelles en béton et maçonneries sont équipées de joints de dilatation, espacés à environ 50 mètres, avec des ouvertures prévues supérieures à 15 mm. Pour les structures de grande portée comme les ponts ou les couvertures, il est essentiel de planifier des schémas statiques ou d'incorporer des dispositifs d'appui qui permettent les dilatations thermiques. Parmi ces solutions, on trouve les appuis à rouleaux, les appuis en élastomère fretté et les bielles bi-articulées.

En prenant ces précautions, il est tout à fait envisageable de construire de vastes couvertures sans avoir besoin de joints de dilatation.

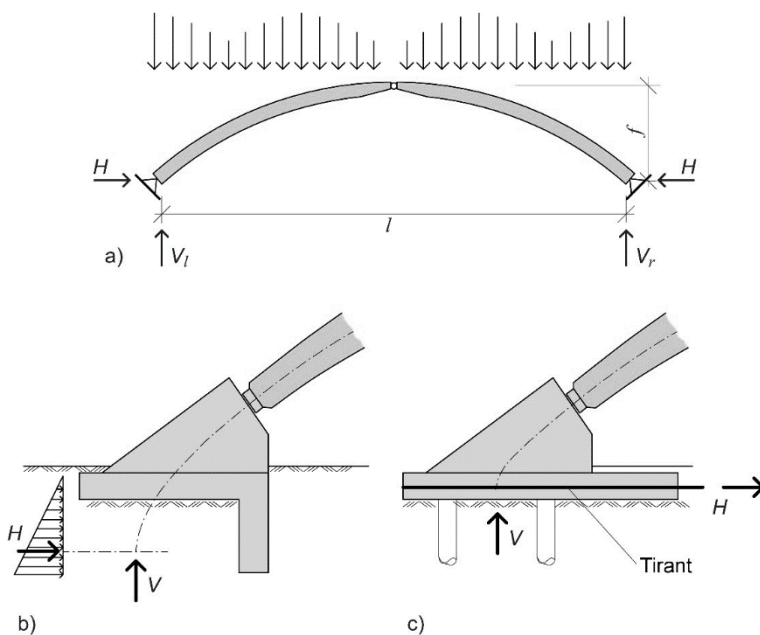


1.5. Tassements d'appui

Les tassements du sol de fondation comptent parmi les principales causes de problèmes dans les constructions. Ces déformations imposées à la structure génèrent des contraintes significatives lorsqu'elle n'a pas la liberté de se déformer, entraînant potentiellement la rupture des éléments les plus vulnérables. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les maçonneries en pierre, qui sont rigides, et se manifeste par des déformations et des fissures notables dans les linteaux situés au-dessus des ouvertures.



Cependant, il est possible de prévenir ces problèmes par le biais d'études approfondies sur les caractéristiques des sols de fondation. Dans les cas où les sols sont très compressibles ou présentent des risques d'effondrement (comme en présence de carrières ou de risques d'affaissement minier), des approches de conception isostatique peuvent être envisagées². Ces structures isostatiques ont la capacité de se déformer librement, sans engendrer d'efforts internes excessifs. De plus, il est envisageable de mettre en place des dispositifs de relevage des points d'appui à l'aide de vérins pour maintenir la stabilité et la continuité de la structure malgré les tassements différentiels du sol.



² L'isostatisme signifie que la mobilité d'une pièce d'un assemblage est limitée ; certains degrés de mobilité sont supprimés, mais chaque degré de mobilité n'est supprimé qu'une seule fois.

2. Forces et ensemble de forces

Le mot « force » émane du bas latin *fortia*, pluriel neutre substantivé de l'adjectif *fortis* (« courageux, ferme, brave ») ; de l'ancien français force (« ciseau »).

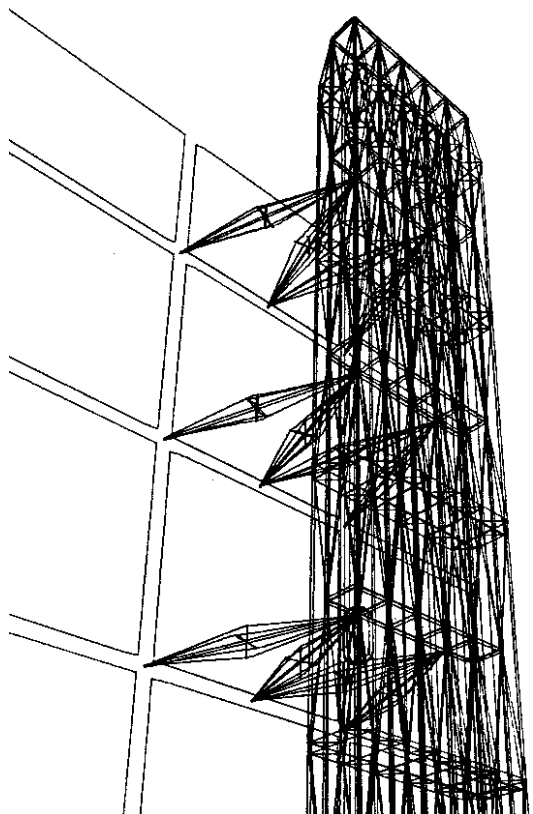
Une force peut aussi être définie comme un effet physique qui produit un changement physique comme une pression, un mouvement. Action mécanique de type glisseur. Vecteur qui la représente.

Bien que l'on tende à réifier les forces, celles-ci ne sont que l'expression d'un résultat induit par un individu, un objet, un élément de la nature, etc. ; à l'arrêt ou en mouvement. Les forces détruisent ou construisent. Elles sont une libération d'énergie à partir d'un point.

On connaît les effets d'une force. Sa nature reste néanmoins immatérielle.

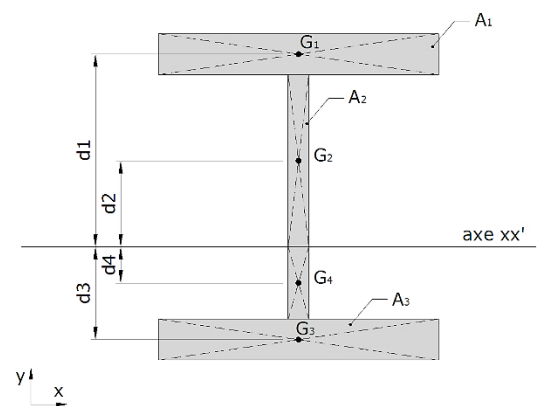
Cependant, identifier et suivre les chemins empruntés par une force ou cette énergie libérée lorsqu'elle est destructrice, est de loin le meilleur moyen d'édifier des structures qui consomment le minimum de matériaux.

À l'image du corps humain, la construction d'un édifice nécessite que son ossature ou structure, participe à la genèse de l'espace ; en fonction des compétences du maître d'œuvre, ce dernier explorera toutes les dimensions inhérentes à la structure d'un édifice, et les rôles qu'elle pourra assumer. Ainsi, les proportions des différentes composantes d'un squelette de bâtiment, devront tenir compte du poids de la bâtisse, mais aussi des volumes ménagés à l'intérieur et de la masse générale de la forme engendrée. La dialectique engagée entre éléments horizontaux et verticaux évoluant dans l'espace et ses profondeurs, offre une largeur quant à exhiber les matériaux de la structure, leurs textures, leurs couleurs, etc. De ce fait, les dimensions fonctionnelles et esthétiques de la structure, sont à considérer ensemble.





En statique³, la plupart du temps, les actions sont directes, c'est-à-dire qu'elles agissent immédiatement sur un corps donné. Cependant, il est également possible de rencontrer des actions exercées à distance, principalement dues aux poids des objets. Pour qu'une force soit présente, il faut à la fois un objet pour l'exercer (l'agent) et un objet pour la subir (le récepteur). La force, tout comme de nombreuses autres grandeurs physiques, est une quantité vectorielle, ce qui signifie qu'elle nécessite l'utilisation de l'algèbre vectorielle pour être pleinement décrite et analysée.



Dans le système international (SI), l'unité de mesure de la force est le Newton (N). On a souvent recours aux préfixes du système international pour rendre les quantités plus faciles à manipuler, notamment en utilisant des multiples ou des sous-multiples du Newton, tels que le kilonewton (kN) pour des forces plus grandes ou le millinewton (mN) pour des forces plus petites.

³ La statique est une science qui a pour objet premier l'étude des forces agissant sur un corps ; cette étude se fait indépendamment du mouvement du corps ; le mouvement s'étudie par la cinématique.

Cela permet d'exprimer les forces de manière pratique dans diverses applications en ingénierie et en physique.

2.1. Représentation des forces

La force est une quantité vectorielle, ce qui signifie qu'elle est caractérisée non seulement par sa valeur numérique, mais aussi par sa direction et son sens. Pour définir une quantité vectorielle comme une force, il faut spécifier :

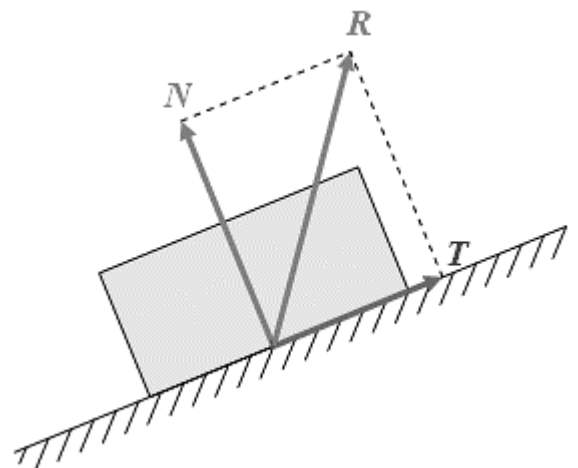
La grandeur : Il s'agit de la magnitude de la force, qui est généralement exprimée en unités telles que le Newton (N) dans le système international.

La direction : La direction de la force est donnée par l'angle entre la ligne d'action de la force (ou une droite parallèle à celle-ci) et un axe de référence bien défini. Souvent, cet angle est mesuré par rapport à l'axe des x positifs, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (sens anti-horaire).

Le sens : Le sens indique si la force agit dans un sens particulier le long de la ligne d'action. Dans la plupart des cas, le sens est implicite en fonction du contexte, mais il peut être important de le spécifier clairement dans certaines situations.

Un vecteur représentant une force est souvent noté avec une flèche au-dessus de la lettre, comme par exemple "F," pour indiquer qu'il s'agit d'une quantité vectorielle. Par exemple, un vecteur représentant une force de 30 Newtons (N) à un angle de 30,4 degrés par rapport à l'axe des x positifs pourrait être noté de la manière suivante : "F = 30 N à 30,4°."

Lorsque l'on souhaite uniquement indiquer la grandeur d'un vecteur (dans ce cas, la force), on écrit simplement la lettre sans la flèche. Cependant, il est important de noter que la grandeur d'un vecteur est toujours positive, car elle ne prend en compte que la magnitude de la quantité et ne tient pas compte de sa direction ou de son sens.

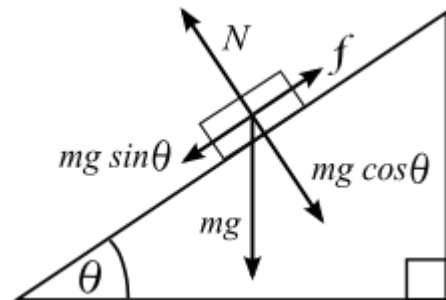


2.2. Résultante d'un système de forces

L'on peut décomposer une force en deux ou plusieurs autres forces, dont la somme est égale à la force initiale. Cela s'appelle la décomposition des forces, et elle est basée sur le principe que les forces sont des quantités vectorielles. Cette méthode est souvent utilisée pour analyser des systèmes complexes de forces.

Par exemple, en ayant un vecteur de force C , nous pouvons le décomposer en deux vecteurs, A et B , qui agissent le long d'axes spécifiques. En choisissant des axes orthogonaux, comme les coordonnées cartésiennes (plan x,y), l'on divise la force en composantes le long des axes x et y . Cela permet une analyse analytique des forces, où il est possible d'ajouter ou soustraire les composantes des forces le long des axes pour obtenir le résultat global.

Cette technique est précieuse en mécanique et en physique, car elle simplifie l'analyse des systèmes de forces complexes et permet de résoudre des problèmes impliquant des forces dans différentes directions. Elle est couramment utilisée dans la résolution de problèmes de statique et de dynamique des structures, ainsi que dans de nombreux autres domaines de l'ingénierie et des sciences.

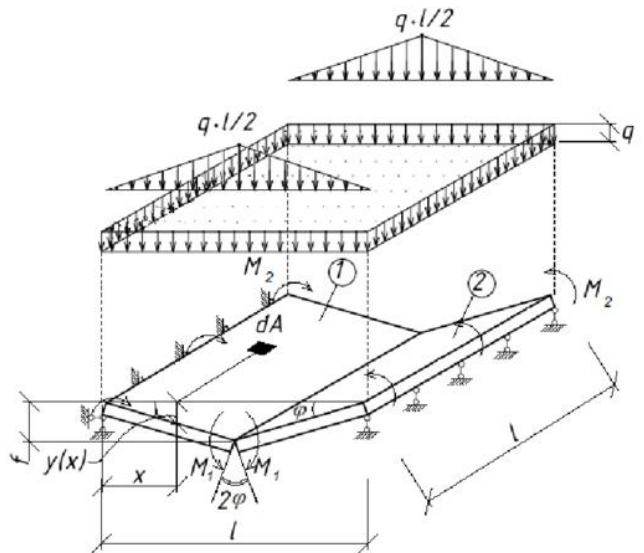


3. Solliciter/contraindre

3.1. Solliciter

Les sollicitations élémentaires se réfèrent aux forces fondamentales qui agissent sur les éléments de construction, comprenant les efforts normaux (N), les efforts tranchants (T), et les moments de flexion (M), parfois même les moments de torsion (T).

Ces sollicitations sont calculées en fonction des combinaisons d'actions résultant des charges appliquées et des déformations imposées aux éléments de construction. Ces calculs font souvent appel à des méthodes qui utilisent les principes de la résistance des matériaux, les équations de la statique (généralement basées sur des modèles élastiques et linéaires), ou des études de modélisation. En pratique, la plupart des éléments d'une structure sont soumis à plusieurs types de sollicitations élémentaires.



3.1.1. Effort normal

L'effort normal est la somme des contraintes normales agissant sur une section donnée.

