
THÉORIE DE L'ARCHITECTURE

LIVRE 2b
FORMES ET STRUCTURES

Jean Doulliez

TRAITÉ DE THÉORIE DE L'ARCHITECTURE
INSTITUT SUPÉRIEUR D'ARCHITECTURE INTERCOMMUNAL (ISAI)
Site de Mons (ISAM), Belgique
Notes de cours provisoires 1996

THÉORIE DE
L'ARCHITECTURE

SOMMAIRE GÉNÉRAL DES QUATRE VOLUMES

Volume 1 (1^è ANNÉE)

Livre 1A : Architecture, espace et perception

Première partie : Totalité architecturale et grille d'analyse

L'architecture est définie comme une totalité spécifique au carrefour de l'art et des techniques ainsi que des sciences humaines et des sciences appliquées. Une grille générale d'analyse et de caractérisation de l'architecture est établie en tenant compte des critères principaux des lois esthétiques : forme, grandeur, position, densité, degrés d'ordre et d'unité. Les différentes contraintes et exigences du contexte sont énumérées par catégorie, en relation avec les modes d'évaluation et de formation des espaces et des formes. Un premier exemple est introduit en comparant deux espaces urbains de conception opposée.

Deuxième partie : Introduction à l'espace architectural

Pour illustrer la grille d'analyse, un deuxième exemple est issu de la conception contemporaine des espaces intérieurs. En introduction aux premiers exercices d'architecture à l'atelier, un condensé sur la caractérisation de l'espace architectural et les types d'espaces architecturaux est présenté avec les thèmes essentiels qui seront développés dans les livres suivants.

Troisième partie : Espace, perception et détermination

Après avoir passé en revue les rapports entre tous les sens corporels et l'espace, les notions élémentaires d'appropriation et d'identification de l'espace architectural sont introduites grâce aux propriétés psychocorporelles telles que : **ellipse visuelle**, **axes dynamiques** et **bulle psychologique**. Les notions d'*espace positif* et d'*espace négatif* d'une part, et celles d'*espace statique* et d'*espace dynamique* d'autre part, sont introduites dans le cadre de ces concepts psychologiques. Les conséquences des **lois de perception** des figures sur la composition d'un espace architectural, le dimensionnement, la proxémie et le jugement esthétique, sont passées en revue.

Livre 1B : Variables et géométrie de l'espace

Étude des **variables** qui agissent directement sur l'objet architectural : *temps, matière, lumière, couleur*. Étude des **composants géométriques** fondamentaux de l'architecture et leur réalité spatiale. Les *points*, les *lignes*, les *surfaces* et les *volumes* constituent les descripteurs de base qui, selon leur assemblage, déterminent des expressions esthétiques et spatiales différentes. Le chapitre se termine par l'étude des degrés de détermination de «l'espace unitaire».

Livre 1C : Composition et paramètres du contexte

Étude des exigences du contexte et leurs conséquences sur le processus de composition. L'étude des **paramètres humains** est réalisée en fonction des connaissances requises pour la composition architecturale dans les deux premières années : exigences de dimensions, d'intimité et de territorialité. Les **paramètres du milieu physique** comprennent les exigences climatiques principales nécessaires aux options fondamentales à prendre lors des différentes phases du projet : orientation, vents dominants, ensoleillement, relations au site, etc. Ces exigences sont reliées à la notion de lieu. Les **paramètres fonctionnels** étudiés se rapportent essentiellement aux fonctions de l'habitation et à leurs exigences d'aménagement intérieur. Les **paramètres constructifs** sont simplement énumérés ici et font l'objet du livre 2B.

Volume 2 (2^e ANNÉE)

Livre 2A : Théories contemporaines

Raccourci des doctrines architecturales à travers l'histoire contemporaine de l'habitation isolée. Bien sûr, toute l'histoire de l'architecture est digne d'être source d'inspiration et les exemples de composition en prise directe sur un contexte spécifique ne manquent pas. Cependant, le développement du projet dans son contexte contemporain le plus authentique implique d'abord comme références essentielles l'architecture moderne et ses prolongements. L'effet de mode n'est pas nécessairement à proscrire. Pourtant, il semble préférable de limiter les débuts de l'apprentissage à ce qui paraît le plus durable : l'espace tactile, lumineux, sa qualité, son approche, sa géométrie, bref, tout ce que le Modernisme a développé depuis le Bauhaus. Il est donc normal de plonger les racines du projet architectural dans ce mouvement (et particulièrement la «réinterprétation moderniste de la tradition régionale») et de s'initier progressivement à des codes plus récents et plus complexes. Sans être entièrement neutre, l'enseignement ne peut donc être doctrinaire. C'est à l'étudiant de se choisir plus tard sa propre doctrine. Le premier objectif est de porter un jugement critique sur les doctrines récentes et d'en dégager ce qui est durable. Il vaut mieux enseigner la capacité de résoudre un problème de composition quel qu'il soit plutôt que de s'enfermer dans un seul code.