Compression simple

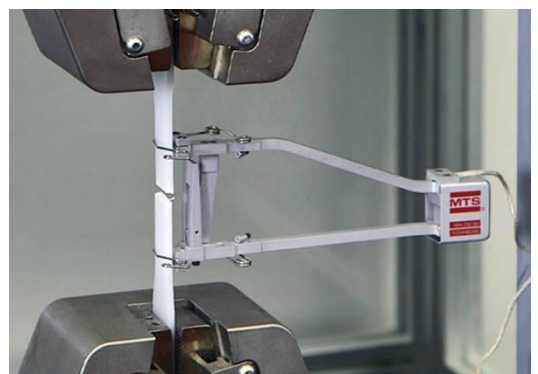
Par exemple, lorsqu'un poteau supporte uniquement son propre poids et une charge F appliquée au centre de gravité de sa section, il est en compression simple. Cependant, il est important de noter que ce cas théorique est rarement rencontré dans la réalité, car la force F résultante est généralement excentrée par rapport à l'axe du poteau. De plus, les poteaux sont souvent soumis à des forces horizontales qui induisent un moment de flexion.

Nota : Le béton a une résistance élevée à la compression.



3.1.2. Traction simple

Ce cas se produit lorsque la pièce est soumise à une force de traction (par exemple, des suspentes ou des tirants). Les calculs sont nécessaires pour dimensionner les armatures longitudinales requises pour supporter cette charge, car le béton



seul ne pourrait pas la supporter.

Nota : Le béton a une résistance relativement faible à la traction.

3.1.3. Effort tranchant

L'effort de cisaillement, également appelé "effort tranchant", représente la somme des contraintes de cisaillement appliquées à une section. Par exemple, pour une poutre avec deux appuis, l'effort tranchant augmente à mesure que l'on se rapproche d'un des appuis. Cela peut entraîner, dans le cas d'une poutre homogène, une fissuration le long d'une facette inclinée à environ 45 degrés par rapport à la ligne médiane de la poutre.

3.1.4. Moment fléchissant

Les charges concentrées ou réparties, notamment les forces verticales telles que le vent, génèrent des moments de flexion dans certains éléments de la structure, appelés "moments fléchissants". Le moment fléchissant représente l'effet de flexion résultant des contraintes normales sur une section donnée. Il est calculé comme la somme des moments (le produit de la valeur d'une force par sa distance à la ligne neutre) dans la section considérée.

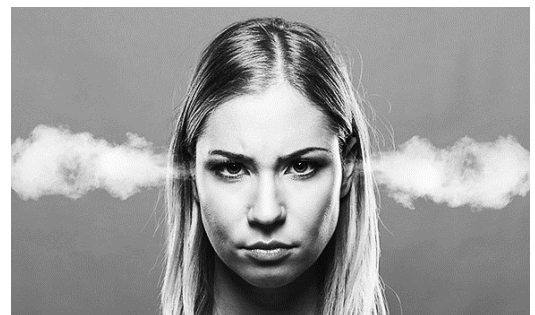
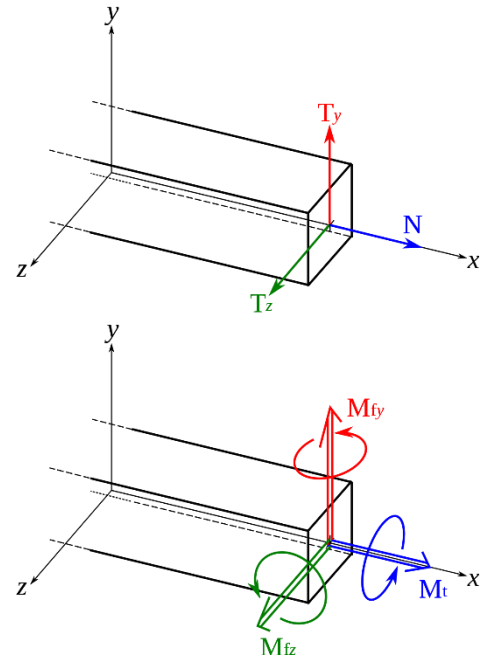
3.2. Contraindre

3.2.1. Contrainte

Grandeur physique qui représente l'intensité d'une force par unité de surface d'un solide sur lequel elle s'exerce. L'unité de mesure conventionnelle est le Pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$).

3.2.2. Contrainte admissible

Ce terme qualifie une contrainte spécifique d'un matériau, dont la valeur ne doit pas être dépassée lors de l'évaluation de la stabilité d'une structure sous une charge donnée. Par exemple, lors de la vérification des états limites de service d'une structure en béton armé, il est essentiel de comparer les contraintes réelles aux contraintes admissibles pour garantir la sécurité et la performance de la structure.



3.2.3. Contrainte de calcul du sol

La contrainte maximale que peut supporter un sol sous une fondation spécifique sans entraîner un affaissement excessif ou une rupture.

3.2.4. Contrainte effective

Dans un sol saturé, la contrainte résultant uniquement du poids des grains du sol. Elle est calculée en soustrayant la pression interstitielle de la contrainte totale.

3.2.5. Contrainte normale

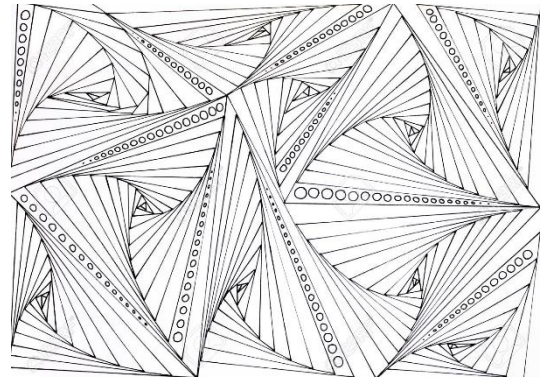
Contrainte agissant perpendiculairement à la surface concernée ; contrainte qui s'exerce dans une direction perpendiculaire à la surface à laquelle elle est appliquée. Dans le cas d'une poutre, il s'agit d'une contrainte qui agit perpendiculairement à la section transversale de la poutre, c'est-à-dire dans le sens parallèle à l'axe longitudinal de la poutre.

3.2.6. Contrainte totale

La contrainte effective dans un sol saturé est la résultante des contraintes dues à la fois au poids des grains du sol (la contrainte totale) et à la pression interstitielle. Elle représente la contrainte réelle qui agit sur le sol dans des conditions saturées, prenant en compte à la fois la composante verticale due à la pesanteur et la composante horizontale résultant de la pression interstitielle de l'eau. Cette contrainte est essentielle pour comprendre le comportement mécanique des sols saturés, notamment en géotechnique.

3.2.7. Contrainte tangente ou tangentielle

La contrainte agissant selon une parallèle à la surface concernée correspond généralement à une sollicitation de cisaillement. Elle représente une force qui agit dans une direction parallèle à la surface sur laquelle elle s'applique, ce qui tend à provoquer une déformation de cisaillement dans le matériau. Les contraintes de cisaillement sont couramment associées à des forces ou des charges qui cherchent à faire glisser ou déformer un matériau le long de sa surface, et elles sont essentielles pour l'analyse des structures et des matériaux en mécanique des matériaux et en génie civil.



4. Equilibre de plus de deux forces dans un plan

4.1. Notions de statique graphique

La statique graphique est l'étude des conditions d'équilibre des objets immobiles en mesurant et en traçant les forces. Bien que moins utilisée aujourd'hui en raison des avancées de la modélisation numérique par ordinateur, elle reste un outil utile pour les constructeurs afin de comprendre le fonctionnement des pièces et la répartition des forces de manière visuelle et simple.



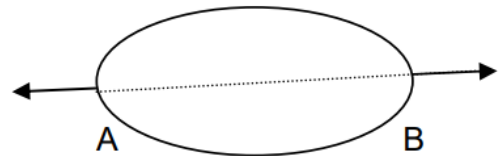
Le principe fondamental de la statique graphique consiste à représenter sur un même dessin à la fois les longueurs et les forces. Par la suite, nous supposons que chaque force peut être représentée par un vecteur glissant, caractérisé par sa ligne d'action (ou directrice), sa magnitude (la longueur du vecteur), ainsi que son orientation.

4.2. Corps soumis à deux forces

Ces deux forces sont égales et opposées.

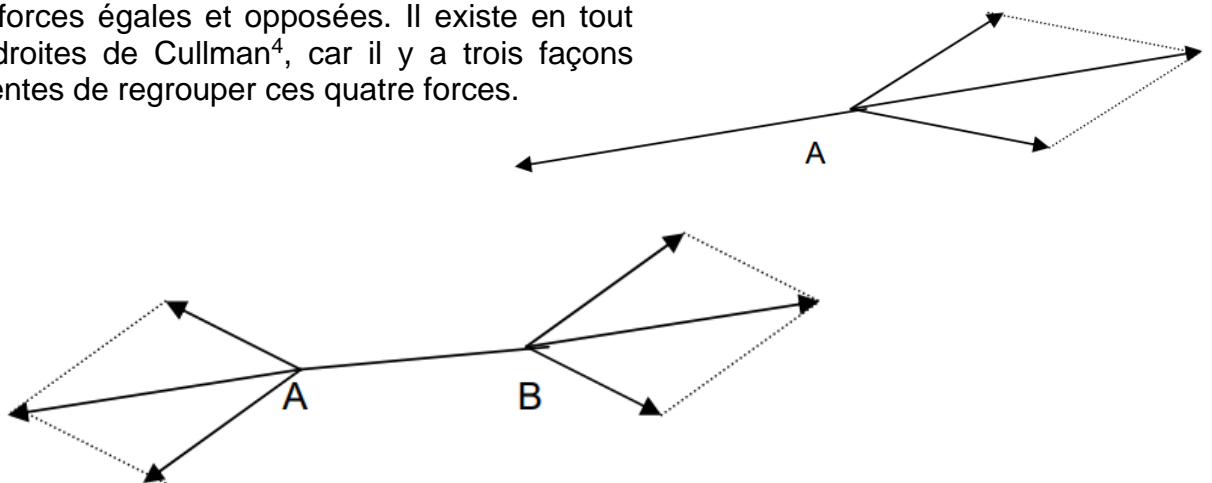
4.3. Corps soumis à trois forces

Les trois forces sont concourantes et l'une d'entre elles est égale à la somme vectorielle des deux autres.



4.4. Corps soumis à quatre forces

Les forces sont regroupées par paires, de manière à ce que la résultante en A soit égale et opposée à la résultante en B. On désigne par le terme "droite de Culmann" la ligne sur laquelle se trouvent ces deux forces égales et opposées. Il existe en tout trois droites de Culmann⁴, car il y a trois façons différentes de regrouper ces quatre forces.



⁴ La méthode de Culmann est une méthode de statique graphique inventée par Karl Culmann et qui est utilisée dans le cas de problèmes à quatre forces dont les directions sont connues.

5. Liaisons et contreventements

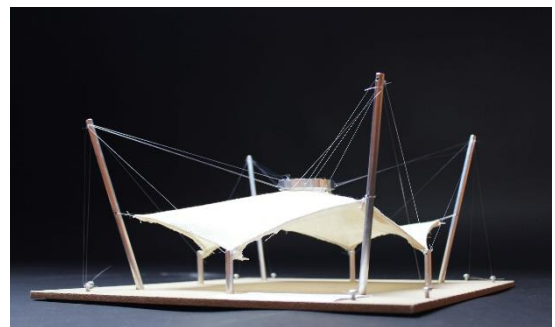
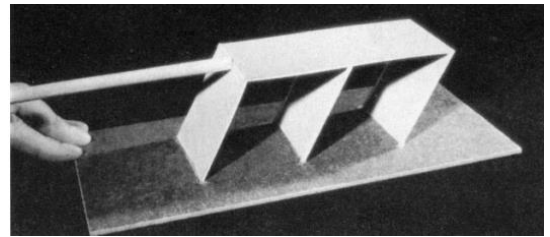
En considérant toute œuvre construite non monolithique, comme un ensemble d'éléments joints par des connexions, il en va de la sécurité de ces liaisons pour garantir l'équilibre du tout. De ce fait, plus l'ossature d'un bâtiment est complexe et plus les articulations entre les divers éléments qui le composent, seront nombreuses et variées. Ce paramètre confère à l'ossature, un comportement organique face aux forces statiques et dynamiques qui ébranleront l'édifice au fil du temps ; contrairement à une structure trop chargée, pesante, avec des points de jonction rigides.

Inversement, une structure beaucoup trop souple met à risque la stabilité de ses occupants, notamment lorsqu'il s'agit d'encaisser des vents importants ou d'autres sollicitations dynamiques tels que séismes, raz-de-marée, etc.

Les différentes articulations des appuis horizontaux et verticaux dans un édifice, doivent faire l'objet d'une attention particulière, et être contreventées.

Les points d'appui, également appelés supports, sont les éléments qui limitent la capacité du système à se déplacer ou à tourner. Les points d'appui expriment les connexions entre le système et son environnement extérieur. Ce qui importe dans ce contexte, ce sont les informations détaillées sur la nature de cette connexion, sa rigidité, ainsi que sa capacité à se déplacer ou à pivoter dans différentes directions de l'espace.

Lorsqu'un mouvement est empêché par cette liaison, cela entraîne l'apparition d'une réaction d'appui, également connue sous le nom d'action de liaison, dans la direction du mouvement contraint ou bloqué. En d'autres termes, chaque fois qu'un mouvement de translation dans une direction particulière est entravé, une force de liaison ou une action d'appui se manifeste dans cette direction spécifique. De même, lorsque le mouvement de rotation autour d'un axe donné est entravé, cela donne lieu à un torseur de forces de



liaison, qui équivaut à un couple de forces.

Ces réactions d'appui sont fondamentales pour comprendre comment les structures et les éléments de construction interagissent avec leur environnement. Elles sont prises en compte dans la conception des fondations, des supports, et des connexions structurelles pour garantir la stabilité et la sécurité des bâtiments et des ouvrages en génie civil.

Il existe plusieurs types d'appuis utilisés en génie civil et en construction pour connecter les éléments de la structure à leur environnement. Voici quelques-uns des types d'appuis les plus couramment rencontrés :

L'appui simple mobile (appui glissant ou appui à rouleau) : Cet appui est représenté schématiquement par un triangle avec une pointe pour symboliser la connexion ponctuelle et un rouleau pour représenter la capacité de translation dans la direction souhaitée. Il s'agit du type d'appui le plus simple et le plus économique, mais en réalité, il peut y avoir des frottements qui limitent le mouvement horizontal.

L'appui rotulé (appui articulé) : Cet appui permet la rotation mais bloque la translation dans deux directions, ce qui entraîne deux réactions d'appui distinctes (selon les axes x et y). On le trouve fréquemment dans des assemblages de contreventement en acier, des éléments de charpente en bois ou des poutres de pont en acier.

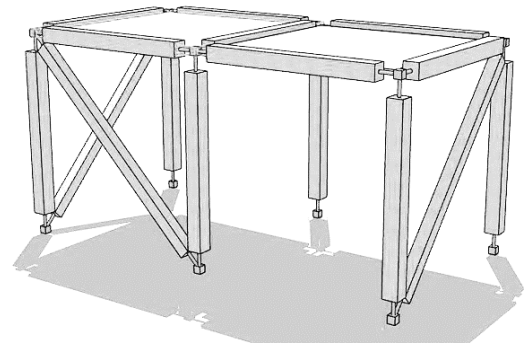
L'encastrement : Cet appui ne permet aucun mouvement ou degré de liberté. Il génère donc une réaction d'appui ainsi qu'un moment d'encastrement qui bloque la rotation. Les encastresments sont utilisés pour fixer fermement une partie de la structure.

L'appui élastique (appui à ressort) : Cet appui a une variation de l'appui rotulé. Il prend en compte la capacité de l'appui à se déplacer tout en conservant une réaction. Le comportement est similaire à celui d'un ressort, vertical ou horizontal, qui tolère un mouvement avec une raideur représentée par un coefficient " k ". On utilise ce



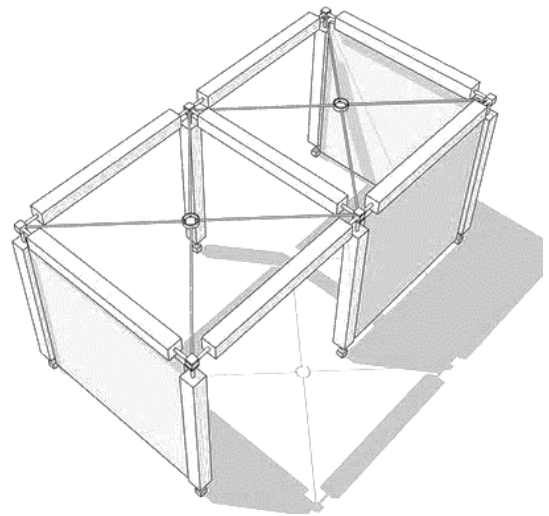
type d'appui pour modéliser des sols ou simuler des éléments de structure pouvant se déformer et provoquer un déplacement de l'appui.

Le choix de l'appui dépend des exigences de la structure et des conditions spécifiques du projet. Chaque type d'appui a ses avantages et ses inconvénients, et il doit être sélectionné en fonction des besoins de la conception pour garantir la stabilité et la performance de la structure.

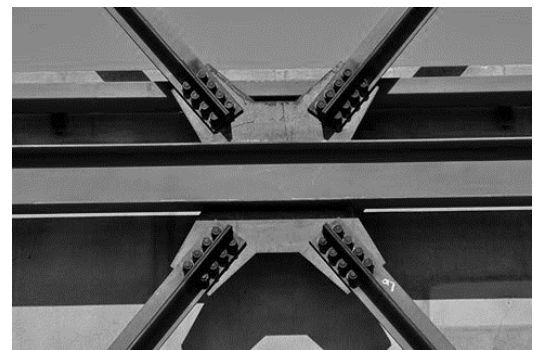


5.1. Qu'est-ce qu'un contreventement ?

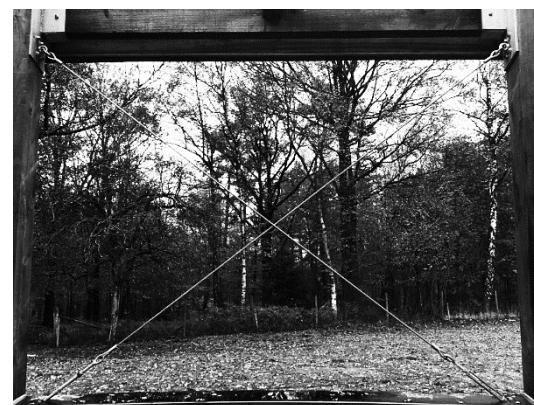
En génie civil et en charpenterie, le contreventement est un système statique essentiel conçu pour garantir la stabilité globale d'une construction face aux forces horizontales générées par diverses actions extérieures, telles que le vent, les séismes, les chocs, le freinage, etc. Il joue également un rôle crucial en stabilisant certaines parties spécifiques de la structure, telles que les poutres et les colonnes, en prévenant des phénomènes d'instabilité tels que le flambage ou le déversement⁵.



Pour assurer la stabilité globale d'un bâtiment, il est impératif qu'il soit contreventé dans au moins trois plans verticaux, ces plans devant se croiser en au moins deux droites distinctes, en plus d'un plan horizontal. Il existe deux types de contreventements principaux : les contreventements verticaux, qui sont conçus pour transférer les forces horizontales vers les fondations, et les contreventements horizontaux, qui servent à contrer les forces de torsion induites par ces efforts (Deplazes, 2005).



Le contreventement peut être mis en place à l'aide de divers matériaux, tels que le béton armé, la maçonnerie, le bois ou la tôle ondulée, sous forme de voiles (pour les contreventements verticaux) ou de plaques (pour les contreventements horizontaux). Les treillis en bois ou en acier sont également couramment utilisés pour créer des systèmes de contreventement.



Pour assurer la stabilité des faces d'une structure,

⁵ Le déversement est un phénomène d'instabilité affectant une poutre subissant un moment de flexion.

notamment dans le contexte de la charpenterie ou de la construction en génie civil, on peut utiliser trois méthodes différentes de contreventement :

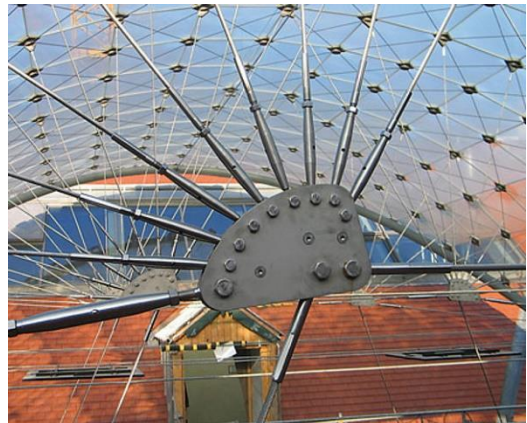
Bielles : Les bielles sont des éléments diagonaux capables de résister à la compression. Elles sont disposées en diagonale le long des faces de la structure pour transférer les forces horizontales vers les points d'appui ou les fondations. Les bielles sont particulièrement efficaces pour absorber les charges de compression et contribuer à la stabilité globale de la structure.

Croix de Saint-André (en câble) : Les croix de Saint-André sont formées par des câbles ou des tendeurs disposés en diagonale pour créer une structure en forme de "X" sur les faces de la construction. Elles sont conçues pour résister aux forces de traction et de compression. Les croix de Saint-André en câble sont souvent utilisées dans les structures légères pour le contreventement, comme les structures tendues.

Panneaux de contreventement : Les panneaux de contreventement sont des panneaux rigides, tels que des panneaux en bois, en métal ou en béton, qui sont installés sur les faces de la structure pour résister aux forces horizontales. Ils servent à redistribuer ces forces vers les points d'appui ou les fondations. Les panneaux de contreventement sont couramment utilisés dans la construction en bois et en métal pour renforcer la stabilité structurelle.

Le rôle structurel de ces différentes méthodes de contreventement est essentiellement le même, quelle que soit la technique choisie. Ils sont tous destinés à absorber et à transférer les forces horizontales, assurant ainsi la stabilité globale de la structure. Le choix de la méthode de contreventement dépend souvent des matériaux de construction, de la conception de la structure et des exigences spécifiques du projet.

La plupart des ossatures contreventées sont conçues de manière concentrique, ce qui signifie que lorsque les membres de la structure se croisent à un nœud, le centre de gravité de chaque membre passe par le même point.



Les ossatures contreventées concentriques peuvent être classées en deux catégories principales : les ossatures contreventées concentriques ordinaires (OCBF) et les ossatures contreventées concentriques spéciales (SCBF).

Ossatures contreventées concentriques ordinaires (OCBF) : Ce type d'ossature ne nécessite pas de contraintes de conception étendues pour les membres ou les connexions. Ils sont souvent utilisés dans des régions à faible risque sismique. Les bâtiments en ossature d'acier OCBF ont été développés à Chicago, tandis que les ossatures en béton armé sont originaires d'Allemagne et de France, où les tremblements de terre n'étaient pas une préoccupation majeure dans la conception.

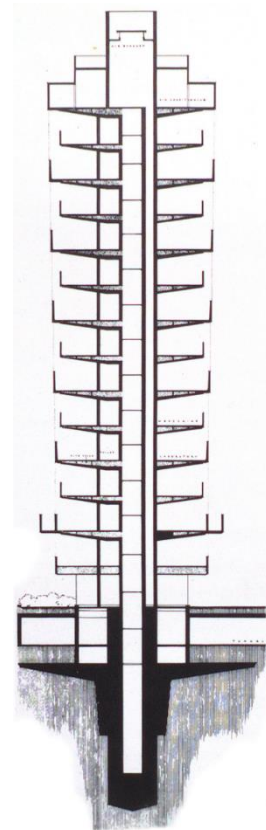
Ossatures contreventées concentriques spéciales (SCBF) : Contrairement aux OCBF, les SCBF sont conçues avec des exigences de conception plus strictes et sont couramment utilisées dans des zones à haut risque sismique. L'objectif principal de la conception à contreventement concentrique ou excentrique est d'assurer une ductilité adéquate, c'est-à-dire la capacité du bâtiment à se déformer sans se rompre brusquement, ce qui est essentiel pour la sécurité en cas de séisme.

II. Conception d'une structure

6. Adaptation au sol : fondations superficielles et profondes

L'origine du mot vient du latin *fundationes*, signifiant asseoir, établir solidement. Fondation est également synonyme de « base », ce qui porte ; les anciens assimilaient ce mot au dieu Djehouti-Thot-Hermès-Mercure ; l'Idriss des musulmans.

« Les architectes laïques de l'école du XIIe siècle avaient vu tant de constructions romanes s'écrouler, par faute de fondations ou par suite de la poussée des voûtes mal contre-butées, qu'ils voulurent cependant faire en sorte d'éviter ces sinistres ; à cet effet, ils mirent un soin



particulier à établir des fondations durables et à rendre leurs constructions assez élastiques pour que les tassements ne fussent plus à craindre » (Viollet-le-Duc, 1854).

De notre côté, nous utiliserons l'analogie pour permettre à l'étudiant d'intégrer le rôle des fondations au sein d'une construction. Les fondations dans une œuvre bâtie, sont les pieds de l'homme. Un rapport immédiat existe entre le poids du corps et la taille de l'individu, avec la longueur des pieds et leur étalement au sol. Il sera plus difficile pour ce dernier de se tenir stable sur une jambe ; c'est la souplesse et la qualité de la cheville qui seront déterminantes dans ce cas. C'est à cause du port de la chaussure et du manque d'activité physique, que les pieds des hommes du XXIe siècle, sont frêles et fragiles. Ceci entraîne une déformation progressive et des problèmes articulaires, dans l'entièreté du squelette ; par correspondance, une architecture bâtie sur de mauvaises fondations générera des déformations sur l'ensemble de l'édifice.

Cette comparaison permet de saisir le rôle déterminant des fondations dans une architecture, de sorte que sur un sol dur, il n'est point difficile de se tenir debout, alors que dans la neige ou le sable, il sera nécessaire d'augmenter la surface du pied en se munissant de raquettes, auquel cas il faudra enfoncer ses pieds profondément dans le substrat.

Pour un bâtiment et en fonction de la stabilité du sol, on bâtera des fondations en superficie ou au contraire en profondeur.



6.1. Fondations superficielles

Les fondations superficielles sont un type d'assise couramment utilisé dans la construction, principalement lorsque le sol est stable. Contrairement aux fondations profondes et semi-profondes, les fondations superficielles ne pénètrent que légèrement dans le sol. Elles sont principalement sous forme de plots de fondation ou de semelles.



Voici quelques informations importantes sur les fondations superficielles :

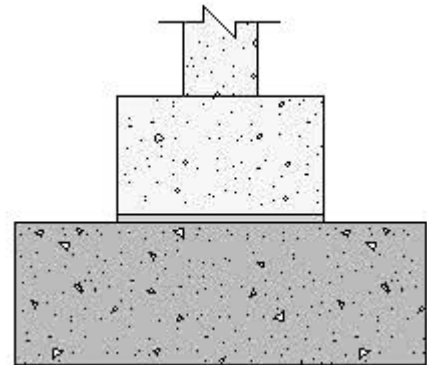
Semelle filante : Celle-ci se trouve sous les murs porteurs de la structure.



Plots de fondation : Ils se situent sous les poteaux de la structure.

Radier : Utilisé lorsque la capacité de charge du sol ne peut pas soutenir la structure.

Cuvelage : Une variante du radier, utilisée lorsque les parois verticales enterrées doivent résister à des pressions verticales, souvent en raison de la présence d'une nappe d'eau.



Justification du dimensionnement :

Le dimensionnement des fondations superficielles est basé sur les caractéristiques mécaniques des sols sur lesquels la structure sera construite. Des normes européennes, notamment l'Eurocode 7, définissent les règles de calcul géotechnique, y compris les fondations superficielles.

Normes européennes :

L'Eurocode 7, partie 6, traite spécifiquement des



fondations superficielles. Il comprend différentes sections, y compris des règles générales, des bases de calcul géotechnique, des données géotechniques, des règles pour la surveillance des travaux, etc. Les annexes fournissent des informations supplémentaires et des exemples pour guider le dimensionnement.

Obtention des caractéristiques mécaniques des sols :

Les caractéristiques mécaniques des sols nécessaires au dimensionnement des fondations superficielles peuvent être obtenues à partir d'essais de laboratoire sur des échantillons de sol prélevés sur le site ou à partir d'essais in-situ réalisés directement sur le terrain. Ces essais sont généralement conformes à des normes spécifiques.



6.2. Fondations profondes

Il existe différents types de fondations profondes utilisées dans la construction de structures de génie civil, notamment pour les piles et les culées d'ouvrages d'art. Le choix du type de fondation profonde dépend des conditions géotechniques du site, de la nature du sol, de la charge à supporter et d'autres facteurs de conception spécifiques au projet. Chaque type



de fondation a ses avantages et ses inconvénients et doit être sélectionné en fonction des besoins de la structure à construire.