Livre 2B : Formes et structure.

Étude du vocabulaire architectural de base en rapport avec les principaux systèmes constructifs. La compréhension intuitive et les conséquences esthétiques des formes architecturales sous l'angle des principes constructifs, commencent par la distinction entre «systèmes massifs» et «systèmes à ossatures» ainsi que par les notions de «formes structurales». Des systèmes établis selon la transmission des efforts sont ensuite passés en revue : *systèmes à forme active, à vecteur actif, à volume actif et à surface active*. Un vocabulaire de base des éléments structuraux de l'architecture tels que *arcs, voûtes, poutres et colonnes*, est analysé suivant leur contribution à la stabilité et au report des charges.

Volume 3 : Composition et critères de base (3^e ANNÉE)

Essai d'établissement de lois de composition à travers des principes théoriques d'analyse et de caractérisation. La description des caractères architecturaux suivant les modes réel, perceptif et significatif sont étudiés en commençant par les critères de base : **forme, grandeur, intervalle, direction, densité, position relative**. Chacun d'entre eux est mis en relation avec chacune des opérations fondamentales de la composition architecturale, à savoir : créer une forme, dimensionner, répéter ou multiplier, séparer ou rapprocher, orienter, ouvrir ou fermer, positionner «par rapport à».

Volume 4 : Composition et critères d'organisation (4^e ANNÉE)

Essai d'établissement de lois de composition à travers des principes théoriques d'analyse et de caractérisation, cette fois à travers l'étude des critères d'organisation qui donnent à l'objet ordre et cohérence. La notion d'**ordre** est évoquée par le concept de *structure*, qui décrit toutes les relations, internes et externes, entre les éléments d'une totalité ainsi que les éléments eux-mêmes. On peut distinguer : la structure externe (*morphologie, types d'organisation, degrés d'ordre, équilibre, harmonie, contraste, opposition, tension, rythme*), et la structure interne (relative aux activités et aux fonctions); l'**unité** et le degré de cohérence relèvent des notions de *jonction, articulation, gradation, progression*; la *coexistence* étudie les degrés de dialogues possibles entre une totalité et une autre qui préexiste. Là encore, ces distinctions correspondent aux objectifs de toute composition architecturale : mettre un certain ordre dans la composition et lui donner une cohérence.

Avant - Propos

Cet ouvrage fait suite aux premières notes de cours attribuées depuis 1983 aux étudiants de l'Institut Supérieur d'Architecture Intercommunal (ISAI), site de Mons, dans le cadre du cours de théorie de l'Architecture. La présente édition constitue une mise à jour des notes précédentes. Il s'agit donc d'une étape intermédiaire avant d'obtenir un ensemble relativement complet de références compréhensibles et utilisables pour la pratique du projet. Le texte de base a été augmenté d'une documentation sous forme d'illustrations, de descriptions et de lectures, qui complètent les informations pédagogiques essentielles qui sont enseignées.

Introduction

La qualité architecturale (ou ce qui revient au même, ce qui donne à l'architecture sa signification), dépend des différentes correspondances entre les formes et les exigences, elles-mêmes dépendantes des intentions initiales. La technique est un MOYEN pour remplir ces exigences. Si la technique n'est qu'un moyen, elle est cependant étroitement liée aux conditions socioculturelles du contexte.

Par exemple, les temples grecs, conçus et réalisés sur les mêmes bases techniques et mêmes principes constructifs que les temples égyptiens, possèdent des différences marquantes par rapport à ces derniers quand à l'organisation du plan, les formes et les élévations. Deux modes constructifs identiques peuvent donc correspondre à deux cultures différentes et entraîner des expressions distinctes.

Cette partie fait l'objet d'une synthèse des principes constructifs généraux et des caractères spécifiques que ces principes engendrent (caractérisation constructive et vocabulaire constructif).

Les détails techniques proprement dits qui réfèrent plutôt aux procédés d'exécution et de réalisation ne seront pas envisagés ici. Cependant, il ne faut pas oublier que le principe de la correspondance est aussi valable au niveau du détail. Par exemple, il y a des relations du même ordre entre la forme d'un chéneau et les principes techniques qui s'y rapportent.

Définitions

1. Système constructif et ordre technique

La dimension technique abordée ici ne se rapporte pas à la connaissance des matériaux, ni aux lois détaillées de la résistance ou de la stabilité. Le but est de réaliser une synthèse du rôle et de la place de la DIMENSION TECHNIQUE dans la totalité architecturale et de classer les principes essentiels de cette dimension. Car le problème est de savoir dans la conception, l'analyse et l'évaluation des objets, quel système technique correspondra le mieux pour une forme donnée, et selon quels critères, ou inversement, étant donné un système technique, quelles formes en découlent et quels caractères ? D'où la nécessité de la connaissance des systèmes techniques et de leurs possibilités formelles.

On pourrait considérer la dimension technique en prenant comme point de départ les matériaux ; par exemple, les constructions en bois, en acier, en béton, en polyester, etc. ; ou bien prendre comme point de départ ce que la construction réalise, par exemple, les fondations, les murs, les planchers, les plafonds, les portes, les fenêtres, etc.

Certains auteurs préfèrent partir de la notion de système technique qui englobe ces deux classifications fragmentaires et qui de plus aborde le problème d'un point de vue « structural », ce qui est beaucoup plus qu'une simple classification (SCHULZ, (), p 258).

La notion de système constructif sera utilisée ici dans l'idée de répétition ordonnée d'un nombre limité d'éléments techniques, par exemple la maçonnerie de briques qui est la plus simple méthode répondant à ce critère.

La répétition ordonnée d'éléments définis, entraînant un certain ordre technique, est inévitable et inhérente à des systèmes atteignant une certaine taille ; en outre, la stabilité implique une certaine REGULARITE à la fois pour obtenir des conditions statiques plus favorables et aussi parce que le calcul d'un système irrégulier est plus long et plus difficile.

Pour toutes ces raisons, un système constructif aura toujours un certain DEGRE D'ORDRE, élevé ou non, selon que les éléments seront répétés de façon régulière ou irrégulière.

2. Formes structurales

La « *forme structurale* » dont parle K. SIEGEL () est la forme qui découle de la transmission des efforts dans le matériau, celle pour laquelle il n'y a ni trop ni trop peu de matière pour les buts qui lui sont assignés et qui reporte jusqu'au sol les forces en action, suivant des constituants physiques et matériels aussi proches que possible des flux de force.

Par exemple, au niveau d'une ossature on sait que les nervures dans les plus hautes cathédrales gothiques ne sont pas des accessoires formels (fig.) alors que les nervures décoratives du style flamboyant dans le gothique tardif ne suivent pas les lignes de force (fig.). Dans le second cas, les formes deviennent non constructives et relèvent plutôt d'une performance esthétique.

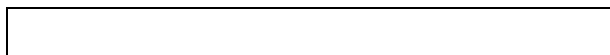


Figure 2.1 : gothique 1^{ère} période

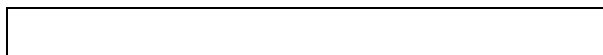


Figure 2.2 : gothique flamboyant

Le même raisonnement peut s'appliquer au niveau du détail comme la colonne verticale, symbole du support par excellence.



Figure 2.3 : Types de colonnes « structurales », d'après SIEGEL, p. 9

Exemple : Les chapiteaux et les bases réalisent la transition des forces avec les parties de la construction qui se trouvent au-dessus et en-dessous, selon de multiples variantes (fig.) : depuis Angkor au Cambodge (a), aux Indes (b), sous la forme ionique (c), la forme romane (d) et la forme gothique (e). La forme du fût, lu plus souvent cylindrique ou conique, résulte de la transmission logique des charges à reporter. Les colonnes de ce type possèdent une forme structurale (ou constructive) au sens où la correspondance entre la forme et les principes de redistribution des efforts est entière et sans détours. Le fatras de colonnes (f) constitue une forme « décadente » d'un fût de colonne portante tout comme le pilier à vis (g). Le contenu constructif et la signification technique font place à un effet théâtral. La correspondance devient culturelle et stylistique (baroque) (SIEGEL, p. 9).

Cet exemple est important car il montre que, dans l'histoire de l'architecture, toutes les formes architecturales n'ont pas une correspondance constructive. Chaque époque a ses priorités et dans certains cas, le sémantique l'emporte.

Vérité ou mensonge ?

Résumé d'un extrait de l'ouvrage de VON MEISS « De la forme au lieu » p. 180 et sq.

« Croire qu'on peut atteindre à la beauté par le mensonge est une hérésie en fait d'art... » disait VIOLLET-LE-DUC ! on vient de voir que cette théorie est mise en doute par le fait que l'art se sert souvent avec succès de l'illusion, comme dans l'architecture baroque, par exemple.

En architecture, la question de la vérité et du mensonge se réfère au rapport entre forme et construction ou entre forme et contenu. Ce chapitre traite du premier couple : comment la forme parle-t-elle de la technique ou comment la technique inspire-t-elle la forme ?

L'Architecture est un art du compromis : elle peut être mensonge pour les uns là où d'autres y voient habileté et élégance d'une solution à un problème. Les débats sur « l'honnêteté » ont toujours joué un grand rôle dans les théories. Ils s'articulent autour de trois termes : forme, expression et construction.