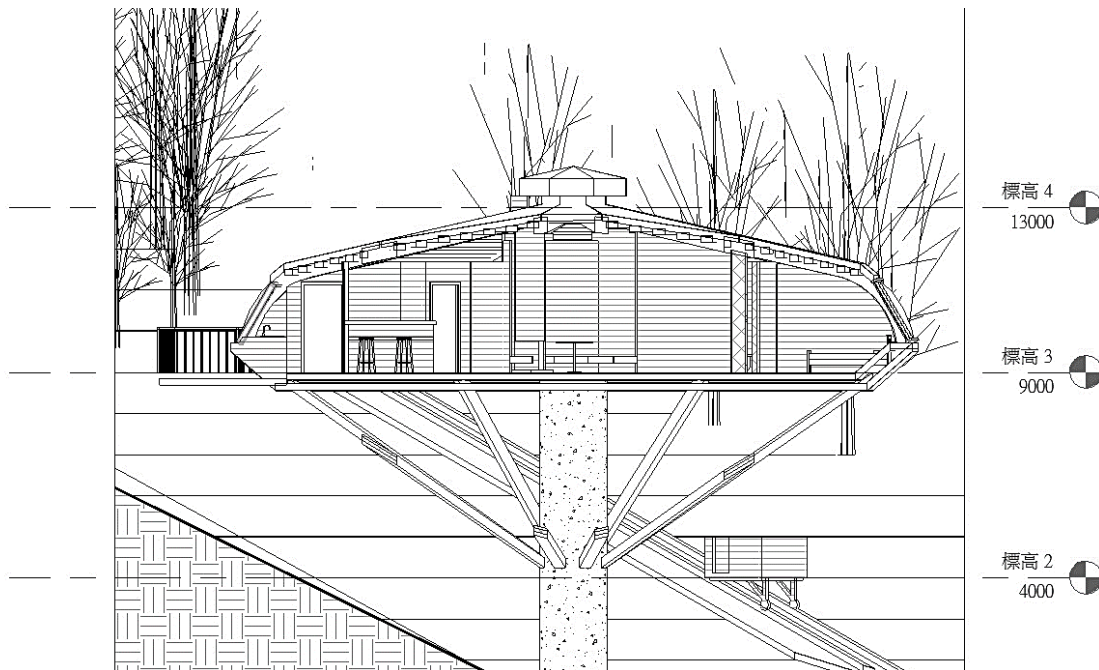
Voici quelques-uns de ces types de fondations profondes :

Pieux :

Pieux forés simples : Ils sont réalisés en coulant le béton de bas en haut à l'intérieur d'un forage préalablement réalisé sans soutènement des parois. Une cage d'armature est placée avant le coulage du béton.

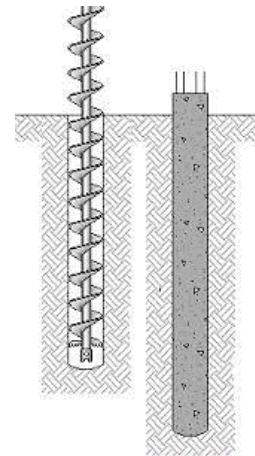
Pieux forés tubés : Les parois du forage sont maintenues par un tubage métallique temporaire.

Pieux forés boue : Pendant le forage, les parois sont maintenues par une boue thixotropique⁶ à base de bentonite. Une cage d'armature est descendue dans le forage, puis le béton est coulé à l'aide d'une colonne de bétonnage.



⁶ Qualifie un matériau visqueux, un gel, une boue, qui est rigide au repos et devient liquide après agitation.

Pieux forés à la tarière creuse : L'exécution se fait à l'aide d'une tarière, avec du béton mis en place au fur et à mesure de l'extraction du sol par la tarière. Il existe aussi des pieux préfabriqués en béton armé qui sont enfoncés par battage ou vibro-fonçage.

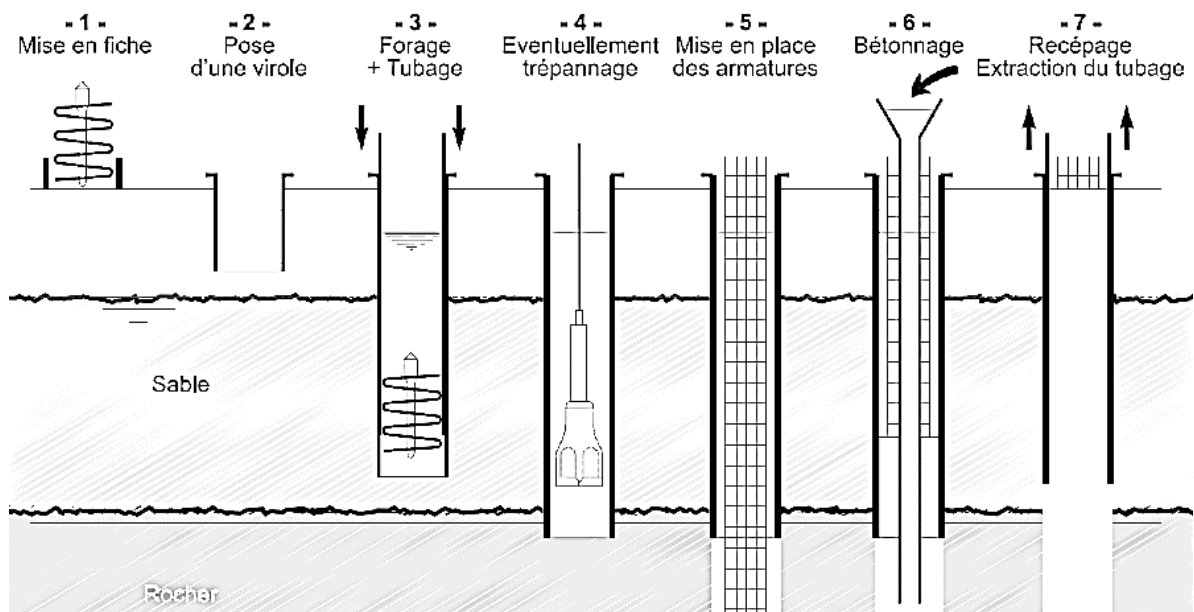


Barrettes : Les barrettes sont similaires aux pieux forés boue, mais elles diffèrent par la forme de l'outil de forage, ce qui donne à la fondation une section rectangulaire.

Puits : Les puits sont généralement creusés manuellement ou à l'aide de petits équipements d'excavation. Les parois sont soutenues au fur et à mesure du creusement par des blindages. Une fois le creusement terminé, la fondation est coulée à sec en béton.

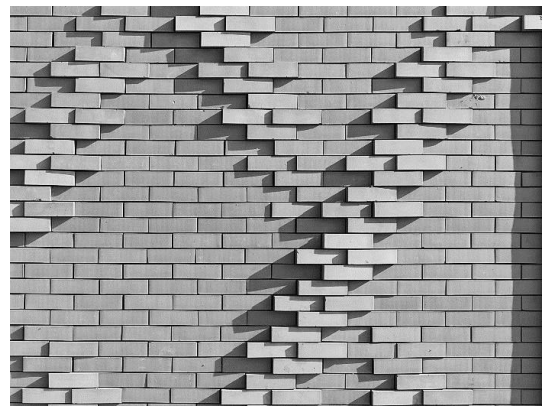


Micropieux : Les micropieux sont des pieux de petit diamètre (inférieur à 250 mm). Le forage est équipé d'armatures et rempli de mortier ou de coulis de ciment par gravité à l'aide d'un tube plongeur ou par injection. Dans certains cas, des micropieux préfabriqués en béton sont enfoncés par battage ou fonçage si le sol le permet.



7. Structures et éléments structuraux de l'édifice : éléments porteurs

En s'inscrivant dans une démarche considérant la topologie, les typologies et technologies de la construction, le(s) maître(s) d'œuvre conceptualisera les grandes lignes du projet d'architecture à réaliser, lequel in-situ mais également extra locum, débutera avec des éléments de la plus petite échelle, à l'origine d'assemblages plus complexes, pour devenir des éléments de composition de modules, murs, colonnes et planchers, à articuler en structures porteuses et non porteuses, pour enfin donner corps et forme à l'édifice. Ce processus, de plus en plus complexe de nos jours, du fait des échanges économiques accélérés, se désolidarise parfois du nécessaire respect de la mémoire des lieux, et fuit les contraintes techniques où les matériaux locaux, ouvrés intelligemment via des savoirs cumulés, se cristallisent en structures élégantes et bâtiments contextualisés, qui ne ressemblent à nuls autres.



À titre d'exemple, un bâtiment dont la structure porteuse est à réaliser en terre, offrira un choix assez conséquent quant à sa transformation en modules. La matière première en fonction de sa plasticité et capacité à jouer le rôle de liant, se verra adjoindre d'autres ciments et agrégats selon qu'elle sera utilisée en appareils tels que briques de terre crue ou réfractaire, ou bien banchée et damée en murs. À cet effet, les modules de départ et leurs modalités de mise en œuvre, impacteront conséquemment la forme du bâtiment et sa modénature. Au fur et à mesure de l'ouvrage, les étapes de réalisation de l'édifice en tant que chaînes additives seront réduites ou augmentées.

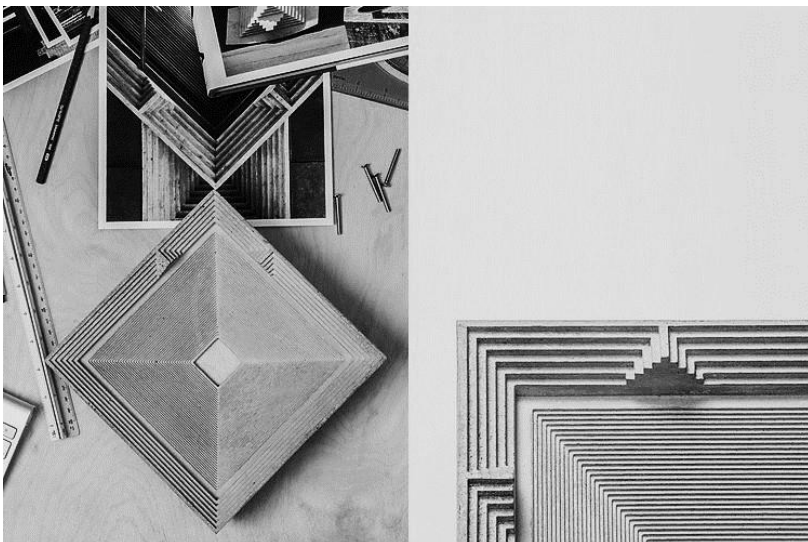
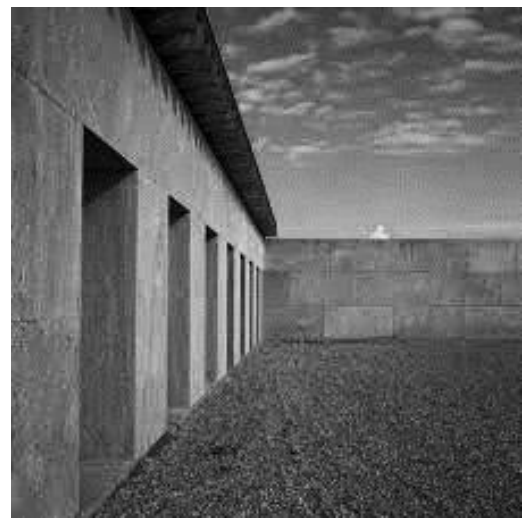


Les modules, transformés en éléments porteurs, composés par les appuis verticaux et horizontaux, s'articuleront via des assemblages en petits ou grands espaces pour former les planchers à étager. Cette triple articulation entre le sol, le plafond et l'espace entre deux, est déterminante quant au rendu final de l'édifice, lequel sera aérien et transparent, ou au contraire opaque et massif. Dans les deux cas, l'intention de l'architecte doit primer dans le bon choix des matériaux au service de l'idée organisatrice, de la destination de l'édifice et de sa fonction, jusqu'à son évolution dans le temps et son intégration au lieu.

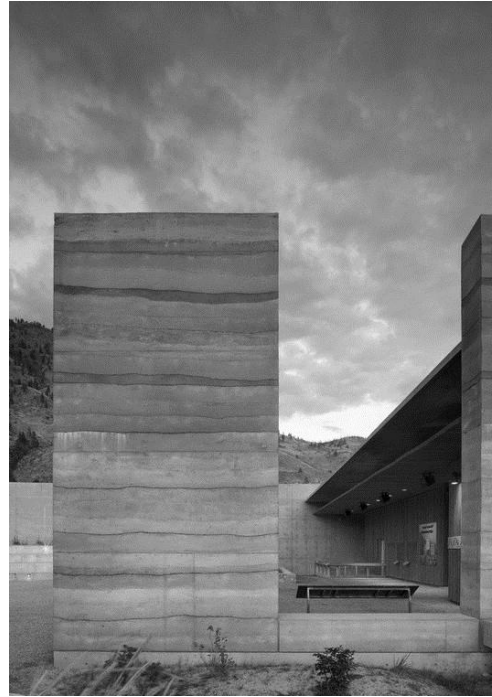


7.1. Deux modalités de construction : deux architectures

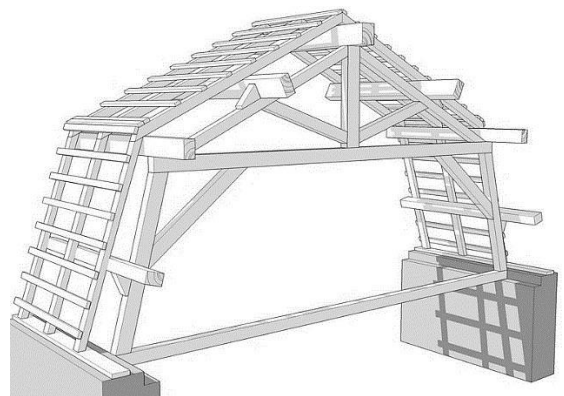
Bien qu'au fur et à mesure des explorations spatiales entamées depuis plus d'un siècle, il est aujourd'hui possible de concevoir des structures aériennes en maçonnerie porteuse ainsi que des structures chargées et massives en charpente, nous pouvons cependant, en considérant les possibilités constructives de chaque matériau selon qu'il travaille à la compression ou au contraire à la flexion, affirmer que deux possibilités structurelles, en l'occurrence maçonnées ou charpentées, s'offrent lorsqu'il s'agit de couvrir des espaces, qu'Andréa Deplazes qualifie d'architectures « solide » ou en « filigrane ». En fonction de la destination de l'édifice, des besoins fonctionnels et esthétiques en lumière naturelle, de sa dimension, du climat de la région, etc., il est alors possible de pencher vers l'une ou l'autre de ces variantes.



La maçonnerie tend à employer des éléments durs tels que la brique ou la pierre. Les modalités d'appareillage des éléments à assembler sont l'empilement par jointoiement, vertical ou horizontal. Les modules à produire seront en général des murs, piles et trumeaux massifs. L'agencement des espaces se fait par addition et les possibilités spatiales sont déterminées par les unités incluses au sein des cellules répétitives (Coignet, 2007). Pierre Von Meiss dans son ouvrage intitulé « de la cave au toit, témoignage d'un enseignement en architecture », évoque - lorsqu'il s'agit d'ouvrages en maçonnerie porteuse - le terme « espace de la structure ». Les planchers porteurs seront en général hémisphériques, tels que les dômes ou coupoles, ou voûtés. C'est ici la nature du matériau et ses limites qui imposent les formes construites et spatiales. Les systèmes d'ouverture se résument par la pratique de baies au sein des appuis verticaux. Cela dépend de la sismicité du lieu, des proportions du bâtiment et de la nature de l'espace. L'arc est la forme usuelle lorsqu'il s'agit de créer une ouverture dans un mur maçonné. Il faut cependant considérer qu'avec les avancées technologiques, il est aujourd'hui possible d'atteindre un coefficient d'ouverture avoisinant les 100%.



Pour ce qui est de la charpente, les modules sont des assemblages d'éléments en bois ou en acier produits en usine, ou dans de très rares cas, in-situ. L'ensemble est monté par clouage, vissage, boulonnage ou rivetage. Les espaces produits seront très ouverts du fait de la petite section des appuis verticaux et horizontaux à manipuler. Ici c'est le système poteau/poutre/traverse qui domine dans la production de l'espace. Les surfaces sont dégagées et l'agencement des espaces se fait selon les besoins fonctionnels de l'édifice. Les



cloisons de séparation n'ont aucun rôle porteur. De même pour l'enveloppe extérieure du bâtiment : des pans entiers dits « murs rideaux », accrochés à l'ossature porteuse, permettent d'isoler l'édifice de l'extérieur et de régler l'ensoleillement et l'aération ainsi que l'articulation visuelle intérieur/extérieur, via le rapport vide/plein.



7.2. L'importance du matériau

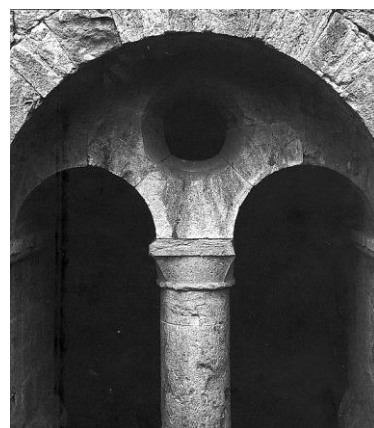
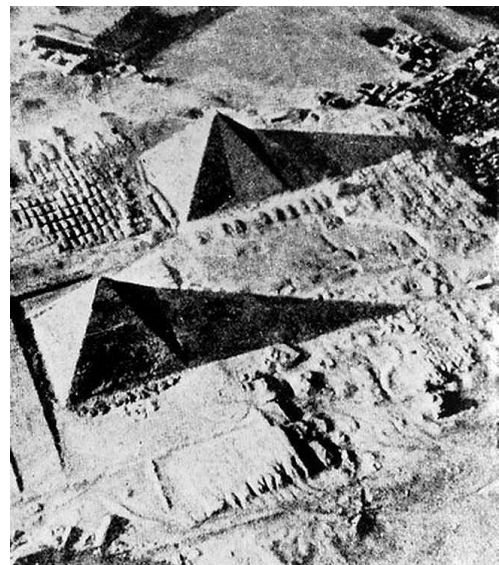
L'utilisation de matériaux en tant qu'éléments de composition de systèmes structurels, et ce au service de prétentions esthétiques, diffère d'un usage purement rationnel où c'est uniquement l'ingénierie qui intervient. En effet, le matériau ouvré en tant que module (ex. mur ou colonne), n'est sublimé que s'il est magnifié par d'autres éléments. De chaque module en tant qu'appui horizontal ou vertical, existant dans un volume qu'il soit petit ou grand, ce sont les articulations entre chaque composant qui permettent une



meilleure lisibilité de l'espace. Ainsi, selon besoin, la jonction entre une colonne et un plancher se fera via un chapiteau. Dans un autre édifice, c'est une platine en acier réticulée qui joindra les différents éléments d'une charpente moderne, aérienne et squelettique. Ce sont également les propriétés du matériau en tant que plus petite unité, puis celles du module produit, en interaction avec la lumière directe et indirecte, naturelle et artificielle, au gré des saisons, et l'interprétation qu'en fera chaque individu, qui donneront son identité à l'espace et au lieu.

« Quand on a affaire à la brique, lorsqu'on fait un projet en brique, il faut demander à la brique ce qu'elle veut et elle dira « je veux un arc » et vous répondrez « les arcs sont difficiles à faire, ils coutent cher, je pense qu'on peut tout aussi bien utiliser du béton comme linteau », mais la brique répondra : « o je sais que tu as raison mais si tu me demandes ce que j'aime, j'aime l'arc, alors pourquoi s'entêter ? considères moi comme un être. Ceci est la connaissance de l'ordre » (Kahn, 2006).

En effet, c'est d'abord l'individu, en contact avec l'espace - via ses sens, qu'il en soit le concepteur ou l'utilisateur, qui anime le lieu via ses émotions. Par la vue, le toucher, l'ouïe, l'odorat et le goût, il interagira avec l'espace et ses composantes physiques. C'est donc la matérialité de l'objet - sa couleur, son rayonnement, qu'il soit doux, rêche, lisse ou rugueux, froid ou humide - qui participe à la matérialisation de l'espace ; mais également les proportions de l'espace ou « contenant » dans lequel évolue l'utilisateur. Des facteurs plus abstraits interviendront dans le processus de lecture du volume à expérimenter, de la massivité de l'édifice ou au contraire sa légèreté, ses limites physiques, sa monumentalité, sa petitesse, sa transparence ou opacité, la perception du temps en son sein, etc.



8. Rôles, sollicitations et déformations des éléments de la structure

Le processus de conception d'une structure résulte de la combinaison des concepts abordés dans le chapitre précédent et de la compréhension des archétypes structurels présentés ci-dessous. Ces archétypes structurels sont des modèles ou des schémas de conception qui servent de base pour le développement de solutions constructives.

La recherche du choix structurel doit être un élément clé du processus de conception, car elle permet d'explorer différentes approches pour atteindre les objectifs du projet architectural. Les doivent prendre en compte les archétypes structurels existants, tout en les adaptant et en les personnalisant, pour répondre aux besoins spécifiques de leur projet (Von Meiss, 1993).

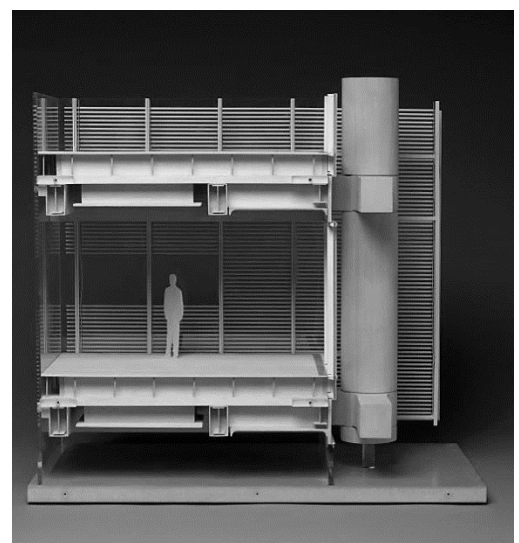
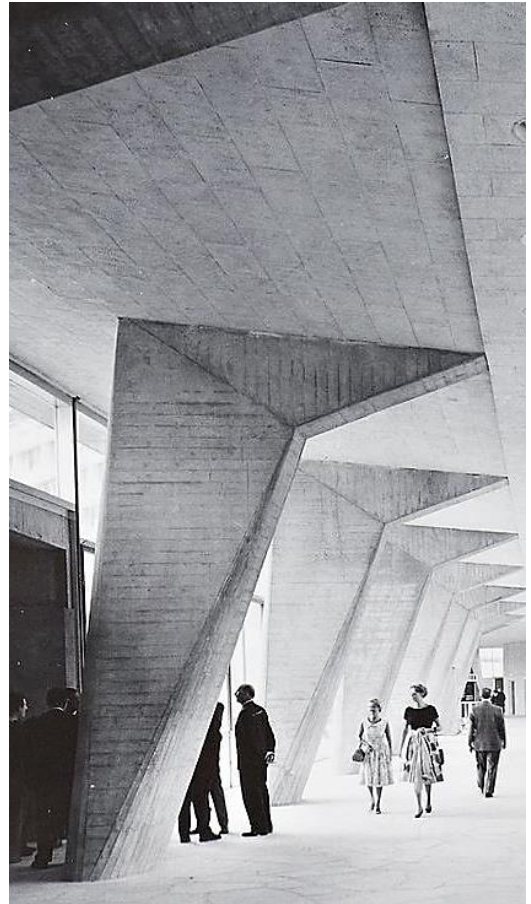
Il s'agit enfin de s'inscrire dans une logique où l'espace est produit dans la mesure du possible avec les matériaux locaux, et où les archétypes architecturaux de la région sont employés et vivifiés ; une connaissance poussée de la nature de chaque matériau et de son emploi dans la mise en œuvre de poteaux, planchers, coupoles, fermettes, etc., est alors nécessaire pour aboutir à un tel résultat.

8.1. Poteaux

« *Pièce de bois posée verticalement et portant des poitrails, des sablières, et parfois des façades ou des planchers* » (Viollet-le-Duc, 1854).

Les éléments verticaux sont communément appelés "poteaux", tandis que le terme "bielle" est réservé aux éléments inclinés capables de supporter des charges horizontales. Les extrémités des bielles sont toujours articulées, et d'autres termes tels que "jambe de force", "buton" ou "bracon" sont également utilisés pour les décrire. Les termes "fût" et "pile" désignent des éléments encastrés à leur base et libres à leur sommet.

Les poteaux doivent être conçus pour résister à la compression, à la flexion due au vent et au flambement. Leur section transversale doit offrir une bonne rigidité à la compression dans toutes les



directions, en particulier le long de leurs axes principaux. Les poteaux utilisés comme montants de portique sont également soumis à des forces de flexion.

Le choix du type de poteau dépend de plusieurs critères, notamment les considérations architecturales, les contraintes d'encombrement, les coûts de matériaux (les profils creux sont généralement plus chers que les profilés), les coûts de mise en œuvre, la complexité des attaches et des liaisons, la facilité d'assemblage des éléments de second œuvre tels que les cloisons, les plafonds et les façades, ainsi que les exigences d'entretien, y compris la peinture et la protection contre la corrosion ou le feu.

Les types de poteaux et de bielles possibles comprennent les profilés en I ou en H, les tubes de différentes sections (circulaire, carrée, elliptique, demi-elliptique), les poteaux reconstitués à partir de laminés assemblés, les caissons, les poteaux treillis, ainsi que des solutions combinant divers profils pour créer des sections variables en associant des tubes et des profilés.

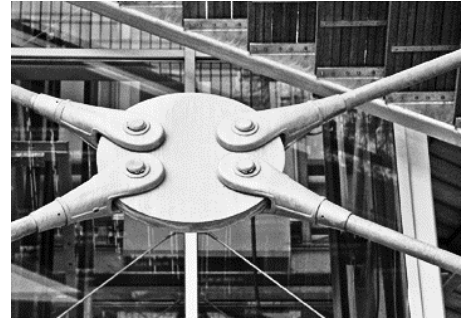
Pour assurer la transmission de la charge de compression au béton de fondation, diverses méthodes sont utilisées. Une pratique courante consiste à fixer une platine à l'extrémité inférieure du poteau, permettant ainsi une répartition uniforme de la pression sur le béton. Les renforcements latéraux, appelés goussets, sont également employés pour une meilleure répartition des contraintes. Une attention particulière est portée à la conception de la forme de la platine et du socle en béton afin d'éviter toute rétention d'eau susceptible de causer la corrosion des aciers. Des ancrages dans le béton sont nécessaires pour maintenir le poteau en place et résister à des forces d'arrachement potentielles.

8.2. Suspentes et les tirants

Les suspentes, à la différence des poteaux, supportent uniquement des charges en traction le long de leur axe. Les tirants, haubans et câbles sont des exemples de suspentes, et ils exercent



une force de traction qui peut avoir à la fois une composante verticale et horizontale. Contrairement aux poteaux, ils ne sont pas soumis au flambement⁷, ce qui signifie qu'ils peuvent avoir une variété de formes de section. Les types de sections les plus couramment utilisés sont les ronds pleins, les plats ou les cornières percées, les câbles et les profils creux dotés d'une platine d'attache soudée à l'extrémité.



Les suspentes sont souvent préférées aux poteaux pour des raisons fonctionnelles, par exemple lorsqu'il est nécessaire de supporter une poutre et de franchir un espace sans point d'appui.

8.3. Poutres

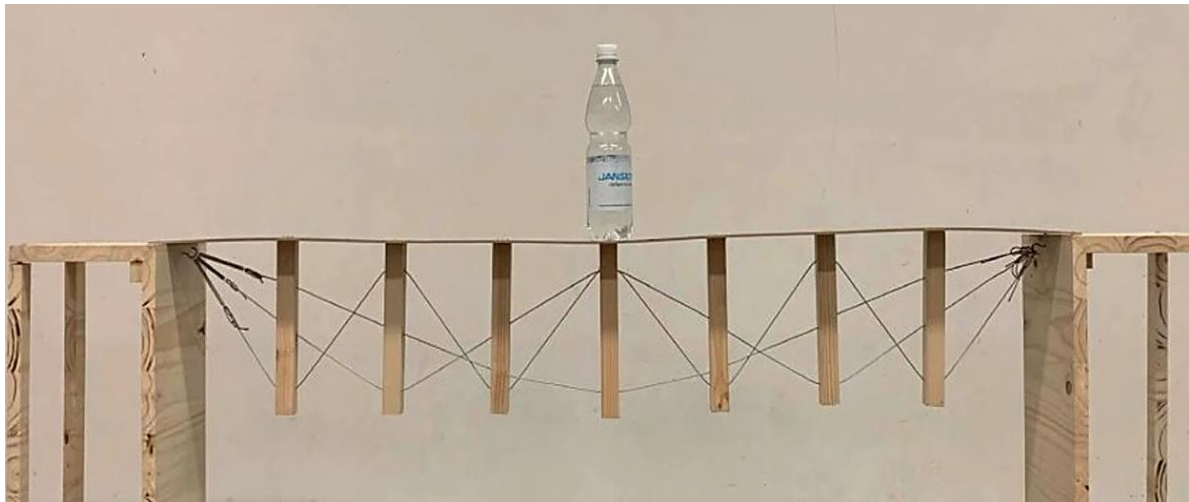
Les poutres sont des éléments horizontaux conçus pour résister principalement à des forces de flexion. Pour accomplir cette tâche, leur section transversale doit avoir une inertie appropriée dans le sens de la flexion, ce qui signifie généralement une certaine hauteur. La flexion engendre des composantes de traction et de compression aux extrémités de chaque section de la poutre. Ces forces sont d'autant plus faibles que la hauteur de la poutre est plus grande. En d'autres termes, augmenter la hauteur de la poutre réduit considérablement les forces auxquelles elle est soumise. Le choix de la section des membrures est donc essentiel pour déterminer la quantité d'acier nécessaire. Ces concepts s'appliquent non seulement aux poutres mais aussi à d'autres éléments similaires tels que les pannes, les chevrons, les traverses, les linteaux, les limons, les raidisseurs, les poutres au vent, les consoles, les porte-à-faux, les cantilevers, et d'autres.