Auguste PERRET qui se situe à la transition entre la raison académique perpétuelle jusqu'à Julien GUADET et le « combat » pour une rationalité d'ingénieurs, soutenue jusqu'aujourd'hui sous des formes diverses, dit ceci : « *c'est par la splendeur du vrai que l'édifice atteint à la beauté* ». Et, par le « vrai » il entendait bien un fondement de la forme sous les matériaux et leur mise en œuvre.

Ce n'est qu'une des tendances parmi celles qui ont cours aujourd'hui. Aucune époque antérieure n'a connu à ce sujet un tel pluralisme, bien que le dilemme soit aussi ancien que l'architecture. Aujourd'hui toutes les attitudes sont pratiquées simultanément, à croire que ce n'est qu'une question de goût du concepteur. La technique est parfois :

- 1) Exaltée devenant la source exclusive de la forme,
- 2) Imagée comme au Centre POMPIDOU,
- 3) Falsifiée en donnant l'illusion d'une technique autre que celle réellement employée,
- 4) Soumise à des buts formels, inspirés de l'art de la peinture et de la sculpture abstraites,
- 5) Domestiquée en exploitant la logique constructive, sans lui accorder un statu privilégié et autonome.

Ce qui est troublant, c'est que celui qui adhère à l'une de ces approches doit tout de même reconnaître que chacune des autres produit également des réalisations qui forcent l'admiration. C'est donc que nous sommes devenus :

⇒ au mieux, plus sceptiques à l'égard des dogmes

⇒ au pire nous sommes dans un embarras éthique qui nous prive des critères de jugement.

L'architecte est confronté à des choix contradictoires entre le « juste » et le « faux » ou le bon et le mauvais chemin à poursuivre. La carence de certitude est une des facettes de « la crise » de la théorie architecturale. L'étudiant contemporain est intellectuellement plus sollicité, non seulement parce qu'il y a eu un accroissement du savoir, mais surtout parce que, en l'absence d'une doctrine prédominante, il doit faire lui-même des choix idéologiques. Bien sûr, un enseignant ne s'inscrira pas dans l'ensemble des options mentionnées plus haut ; il aura une attitude critique et ses propres préférences raisonnées. Mais dans le jardin voisin on cultive d'autres philosophies et elles sont exposées au grand jour par nos moyens de communication accélérés : la revue, le livre et le voyage.

Il y a quand même deux principes fondamentaux qui réunissent les cinq approches et qui les distinguent de la peinture, de la sculpture et dans une certaine mesure de l'artisanat :

- 1) l'architecture est toujours aux prises avec la gravité ; ses formes en parleront nécessairement . « La gravité et la rigidité font la matière esthétique de la belle architecture ».
- 2) l'architecture a toujours un intérieur à aménager qui est sa raison d'être.

Ces permanences ne déterminent pas pour autant une démarche. On a vu¹ que les impulsions de la forme architecturale sont multiples et complexes : l'architecture couvre un territoire allant des lois de la vision à des considérations socio-psychologiques et culturelles ; des principes géométriques et dimensionnels propres aux objets et espaces à bâtir, au projet de lumière et de vue, et au projet du lieu et du parcours, etc. Voilà un dilemme de plus : celui de la raison constructive.

L'œuvre architecturale atteint sa vraie grandeur grâce à la synthèse de ces constituants multiples en un seul projet final. L'importance relative de chacun de ces paramètres ne peut pas être soumise à une règle de validité générale. Elle doit trouver sa juste mesure en fonction du programme (usine ou habitation) et du site

¹ Voir Théorie, livre 1a.

(campagne ou ville). Le degré auquel on accordera un rôle expressif à la construction dépendra encore du programme et du site bien plus que des exigences de la statique et de la résistance des matériaux.

La construction (notamment la structure porteuse dans son interaction avec l'espace, l'enveloppe spatiale, les ouvertures et la lumière) est le premier moyen pour la concrétisation d'une idée qui, elle, appartient au domaine de l'art. Les oeuvres les plus mûres et les plus riches de l'architecture ont toujours subordonné, sans trahir, la raison constructive à celle d'une idée architecturale plus globale :

- 1) le projet de structure,
- 2) le projet de l'espace mis en mesure et ordonné par la forme et la texture des matériaux,
- 3) le projet de lumière,
- 4) le projet de lieu,
- 5) le projet de parcours.

C'est ainsi que sont bâtis les meilleurs temples, cathédrales et palais comme les habitations et tissus urbains les plus modestes, lorsqu'ils ressortent du lot du commercial ou de l'insignifiant.