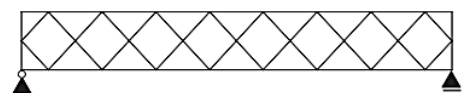
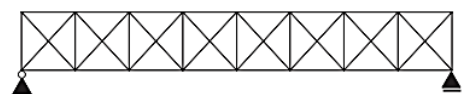
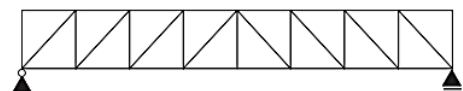
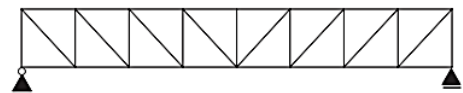
Les poutrelles en acier, telles que les profilés en I et en H, sont couramment utilisées dans la construction pour des charges courantes et des portées moyennes. Elles sont idéales pour constituer la structure des planchers, des façades et des couvertures, tout en permettant la liaison avec d'autres éléments de la structure. Ces poutrelles travaillent principalement en flexion verticale.

⁷ Flambage : quand une structure subit une compression dans le sens de sa longueur, elle a tendance à fléchir perpendiculairement à l'axe de la force appliquée en raison d'un phénomène d'instabilité élastique.

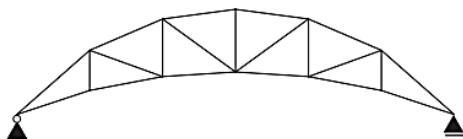
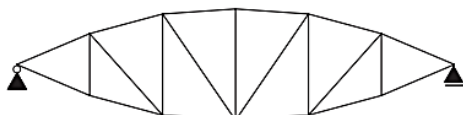
Les poutres reconstituées soudées (PRS) sont fabriquées en soudant des tôles, des plats ou des plaques pour former des poutres symétriques ou dissymétriques. Cette méthode permet de concevoir des poutres optimisées en fonction des charges qu'elles doivent supporter, ce qui est particulièrement avantageux pour les portées plus longues.



Les poutrelles ajourées, également appelées poutrelles alvéolaires, sont obtenues en découpant des laminés en demi-poutrelles et en les soudant pour créer une structure plus légère. Ces poutrelles facilitent le passage des gaines et des fluides, les rendant adaptées aux immeubles de bureaux et à des portées plus importantes.

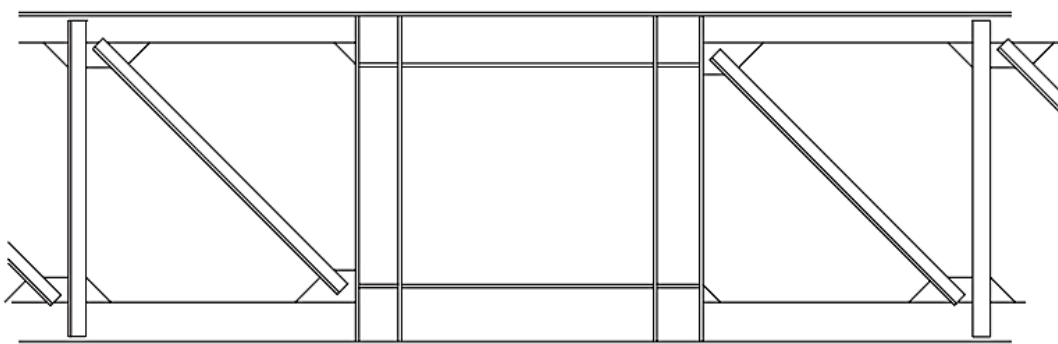
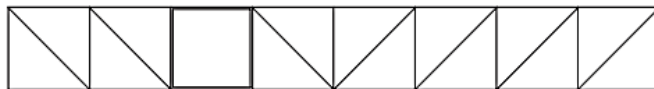


Les poutres en treillis sont formées par l'assemblage de barres pour créer une structure stable. Elles permettent de franchir de plus grandes portées mais peuvent nécessiter des assemblages complexes. Il existe différents types de poutres en treillis, notamment celles avec des membrures parallèles comme les poutres en N, en V (poutres Warren) ou en croix de Saint-André.



Les poutres à membrures non parallèles sont conçues pour optimiser la répartition des matériaux en fonction des charges. Elles peuvent avoir des membrures de profils différents, l'une en compression et l'autre en traction, pour maximiser la performance en fonction de la situation.

Les poutres échelles, ou poutres Vierendeel, ont des assemblages rigides sans diagonales. Elles forment un système hyperstatique très rigide, bien que plus lourd que d'autres types de poutres. Cela permet de libérer l'espace central de la poutre pour laisser passer des circulations et des gaines. Elles peuvent être jumelées avec des poutres treillis pour renforcer la structure.



8.4. Portiques

Les portiques jouent un rôle essentiel dans la construction métallique en assemblant de manière continue les poutres ou les arbalétriers⁸ avec les poteaux. Ils peuvent être fabriqués à partir de différents types de profils métalliques, notamment des I, des H, des tubes, des PRS à section variable ou constante, des caissons, ou des éléments en treillis. Les éléments constitutifs des portiques contribuent à la résistance aux charges verticales et horizontales et génèrent des forces horizontales sur leurs points d'appui. En général, ces éléments présentent leur plus grande inertie dans le plan du portique pour résister à la flexion dans ce plan.



Il existe plusieurs types de portiques, avec deux ou trois articulations, et ils peuvent être rigides ou semi-rigides. Les quatre principaux types de portiques à rez-de-chaussée sont les suivants :

Portique à trois articulations : Ce portique est isostatique, avec un moment nul à la clef

⁸ Poutres obliques portant un des deux versants du toit.

indépendamment de la charge. Il permet d'optimiser la hauteur libre, mais il peut avoir des déformations importantes sous des charges horizontales.

Portique à pieds de poteaux articulés : Ce portique est hyperstatique, avec une rigidification des assemblages poteaux-poutres qui stabilise les cadres. Il utilise moins de matériau que le portique à trois articulations.

Portique à pieds de poteaux encastrés : Ce type de portique présente des encastresments en pied des poteaux, ce qui permet d'utiliser des sections moins importantes pour résister aux moments de flexion. Cependant, les déplacements sous l'action de forces horizontales sont limités, ce qui entraîne des sections plus grandes pour les poutres et les poteaux.

Portique totalement encastré : Ces portiques sont fortement hyperstatiques et sont utilisés pour supporter des charges importantes sur de grandes portées. Cependant, ils absorbent peu les tassements différentiels et les variations thermiques. Ils sont couramment utilisés dans les bâtiments à plusieurs étages, bien que les assemblages complexes au niveau des planchers puissent être un inconvénient.

En général, les portiques sont plus coûteux que les structures avec contreventements, mais ils offrent un avantage en termes d'encombrement de l'espace et de flexibilité d'utilisation pour des changements futurs d'affectation des locaux ou des immeubles.



8.5. Arcs et catènes⁹

Il existe trois principaux types d'arcs dans la construction métallique, chacun ayant des caractéristiques distinctes :

L'arc à trois articulations : cette structure est isostatique, ce qui signifie qu'elle ne comporte pas de moment à la clef de l'arc. Elle est conçue pour



⁹ La catène arbore une géométrie inverse à celle de l'arc.

absorber les tassements différentiels et les dilatations grâce à ses articulations. Cependant, les moments dans cette structure peuvent être assez importants, ce qui nécessite des sections de matériau plus importantes.

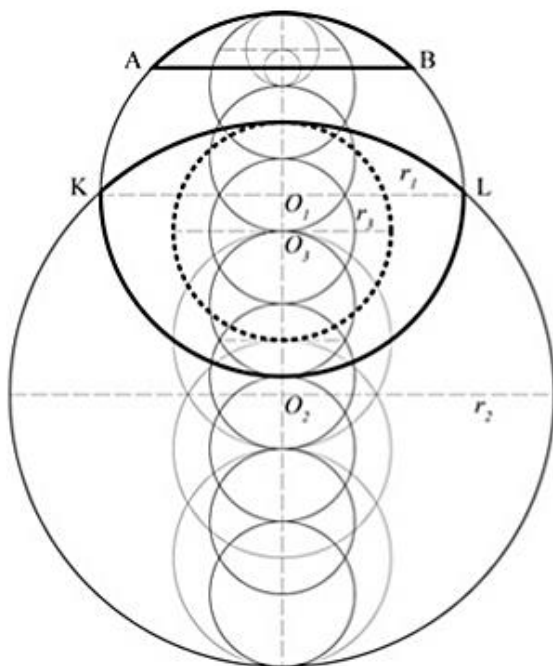


L'arc à deux articulations : dans ce type d'arc, les appuis sont articulés, ce qui rend la structure hyperstatique. Les moments sont généralement moins importants dans ce type d'arc par rapport à l'arc à trois articulations, ce qui permet d'utiliser des sections de matériau plus petites. Cependant, les tassements différentiels peuvent créer des contraintes supplémentaires dans la structure.

L'arc encastré : Les appuis de cette structure sont encastrés, ce qui la rend également hyperstatique. Des moments¹⁰ sont transmis aux appuis, ce qui peut nécessiter des fondations plus importantes pour supporter ces moments. Cette configuration peut être utilisée lorsque des charges importantes doivent être supportées.



Chacun de ces types d'arcs a ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépendra des besoins spécifiques de la conception et des charges à supporter.



¹⁰ Le moment d'une force par rapport à un point donné est une grandeur physique vectorielle traduisant l'aptitude de cette force à faire tourner un système mécanique autour de ce point, souvent appelé pivot.

8.6. Structures spatiales :

Les composants couramment utilisés dans la construction en charpente métallique, tels que les poteaux, les poutres, les fermes et les portiques, sont généralement disposés dans un plan où sont concentrées toutes les forces, charges et contraintes qui agissent sur la structure. En assemblant plusieurs de ces composants dans un espace à trois dimensions, on obtient une structure tridimensionnelle stable. Lors du montage de portiques, par exemple, des étaçons¹¹ temporaires doivent être utilisés car les éléments ont une rigidité insuffisante hors du plan.



Une poutre est conçue pour supporter plusieurs charges sur deux points d'appui ou plus. Une structure spatiale, par extension, est une poutre en treillis conçue dans un espace tridimensionnel. Ces treillis, composés de barres droites, sont reliés par des nœuds, et les articulations permettent aux barres de subir uniquement des forces de traction ou de compression lorsque des charges sont appliquées aux nœuds. Les nœuds dans les structures spatiales sont considérés comme des rotules, ce qui signifie qu'ils offrent une grande flexibilité (Deplazes, 2005).



Contrairement aux composants de stabilité conventionnels, une structure spatiale tridimensionnelle est autoportante. Elle offre une rigidité intrinsèque dans toutes les directions de l'espace pour toutes les sollicitations. Ces structures présentent de nombreux avantages, notamment la possibilité de préassembler des éléments au sol et de les lever en place, une utilisation plus efficace des matériaux, une légèreté, une transparence, une esthétique et une flexibilité accrues. Cependant, elles peuvent poser des défis en termes de transport et d'assemblage coûteux.



Il existe trois principales typologies de structures spatiales :

Les poutres triangulaires.

Les doubles nappes.

¹¹ Grosse pièce de bois dressée pour soutenir.

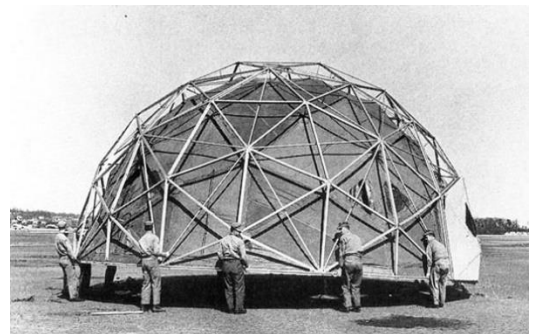
Les voûtes et les coques.

8.7. Voûtes, coupoles et dômes :

Le principe de l'arc peut être appliqué pour créer des nappes courbées dans une direction, formant ainsi une voûte. En effectuant une rotation autour de l'axe vertical passant par la clé de l'arc, on obtient la forme d'un dôme géodésique. Cette conception a été inventée et popularisée par Buckminster Fuller. L'un de ses dômes les plus célèbres est celui du pavillon des États-Unis à l'Exposition universelle de Montréal, qui avait un diamètre de 76 mètres. Ces structures sont capables de couvrir de vastes surfaces avec un poids considérablement réduit par rapport à d'autres méthodes de construction.



Lorsque les courbures de la structure sont faibles ou que des portées importantes sont nécessaires, on peut renforcer la nappe en ajoutant une deuxième surface dont les nœuds sont connectés à ceux de la première par des diagonales spatiales. Cela renforce la structure tout en conservant sa légèreté et sa capacité à couvrir de grandes étendues.



Les modalités de réalisation en maçonnerie de ce type d'ouvrage, se transmettent depuis des milliers d'années dans certaines cultures. C'est ainsi que l'architecte Hassan Fathy, secondé par Abdelwahed El-Wakil, a su magnifier l'art nubien, en faisant des œuvres poétiques en briques d'adobe, et en utilisant la coupole et la voûte construites sans cintrage (Steele, 1997).



8.8. Structures tendues et haubanées

Les structures tendues, qui ont des applications modernes variées, ont en réalité une longue histoire. Les nomades du Maghreb et du Moyen-Orient utilisaient depuis longtemps de grandes tentes en peau tendue. Il y a plus de vingt siècles, les Romains utilisaient d'immenses vélums en toile de lin tendue au-dessus des stades et des cirques, renforcés par des filins de chanvre et ancrés dans les maçonneries (Frei, 1984).

Aujourd'hui, les concepteurs ont recours aux structures tendues pour plusieurs raisons :

Les avancées dans les technologies et les matériaux légers de grande résistance, tels que les textiles divers, l'aluminium, les plastiques armés, les aciers spéciaux, le titane, permettent de créer des structures légères capables de couvrir de vastes espaces. Ces structures offrent des avantages esthétiques et répondent à de nouveaux besoins, notamment en termes d'enveloppes modulables, d'escamotage, de transmission de la lumière et de libération des espaces de toute contrainte structurelle.

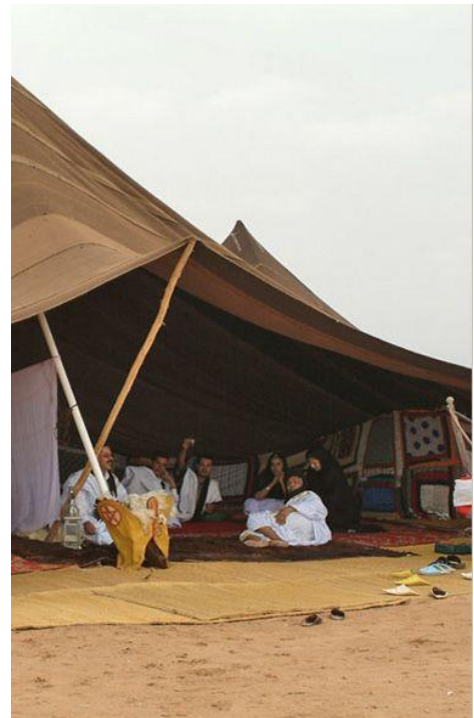
Les structures haubanées sont particulièrement efficaces pour supporter des charges importantes sur de grandes distances. En utilisant la traction simple, elles minimisent le rapport matière-prix en exploitant pleinement la capacité de résistance de l'acier tout en évitant les problèmes liés à la compression ou à la flexion. Cette technique permet également d'utiliser des matériaux incapables de résister à la compression ou à la flexion, tels que les tissus naturels ou synthétiques, en les soumettant à des forces de traction maximales.

Il existe plusieurs familles de structures tendues, notamment :

Les structures suspendues :

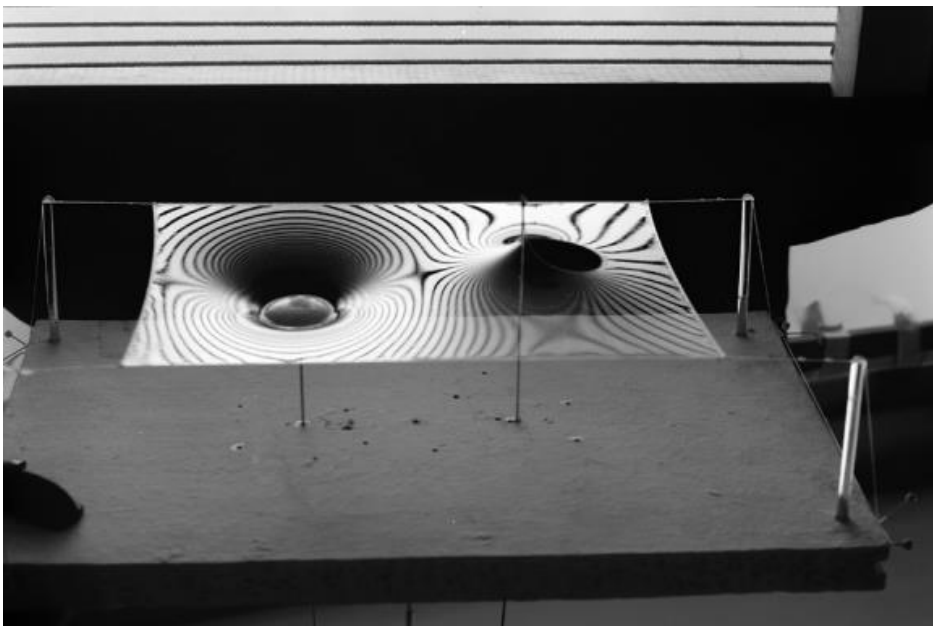
Les structures suspendues sont conçues pour reprendre des charges en utilisant le principe de la caténaire. Elles sont adaptées pour absorber des charges verticales telles que le poids propre, la neige, les surcharges constantes ou mobiles, et certaines sollicitations du vent.

Dans le cas où le poids propre de la structure est



supérieur aux charges verticales dues au vent, les câbles sont courbés dans le même sens de courbure. Cela se produit dans les structures lestées en cylindre, en calotte sphérique ou parabolique suspendues.

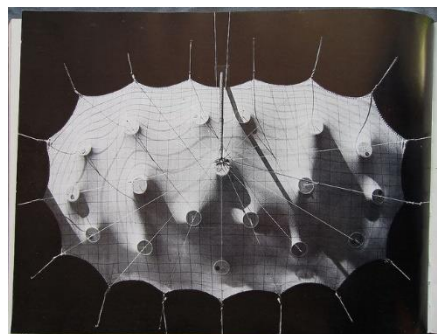
Si le poids propre est inférieur aux charges extérieures dirigées vers le haut (vent), la structure tendue utilise deux familles de câbles de courbure opposée, formant des surfaces à double courbure. Les câbles porteurs et les câbles tenseurs travaillent ensemble pour résister aux sollicitations (.



Les structures suspendues lestées :

Dans ce type de structure, un lest, généralement en béton armé, est porté par des câbles désolidarisés du support lesté. Les câbles porteurs sont ancrés en tête de poteaux métalliques, et les efforts de traction sont ramenés au sol par des haubans.

La surface de couverture peut être un cylindre parabolique, et cette configuration est courante dans les toitures légères. Lorsque la surface de la couverture comporte deux courbures de même signe, une coque est obtenue.



Les structures légères en câbles non lestées :

Ces structures utilisent des poutres-câbles où tous les éléments sont tendus, sans compression ni

flexion. Les charges extérieures sont reprises par des câbles porteurs et des câbles tenseurs. Les poutres-câbles peuvent avoir une seule trame ou plusieurs travées continues.

Les poutres à câbles rayonnants suivent le principe des roues de vélo, où des câbles tendus transmettent les efforts à un élément de rive en compression, évitant ainsi la nécessité d'utiliser des haubans d'ancrage.

Les maillages ou filets de câbles, développés notamment par des ingénieurs tels que Frei Otto et René Sarger, sont une autre variante de ces structures. Ils utilisent des câbles porteurs et des câbles tenseurs formant une surface à double courbure inverse, telle qu'un parabolôïde hyperbolique.

Les structures haubanées :

Les structures haubanées sont principalement utilisées pour les ponts. Les haubans sont essentiels pour la stabilité de la structure. Ils peuvent être fixés en éventail, en harpe ou en semi-éventail en tête de pylône.

Chaque câble haubané reprend une partie du poids du tablier, créant une compression dans le tablier en raison de leur inclinaison par rapport à la verticale. Les charges de compression doivent s'équilibrer, ce qui explique la symétrie de l'haubanage par rapport au pylône.

8.9. Ossatures légères

La construction en ossature légère en acier est une technique de construction inspirée par la construction à ossature bois, mais elle utilise des profils minces en acier galvanisé. Cette méthode est couramment employée en Amérique du Nord et au Japon. Les profils en acier laminé à froid ont généralement une section en forme de C, U, Z ou sigma, avec des épaisseurs de tôle variant de 0,6 à 2,5 mm, ce qui les rend très légers, pesant au maximum environ 0,075 kN/m. Ces profils sont assemblés de diverses manières, notamment par vissage à l'aide de vis autotaraudeuses¹² avec des



¹² Les vis autotaraudeuses, communément appelées taraudeuses, sont conçues pour être utilisées avec

visseuses portatives, par clouage avec des pistolets pneumatiques, par boulonnage ou par clinchage¹³.



Les ossatures légères en acier sont composées de montants verticaux, généralement espacés tous les 60 cm, et de traverses horizontales. Sur ces ossatures, on fixe ensuite des éléments plats tels que bardages, plateaux supportant le bardage, parements extérieurs, plaques de plâtre ou de fibres pour les finitions intérieures. Les façades peuvent être revêtues de différents matériaux tels que le métal, le bois, la brique, l'enduit, etc., tandis que les toitures peuvent être construites avec divers matériaux tels que des tuiles en terre cuite, des panneaux métalliques, etc. Cette flexibilité permet de nombreuses options de conception, notamment des porte-à-faux, des étages multiples, de grandes baies vitrées, etc.

Les montants verticaux comportent des ouvertures qui permettent le passage de câbles, de tuyaux et de réseaux à l'intérieur des murs ou des cloisons. Le contreventement peut être assuré à l'aide d'écharpes diagonales ou de panneaux plats.

Plusieurs méthodes de montage sont disponibles.



un avant-trou. La raison en est que la plupart de ces fixations n'ont pas la capacité de pénétrer dans une surface et de percer leur propre trou lors de l'installation. Mais là où ils réussissent, c'est à créer leur propre fil conducteur dans la matière.

¹³ Procédé d'assemblage de deux tôles minces consistant à les emboutir simultanément entre un poinçon et une matrice pour former un point de jonction par déformation plastique.

Les profils minces peuvent être livrés sur chantier sous forme de fagots découpés à la longueur souhaitée, puis assemblés sur place par vissage ou boulonnage. Une petite équipe peut monter la structure d'une maison sur une chape de fondation en quelques jours seulement. Une autre option consiste à préassembler en atelier des éléments, voire des panneaux entiers de grande taille, pour simplifier le montage sur place et améliorer la qualité de finition.

Cette méthode de construction permet de réaliser des bâtiments allant jusqu'à deux étages, qui sont très légers et résistants aux sollicitations sismiques. Elle convient parfaitement à la construction de maisons individuelles ou de petits équipements tels que des hôtels ou des bureaux. Les performances thermiques et acoustiques de ce type de construction sont excellentes, grâce à la possibilité d'optimiser l'isolant placé à l'intérieur des murs et sur leur face externe, ainsi qu'à la flexibilité pour ajuster l'épaisseur et le nombre de plaques de plâtre. Il est également essentiel de prendre certaines précautions lors du montage, telles que la désolidarisation des planchers et l'utilisation de joints résilients pour garantir une isolation acoustique efficace.



8.10. Planchers, dalles et plateaux en béton armé

Le béton armé est un matériau largement utilisé en construction, notamment en milieu urbain, en raison de son coût relativement bas par rapport à d'autres matériaux de construction et de sa facilité de mise en œuvre, ne nécessitant pas de main-d'œuvre hautement qualifiée.

Cependant, le béton armé présente un défi en termes d'esthétique architecturale. Contrairement à d'autres méthodes constructives où l'assemblage est apparent et peut être considéré comme une forme de beauté, le béton armé expose souvent les empreintes des coffrages utilisés pour le couler. Ces coffrages peuvent être de véritables chefs-d'œuvre d'assemblage dans certaines situations, mais ils créent des motifs de surface sur le béton qui peuvent être indésirables du point de vue esthétique.



Dans l'architecture ancienne, notamment à Rome à l'époque antique, on cherchait à masquer le béton en utilisant des revêtements tels que des pierres ou des briques pour créer l'apparence de murs traditionnels. Cependant, le béton armé est en réalité un matériau hybride qui combine la résistance à la compression du béton avec la résistance à la flexion de l'acier. L'acier est généralement enfoui sous une couche de béton, appelée « enrobage », et n'est pas visible.

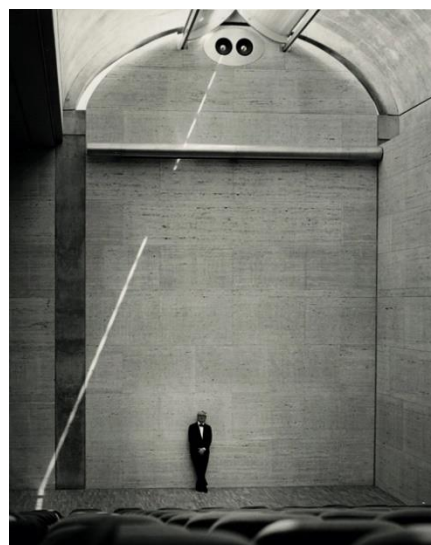


Le béton armé est un matériau malléable avant son durcissement, ce qui signifie qu'il peut prendre pratiquement n'importe quelle forme. Les limites de sa forme sont déterminées par les techniques de coffrage disponibles. Le matériau lui-même n'a pas de couleur, de forme, de texture ou de dimensions fixes. Il peut prendre toutes ces caractéristiques en fonction de la manière dont il est utilisé et mis en forme. Les surfaces de béton produites lors de la construction sont ce qui donne son identité à un bâtiment lorsque le béton reste exposé.



L'un des problèmes courants dans les structures en béton armé est le manque d'enrobage suffisant. L'enrobage doit atteindre une épaisseur minimale d'environ 3 cm pour protéger l'acier de l'oxydation à long terme, qui peut entraîner des désagréments et des infiltrations. Pour gagner du temps, il est recommandé d'utiliser des systèmes de coffrage modulaires pour les planchers et les murs, ce qui permet une installation plus rapide et efficace.

Le type de surface en contact avec le béton lors du durcissement, que ce soit en plastique, en bois, en mélaminé, en acier, en fibre de verre, etc., joue un rôle dans la texture finale du béton. Des surfaces plus lisses donneront un aspect plus clair au béton.



En ce qui concerne les planchers, il existe deux types principaux de dalles : unidirectionnelles et bidirectionnelles. Les dalles unidirectionnelles sont couramment utilisées dans les dalles en porte-à-faux ou entre deux murs opposés, tandis que les dalles bidirectionnelles sont placées sur quatre pans de murs (Lamarre, 2003).

Les plateaux, quant à eux, sont utilisés pour contreventer les murs. Ils sont perpendiculaires au sens de flexion de la dalle pour reprendre les efforts

et assurer la stabilité de la structure.

Enfin, des éléments de construction tels que les dalles pliées et les coques minces peuvent être utilisés pour couvrir de grandes distances en raison de leur légèreté relative. Ces systèmes sont souvent employés pour des raisons fonctionnelles, mais ils peuvent également servir d'éléments de conception architecturale intéressants, permettant de créer des motifs et des formes uniques dans les bâtiments. Des architectes renommés tels que Pier Luigi Nervi et Oscar Niemeyer ont utilisé ces systèmes pour créer des structures innovantes.



Définitions

Ancre : pièce de fer placée à l'extrémité d'un chaînage pour maintenir l'écartement des murs. Les ancres étaient bien rarement employées dans les constructions antérieures au XV^e siècle ; les crampons scellés dans les pierres, et les rendant solidaires, remplaçaient alors les chaînages. Mais dans les constructions civiles du XV^e siècle, on voit souvent des ancres apparentes placées de manière à retenir les parements extérieurs des murs. Ces ancres affectent alors des formes plus ou moins riches, présentant des croix ancrées, des croix de Saint-André ; quelquefois, dans des maisons particulières, des lettres, des rinceaux.