Une classification des attitudes vis à vis du rapport forme/technique, est une simplification utile. Elle ne couvre pas toute la réalité qui est assurément plus nuancée, mais elle fournit les éléments pour une meilleure compréhension de ce choix fondamental dans le processus architectural (*inspiré de VON MEISS « De la forme au lieu » p. 180 et sq.*)

1. Technique exaltée ou les « formes structurales »

Qui n'est pas émerveillé par une belle charpente en bois, par la structure métallique des abattoirs de Tony GARNIER à Lyon ou par l'effet décoratif des rivets de la Tour Eiffel, les attaches d'un câble de pont suspendu, les fils laminés soigneusement assemblés d'un bâtiment de Mies VAN DER ROHE ? A l'image séculaire de la beauté plastique, la Tour EIFFEL opposait à l'époque une nouvelle valeur : celle de la beauté fonctionnelle et technique, qui a conquis le monde depuis. La nudité d'une construction logique est ici la condition d'une esthétique ; elle reflète les mesures économiques prises en fonction des lois de la nature : la gravité et la résistance des matériaux ou comme dit Konrad WACHSMANN, « *bâtir, c'est, en dernier lieu une lutte matérielle contre les forces destructrices de la nature. Cela oblige à tirer les conséquences des progrès de la science et des découvertes et inventions techniques* ».

L'émotion poétique, qu'évoquent un pont de Robert MAILLART, une halle de Pier Luigi NERVI, un marché couvert d'Eduardo TORROJA, une structure tridimensionnelle de Konrad WACHSMANN ou cette marquise de Santiago CALATRAVA (fig.), naît d'une utilisation expressive et élégante d'une technique où le jeu des forces statiques et le mode d'assemblage donnent une certaine évidence à l'ouvrage. L'approche de ces pionniers est expérimentale ; l'intuition et la sensibilité artistique en sont le moteur. Ils ne se contentent pas de la forme purement technique qui croit trop au savoir et trop peu à l'émotion.

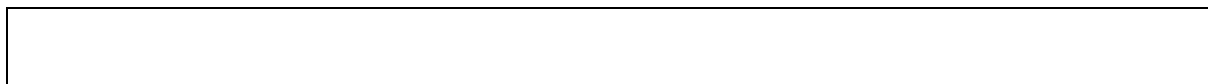


Figure 2.4 : La technicité est établie ici comme un principe de l'art ; Joseph Paxton, Crystal Palace, exposition universelle de Londres, 1850.

Au vingtième siècle la technicité accède au rang de principe générateur de l'art. L'esthétique techniciste donne l'impression d'une logique mathématique de la construction, mais cela reste équivoque ; les possibilités sont multiples. Le calcul n'est qu'un moyen de contrôle après l'intuition et l'invention d'un système constructif. « La forme obéit aux exigences expressives, pas au calcul. On ne peut pas séparer la structure de la réalité spatiale ».

La technique exaltée présuppose une tâche de construction dominée par les questions de statique ou par les équipements techniques. Elle réussit pour le mieux, lorsqu'il y a un programme univoque comme en génie civil ; un pont ou une grande halle à couvrir. Dans ces programmes le problème fondamental et celui de la stabilité et de l'assemblage, de la fixation et des joints entre éléments sans interférences d'exigences multiples et contradictoires. Dans le cas d'une habitation, l'expression de la technique prise comme fin esthétique ne suit pas facilement les nuances spatiales et culturelles exigées par cette utilisation.

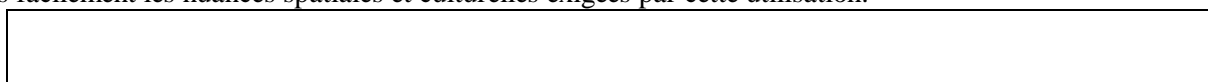


Figure 2.5 : « Les révolutions des méthodes de construction ont provoqué des stimulations auxquelles l'esprit sensible et réellement créatif se devait de réagir » (K. Wachsmann). Pier Luigi Nervi, palais des expositions, Turin. 1947/1949.

La technique sublimée est aidée par un programme univoque tel que cette passerelle pour piétons ; projet d'étudiant, EPFL, 1984.

Ces ouvrages où la technique est le fondement même de l'expression architecturale présentent une autre caractéristique digne d'attention et susceptible d'éveiller notre sens critique : ils ont de la peine à quitter leur statut d'objet pour devenir maille d'un tissu urbain. C'est précisément là que se situe leur limite : ce type ne peut pas être généralisé. Lorsque, en revanche, leur statut d'objet est justifié par la situation et la destination de l'édifice, l'architecture de la ville s'en trouve enrichie.

Une autre limite à cette approche est posée par le risque du « styling ». Nous entendons par là l'abandon partiel de la véracité structurelle au nom d'une volonté parfois trop esthétisante. Il est délicat de préciser cette limite, car même les oeuvres dont nous parlions plus haut ne sont évidemment pas l'expression des seules nécessités matérielles. Considérée sous l'angle restreint de la résistance des matériaux, l'articulation entre les deux segments de la marquise de Calatrava aurait pu être réduite. C'est la nécessité de la compréhension d'un

phénomène structurel par l'œil, qui demandait cette accentuation. Dans ce cas, le choix est parfaitement justifié.