Arbalétrier : pièce de charpente inclinée qui, dans une ferme, s'assemble à son extrémité inférieure sur l'entrait, et à son extrémité supérieure au sommet du poinçon. Les arbalétriers forment les deux côtés du triangle dont l'entrait est la base. Dans les charpentes anciennes apparentes ou revêtues à l'intérieur de planches ou bardeaux formant un berceau, les arbalétriers portent les épaulements qui reçoivent les courbes sous lesquelles viennent se clouer les bardeaux. L'arbalétrier porte les pannes recevant les chevrons dans les charpentes antérieures et postérieures à l'époque dite gothique ; mais pendant les XII^e, XIII^e, XIV^e, XV^e et même XVI^e siècles, les arbalétriers sont dans le même plan que les chevrons et portent comme eux la latte ou la volige qui reçoit la couverture. Dans les charpentes non apparentes des grands combles au-dessus des voûtes l'arbalétrier est quelquefois roidi par un sous-arbalétrier destiné à l'empêcher de fléchir dans sa plus longue portée. Dans les demi-fermes à pente simple qui couvrent les bas-côtés des églises, et en général qui composent les combles à un seul égout, l'arbalétrier est la pièce de bois qui forme le grand côté du triangle rectangle.

Arc : c'est le nom que l'on donne à tout assemblage de pierre, de moellon, ou de brique, destiné à franchir un espace plus ou moins grand au moyen d'une courbe. Ce procédé de construction, adopté par les Romains, fut développé encore par les architectes du moyen âge. On classe les arcs employés à cette époque en trois grandes catégories : les arcs plein cintre, formés par un demi-cercle ; les arcs surbaissés ou en anse de panier, formés par une demi-ellipse, le grand diamètre à la base ; les arcs en ogive ou en tiers-point, formés de deux portions de cercle qui se croisent et donnent un angle curviligne plus ou moins aigu au sommet, suivant que les centres sont plus ou moins éloignés l'un de l'autre. Les arcs plein cintre sont quelquefois surhaussés ou outre-passés, dits alors en fer à cheval, ou bombés lorsque le centre est au-dessous de la naissance.

Architecte : ἀρχιτέκτων (archi-tecton). Il ne semble pas que ce nom ait été donné avant le XVI^e siècle aux artistes chargés de la direction des constructions de bâtiments. L'architecture tenait sa place parmi les arts libéraux et était personnifiée par un homme ou une femme tenant une équerre ou un compas ; mais l'artiste, l'homme de métier était qualifié de maître d'œuvre, désignation bien autrement positive, du reste, que celle d'architecte, car par œuvre on entendait tout ce qui constituait l'immeuble et le meuble d'un bâtiment, depuis les fondations jusqu'aux tapisseries, aux flambeaux, aux menus objets mobiliers. Il n'existe aucune donnée certaine sur le personnel des architectes avant le XIII^e siècle. Les grands établissements religieux qui renfermaient dans leur sein jusque vers la fin du XIII^e siècle tout ce qu'il y avait d'hommes lettrés, savants, studieux dans l'Occident, fournissaient très-probablement les architectes qui

dirigeaient non-seulement les constructions monastiques, mais aussi les constructions civiles et peut-être même militaires. Une fois sorti des monastères, l'art de l'architecture, comme tous les autres arts, devient un état. Le maître de l'œuvre est laïque, il appartient à un corps, et il commande à des ouvriers qui font tous partie de corporations ; les salaires sont réglés, garantis par les jurés ; les heures de travail, les rapports des chefs avec les subalternes sont définis. On fait des devis, on passe des marchés, on impose la responsabilité. Hors du cloître l'émulation s'ajoute à l'étude, les traditions se transforment et progressent avec une rapidité prodigieuse, l'art devient plus personnel ; il se divise par écoles, l'artiste apparaît enfin au XIIIe siècle, fait prévaloir son idée, son goût propre.

Charpente : on entend par ce mot toute combinaison et assemblage de bois de gros échantillon destinés à la construction des bâtiments publics ou privés. L'art du charpentier dut être un des premiers parmi ceux que les hommes appliquèrent à leurs besoins. Abattre des arbres, les ébrancher, et les réunir à leur sommet en forme de cône, en remplissant les interstices laissés entre les troncs par du menu bois, des feuilles et de la boue, voilà certainement l'habitation primitive de l'homme, celle que l'on trouve encore chez les peuples sauvages. Dans l'antiquité grecque, les charpentes étaient (autant qu'on peut en juger par le peu d'édifices qui nous restent) d'une grande simplicité. Cependant les Grecs connaissaient déjà l'assemblage de charpente que nous désignons sous le nom de « ferme ».

Colonne : cylindre de pierre posé sur une base ou un socle, recevant un chapiteau à son sommet, employé dans la construction comme point d'appui pour porter une plate-bande ou un arc. Les architectes du moyen âge n'eurent pas à inventer la colonne. Les monuments antiques de l'époque romaine laissaient sur le sol des Gaules une quantité innombrable de colonnes, car aucune architecture ne prodigua autant ce genre de support que l'architecture des Romains.

Coupoles : voûte hémisphérique, ou engendrée par deux courbes se coupant au sommet, ou par une demi-ellipse posée sur plan circulaire ou polygonal, soutenue sur quatre arcs doubleaux ou sur des murs pleins. Le mot coupole n'est employé que depuis l'invasion de l'architecture italienne aux XVIe et XVIIe siècles ; c'est le mot italien *cupola* francisé. Les Romains, dès le temps de la République, avaient élevé des coupoles sur des murs circulaires ou formant un assez grand nombre de pans. Mais ce fut à Byzance que furent érigées par les empereurs les premières coupoles posées sur pendentifs. Il est peu croyable que la célèbre coupole de Sainte-Sophie ait été la première construction tentée en ce genre. Le coup d'essai eût été bien hardi, puisque cette coupole est d'un diamètre supérieur à toutes les autres voûtes sur pendentifs qui existent.

Cure du béton : protection mise en œuvre pour éviter une dessiccation de surface du béton, pour lui assurer une maturation satisfaisante et donc favoriser son bon durcissement.

Enduit : Couverte en mortier, en plâtre ou en blanc-en-bourre¹⁴, posée sur une maçonnerie de moellon, de brique, parfois même sur de la pierre de taille, afin d'obtenir

¹⁴ Qualité d'enduit, formée d'une pâte de chaux grasse ou d'argile coulée dans laquelle on incorporait une certaine quantité de bourre blanche ; La bourre est un matériau constitué par les poils provenant du tannage des peaux, utilisé dans différents métiers.

une surface unie, homogène, propre à recevoir de la peinture.

Façade : On applique le nom de façade aujourd'hui à toute ordonnance d'architecture donnant sur les dehors, sur la voie publique, sur une cour, sur un jardin. Mais ce n'est que depuis le XVI^e siècle, en France, que l'on a élevé des façades comme on dresserait une décoration devant un édifice, sans trop se soucier du plus ou moins de rapports de ce placage avec les dispositions intérieures. Les anciens, non plus que les architectes du moyen âge, ne savaient ce que c'était qu'une façade dressée avec la seule pensée de plaire aux yeux des passants. Les faces extérieures des bons monuments de l'antiquité ou du moyen âge ne sont que l'expression des dispositions intérieures.

Gnomonique : du latin gnomonica mais venant du grec γνωμονικός, est l'art de construire, c'est-à-dire concevoir, calculer et tracer des cadrans solaires.

Héliotropisme : sens de déplacement du soleil au quotidien et durant l'année. Chaux : du Latin calx et grec ancien χάλιξ, qui signifie « argile » ou « cailloux ». Linoleum : mot composé émanant du latin : linum (lin) et oleum (huile).

Hourdis : Maçonnerie de brique ou de plâtras faite entre les membrures d'un pan de bois.

Lasure : de l'allemand Lasur qui signifie « glacié » : enduit pour matériaux poreux tels que le bois.

Lavabos : du latin lavabo ou conjugaison au futur à la première personne du verbe laver. Polymère : mot qui signifie « plusieurs parties » ou plusieurs macromolécules.

Linteau : Bloc de pierre posé sur les jambages d'une porte ou d'une fenêtre pour fermer la partie supérieure. Dans la charpenterie, la pièce de bois horizontale qui remplit le même office s'appelle aussi « linteau ».

Maçonnerie : Toute construction dans laquelle il entre de la pierre ou du moellon, de la brique, du mortier ou du plâtre.

Parpaing : Se dit d'une pierre faisant l'épaisseur d'un mur. Pendant le moyen âge on employait rarement les parpaings. Presque tous les murs en pierre de taille se composaient de carreaux et de boutisses.

Poinçon : Pièce de charpente verticale qui reçoit les extrémités supérieures des arbalétriers d'une ferme ou les arêtiers d'un pavillon et d'une flèche.

Proportion : Les Grecs avaient un mot pour désigner ce que nous entendons par proportion : συμμετρία, d'où nous avons fait symétrie, qui ne veut nullement dire proportion ; car un édifice peut être symétrique et n'être point établi suivant des proportions convenables ou heureuses. Rien n'indique mieux la confusion des idées que la fausse acception des mots ; aussi ne s'est-on pas fait faute de confondre dans l'art de l'architecture, depuis le XVI^e siècle, la symétrie, ou ce qu'on entend par la symétrie, avec les rapports de proportions ; ou plutôt a-t-on pensé souvent satisfaire aux lois des proportions en ne se contentant que des règles de la symétrie.

Silicate : sel composé d'un acide silicique SiO_2 , et d'une base telle que le calcium.

Unité : Dans toute conception d'art, l'unité est certainement la loi première, celle de laquelle toutes les autres dérivent. En architecture, cette loi est peut-être plus impérieuse encore que dans les autres arts du dessin, parce que l'architecture groupe tous ces arts pour en composer un ensemble, pour produire une impression. L'architecture tend à un résultat suprême : satisfaire à un besoin de l'homme. La pensée de l'artiste, en composant un édifice quelconque, ne doit jamais perdre de vue ce but à atteindre, car il ne suffit pas que sa composition satisfasse matériellement à ce besoin, il faut que l'expression de ce besoin soit nette : or, cette expression, c'est la forme apparente, le groupement en faisceau, de tous les arts et de toutes les industries auxquels l'architecte a recours pour parfaire son Œuvre. Plus une civilisation est compliquée, plus la difficulté est grande de composer d'après la loi d'unité ; cette difficulté s'accroît de la masse des connaissances d'arts antérieurs, des traditions du passé, auxquelles la pensée de l'artiste ne peut se soustraire, qui l'obsèdent, s'imposent à son jugement, et entraînent, pour ainsi dire, son crayon dans des sillons déjà tracés.

Voûte : ouvrage de maçonnerie cintré, en arc, dont les pièces se soutiennent les unes les autres, qui sert à couvrir un espace.

Bibliographie¹⁵

AMO (1997) Les Bâisseurs : Des moines cisterciens aux capitaines d'industrie. Le Moniteur : 208p.

Bona M Hertzberger H (2018) Entretien avec Mario Botta. EPFL : p317-334. Choisy F A (1899) Histoire de l'architecture. Tome 2. Gauthier-Villars: 530p. Choisy F A (1909) Vitruve. Tome 1. Lahure : 410p.

Coignet L, Coignet J (2007) Maçonnerie de pierre : Matériaux et techniques, désordres et interventions. Eyrolles : 116p.

Crémet, Lusson (2004) Les métiers du bâtiment : La maçonnerie dans la maison individuelle, BEP - CAP - BAC PRO. Foucher Scolaire : 192p.

Davidovits J (2011) Geopolymer Chemistry & Applications. Ed. Institut Géopolymère : 698p.

Deplazes A (2005) Construire l'architecture : Du matériau brut à l'édifice. Birkhauser: 592p.

Frampton K (2007) Modern Architecture. Thames & Hudson Ltd: 736p.

Frei O (1984) Schriften und Reden. Berthold Burkhardt, Heinrich Klotz : 132p.

Fueg F (1986) Les bienfaits du temps : Essai sur l'architecture et le travail de l'architecte.

Gargiulo M R, Bergamasco I (2006) The Use of Earth in the Architecture of Hassan Fathy and Fabrizio Carola: Typological and Building Innovations, Building Technology and Static

Behaviour. Second International Congress on Construction History, Queens' College, Cambridge University : p1209-1220.

Givoni B (1978) L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur : 460p.

Houben, H, Guillaud, H (1989) Traité de construction en terre. Marseille, CRATerre. Editions Parenthèses : 360p.

Jorgensen J, Lundo H (2006) Forces invisibles. Documentaire : 55 min.

Kahn L (2006) Silence et lumière. PICARD DIFFUSES : 300p.

Lamarre F (2003) Architecture en béton de ciment blanc. Le Moniteur : 100p.

Mittag M (1977) Pratique de la construction des bâtiments : Baukonstruktionslehre, aide-mémoire à l'usage des ingénieurs, architectes et entrepreneurs. Office international de la librairie ; Eyrolles édition : 352p.

¹⁵ La quasi-totalité des ouvrages de référence, sont disponibles au niveau de la bibliothèque du département d'architecture de la FST de Mostaganem.

Nervi P L (1984) Histoire Mondiale de l'Architecture. Berger-Levrault : 406p. Peirs G (2004) La brique : Fabrication et traditions constructives. Eyrolles : 110p. Pouillon F (2006) Les pierres sauvages. SEUIL : 288p.

Plateforme en ligne des sciences de la construction, de l'Académie de Nantes : btscm.fr

Pouillon F (1976) Maître d'œuvre, naissance d'une abbaye. Ed. de Nobeles : 40p. Prieur J (1981) Prieur J (1981) La lumière dans la maison. Éd. du Moniteur : 143p.

Rabago J (2003) Le sens de bâtir : Architecture et philosophie. Lucie éditions : 186p. Rabin D (2021) La maison sur mesure. Le Moniteur : 296p.

Smith K Weintraub A (2009) Frank Lloyd Wright: American Master. Rizzoli : 400p. Suzuki M (1979) Maisons de bois en Europe. Office Du Livre Fribourg : 289p.

Schwarz R (2005) Von der Bebauung der Erde. Pustet Anton : 244p.

Steele J (1997) An architecture for the people: The Complete Works of Hassan Fathy. Thames & Hudson.

Viollet-le-Duc E E (2016) Entretiens sur l'architecture. Wentworth Press : 88p.

Viollet-le-Duc E E (1854) Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle. Édition BANCE : 563p.

Von Meiss P (2012) De la forme au lieu + de la tectonique : Une introduction à l'étude de l'architecture. PPUR : 384p.

Von Meiss P (1993) De la cave au toit, témoignage d'un enseignement en architecture. PPUR. : 96p.

Wheeler K (2014) Uncovering the Missing Secrets of Magnetism: Exploring the nature of Magnetism, with regards to the true model of atomic geometry and field mechanics by means of rational physics & logic. Kindle Edition : 480p.

Wright F L (1970) An Organic Architecture: The Architecture of Democracy. MIT Press : 104p.