Certaines oeuvres tardives de Nervi et certains ouvrages de génie civil et « design industriel » entrepris avec trop de prétention esthétisante dépassent ces limites. Nous frolos déjà l'approche de la technique imagée.

2. Technique imagée

Ce principe est sans doute illustré de la meilleure manière par les projets utopiques du groupe britannique Archigram (année 1960-1970) et par sa plus grande réalisation, par architectes interposés, le Centre Pompidou de Piano et Rogers à Paris.

Contrairement à la « technique exaltée » où la forme est guidée par l'articulation expressive du potentiel inhérent à une technologie, il s'agit ici d'un procédé inverse : on dessine l'image technique et on cherche ensuite une technologie qui permette de la réaliser, à la rigueur même artisanalement. Frampton observe à juste titre que « Archigram était plus intéressé par l'attrait séduisant de l'imagerie de l'âge spatial et, après Fuller par les sous-entendus d'une technologie de survie, que par la production ou l'adéquation d'une technologie tellement sophistiquée aux tâches du moment ».

Spoutnik et Apollo ont brisé les limites imaginables de la technologie. Il n'y avait plus besoin d'être Jules Verne ou d'être à la traîne des ingénieurs. Tout devenait possible à condition de l'avoir imaginé : naissent alors « Plug-in city », « Space Capsule », « Instant city », illustrations de la technique au service du plaisir.

L'imagerie techniciste a joué un rôle de provocation dans le débat sur l'inertie des formes conventionnelles. Elle trouve un terrain expérimental et une tribune dans les champs de foire, les expositions nationales et universelles, les décors de manifestations diverses, les bâtiments provisoires, etc., mais elle n'a guère sa place dans l'architecture de la ville et dans ce qui est appelé à transcender les générations.



Figure 2.6 : Si le 19^e siècle introduit la technique comme message artistique, c'est le 20^e s. qui s'arroge le droit de substituer l'image technique à la réalisation technique. « Archigram était plus intéressé par l'attrait séduisant de l'imagerie de l'âge spatial... que par la production et l'adéquation d'une technique sophistiquée aux tâches du moment » (K. Frampton). Archigram, Peter Cook et David Grez Nottingham Shopping viaduct, 1962, Peter Cook, Plug-in City 1962/1964.

3. Falsification

Lorsque l'apparence d'une technique « dérange », on tend à la faire disparaître derrière un décor qui exprime ce qu'on aurait souhaité voir. Dans les dernières années d'Archigram (et des Beatles) se produit une mutation significative. Ils se voient précurseurs d'un mouvement populaire. Mais qui veut vivre dans la « capsule » ? Archigram, faisant machine arrière, produit ses derniers projets dont « Hedgerow City » et « Crater City ». Toute la technologie sophistiquée y est enfouie, camouflée derrière une apparente nature ; peut-être, comme aujourd'hui certains la cachent derrière un décor de scène néo-néoclassique ou pseudo vernaculaire.

D'autres architectes utilisent des techniques économiques qu'ils transforment et revêtent de manière à simuler une autre technique, antérieure à la plus « prestigieuse ». Pour Andrea Palladio les colonnes en briques, l'architrave en bois recouverte de stuc et de fausses pierres en stuc, étaient monnaie courante.

Il y a lieu de faire la distinction entre l'architecture de l'Antiquité grecque et celle de la Renaissance. Il est vrai que le temple grec en marbre n'aurait pas ses mutules ou ses modillons, si sa forme n'était pas dérivée d'une construction en bois, tandis que Palladio mélange la base en pierre, la colonne en briques, etc., le tout recouvert d'un stuc qui imite franchement la pierre pour créer une illusion (fig.281)



Figure 2.7 :

A l'autre extrême Viollet-le-Duc affirme « ...que revêtir des colonnes de fonte de cylindres de brique, ou d'enduits de stucs, ou englober des supports en fer dans la maçonnerie, par exemple, ce n'est pas là le résultat d'un effort de calcul, ni d'imagination... ». Ainsi vers la fin du 19^e s. Viollet-le-Duc reconnaît dans la falsification constructive une résistance à l'innovation. Les formes issues des nouveaux moyens de construction n'ont pas encore acquis le statut de valeur esthétique ; on les habille afin de satisfaire aux goûts

du passé. Le manque de familiarité constitue toujours un frein à la diffusion d'une invention. Viollet-le-Duc s'engage dans un combat du renouveau qui portera ses fruits au 20^e s.

A la fin du 20^e s. ce phénomène de substitution n'a pas la même signification. Il ne s'agit plus d'une résistance à l'innovation chez les frères Krier au cours des années 1970 et 1980. Ils ne refusent pas l'invention pour autant qu'elle serve une image qui « repétrifie » la ville en rappelant les principes de la construction en pierre et en brique. Leurs propositions sont une critique de l'hétérogénéité matérielle de la ville moderne. Leur force réside pourtant davantage dans la proposition d'un ordre spatial pour la ville en redonnant à l'espace public une forme claire et reconnaissable que dans la promotion de moyens matériels désuets. La substitution d'une réalité économique et constructive par le recours à l'imagerie de techniques anciennes ne peut pas être le fondement d'une esthétique contemporaine. Le cri d'alarme des adeptes d'une ville pétrifiée à l'image du passé n'aura jamais la force vive du combat de ceux qui maîtrisent avec espoir les moyens modernes.



Figure 2.8 : « Les romains, gens sensés, pourvus de nos grandes pièces de fer, auraient laissé de côté les formes empruntées aux Grecs pour en adopter de nouvelles » (Viollet-le-Duc) R.Bofill, édicule à St-Quentin-en-Yvelines, 1982.

4. Technique soumise

Avec les moyens techniques du XX^e siècle l'architecture a pu s'arroger les grandes libertés plastiques que nous connaissons. A partir des années 1920, l'architecture moderne cherche son renouvellement dans un rapprochement avec le monde conceptuel de la peinture et de la sculpture abstraites, notamment cubiste et puriste. Ainsi, contrairement à une opinion largement répandue aujourd'hui, elle ne prend pas sa source uniquement dans l'expression de la fonction ou de la technique. Cette dernière fut souvent la servante d'une expression artistique pour la grande majorité des architectes d'avant-garde. L'architecture est devenue elle-même sculpture moderne comme le montrent des exemples tels que la maison Schroeder de Rietveld, les projets constructivistes de Lissitzky, la maison Frigério de Terragni, l'église de Ronchamp de Le Corbusier et tant d'autres oeuvres marquantes.

Peter Collins, critique et historien de l'architecture moderne, a admirablement saisi ces phénomènes contemporains dans son ouvrage « Changing Ideals In Modern Architecture ». Citons-en un message clé : « La nouvelle théorie de l'art abstrait a non seulement conduit à une totale interchangeabilité des disciplines artistiques, mais elle suggère inévitablement que les principes vitruviens de l'utilité et de la solidité sont, au point de vue artistique, peu importants comparés à la valeur abstraite esthétique que chaque bâtiment possède potentiellement (...). L'idéal de fusion complète de la sculpture abstraite avec la peinture abstraite et la technologie de la construction a été exprimé par J.J.P.Oud dans son manifeste sur l'architecture du futur publié en 1921, lorsqu'il déclarait qu'une architecture autonome était enfin possible, à laquelle les autres arts ne seraient plus subordonnés mais avec laquelle ils collaboraient de façon organique (...). Les étudiants du Bauhaus furent initiés à l'architecture en manipulant des formes abstraites, sans références aux fonctions du bâtiment ou à la résistance des matériaux, mais uniquement en vue de parvenir à un attrait plastique en termes de formes significatives ».

Cette approche relativement dématérialisée du projet, de la critique et de l'enseignement a ouvert des voies insoupçonnées à l'épanouissement en tant qu'art authentique du 20^e s. Aujourd'hui ce sont des architectes comme Richard Meier et James Stirling, des critiques comme Colin Rowe et Robert Slutzky et des enseignants comme John Hejduk et Daniel Libeskind, qui ont le mieux su saisir, manipuler et développer ces libertés constructives nouvellement acquises dans un but d'expression plastique contemporaine.

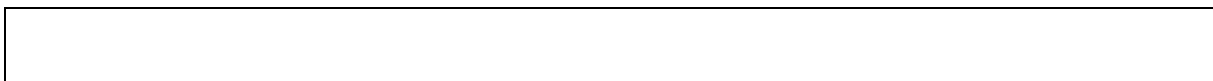


Figure 2.9 : Entre charpente et voûte : comme pour le baroque, la volonté plastique et spatiale de Jørn Utzon prime sur la réalité constructive. Eglise de Bagsvaerd, Copenhague, 1973-1976.

Ils exploitent les possibilités techniques en les subordonnant à un but formel. Une colonne représente une ligne verticale, une allège devient une bande, parois et planchers sont des plans attitrés le tout pouvant être recouvert d'un enduit blanc ou coloré pour parachever la dématérialisation.

Dans la pratique, cette démarche mène parfois sur des chemins périlleux car, en déjouant les contraintes constructives, elle peut entraîner des faiblesses de résistance aux intempéries ou un vieillissement prématuré de certaines matières. Elle prive aussi le bâtiment d'un certain bon sens qui naît des traces logiques de sa construction. Soulignons, en revanche, les énormes avantages didactiques lorsqu'une telle approche est considérée comme un des pas dans la formation de l'architecte. Privé d'alibis fonctionnels ou constructifs, l'étudiant doit temporairement porter son attention sur le potentiel inhérent aux moyens de la géométrie et de la forme.

La forme architecturale est certes liée à l'utilisation et à la technique, mais elle jouit tout à la fois d'une certaine autonomie. D'une part, les mêmes techniques et le même contenu ne déterminent nullement une forme précise. D'autre part, la forme bâtie s'avère être une réalité moins éphémère que l'utilisation. Rares sont en effet les exemples de bâtiments dont la durée de vie ne dépasse pas celle de leur utilisation et de leur signification initiales.

5. Technique domestiquée

La technicité est entrée dans l'ordre du quotidien. Elle nous préserve de la famine, elle nous offre le confort et la santé, une extraordinaire liberté de mouvement et nous accorde aussi le luxe d'un temps pour la pensée, les études ou le jeu. Sa défaillance provoque des perturbations à la mesure de notre dépendance. La technicité se fait faire également menaçante par des nuisances et des déchets. Déjà la terre montre les blessures de son exploitation inconsidérée par le site effréné de la production et de la consommation.

Le dernier quart du XX^e siècle cherche donc plutôt à dissimuler la technique sans pour autant y renoncer : il refuse simplement de l'ériger en monument. Il ne suffit évidemment pas de la cacher ; il faut la réinventer et mesurer son emprise sur la terre que nous habitons. Dans cette phase intermédiaire que nous vivons la technique continuera à nourrir la forme et le décor mais elle ne parlera plus si bruyamment d'elle-même. C'est ce qui donne aux oeuvres de Khan, Scarpa, Botta et d'autres une actualité particulière

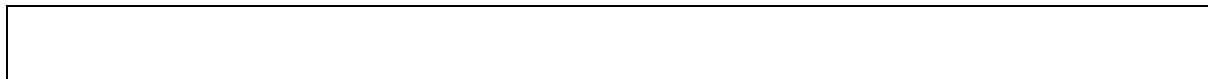


Figure 2.10 : « c'est à se demander si l'architecture gothique est de pierre ou si elle est ce qu'elle est malgré la pierre ». (F.L. Wright). cathédrale de Rouen.

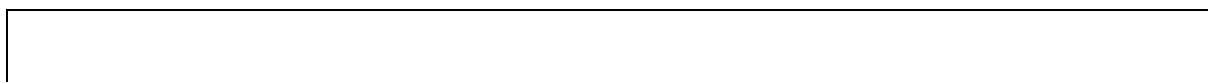


Figure 2.11 : « L'ornement ne signifie pas seulement une surface qualifiée par l'imagination de l'homme mais l'imagination donnant un dessin à la structure..., articuler et rendre visible la structure matérielle de l'édifice comme sont articulées la structure des arbres ou celle du lys des champs ..., ce sont ces qualités qui distinguent l'architecture essentielle du simple acte de construction ». (F.L. Wright). Perret, Notre Dame du Raincy, 1923.

La technique est domestiquée lorsqu'elle s'occupe de l'habileté et du plaisir, sans orgueil ni honte de sa propre raison et de ses lois.

Ne pas en avoir honte ne signifie pas mettre en valeur toutes les traces de la fabrication. Que l'anecdote contée par Tessenow nous mette en garde contre les excès :

« Un vieil artisan chevronné dont l'influence était considérable, aurait dit : si, par exemple, on cloue deux planches pour la construction d'une porte, il faut montrer avec franchise cette fabrication et on devrait si possible indiquer où les clous ont traversés la planche pour réapparaître sur l'arrière, etc., si dans cette opération il y a une écharde de bois qui s'est soulevée, il faut simplement l'arracher et en rester là.

On peut supposer que cette histoire n'est qu'une image, mais elle montre bien où peut mener l'honnêteté. Il existe une sorte de « Boum-boum honnêteté ». Ce sont les exagérations que nous craignons... Nous exigeons que le côté artisanal soit vrai en ligne générale et sur le fond, mais nous ne voulons pas, sans discernement, voir chaque clou et chaque joint collé ».

Domestiquée, la technique rendue apparente est admise et même sollicitée, mais l'objectif doit rester global. Trace élégante de la fabrication elle devient ornement intégré comme dirait F.L. Wright, mais cet ornement doit avoir un sens dans le concept architectural et artistique de l'édifice. Il ne peut pas être le simple résultat d'un processus constructif. Le projet exploite la technique en tant que ressource de motifs pour structurer la forme sans pour autant se laisser dominer : « la beauté est l'expression vraie et choisie en raison de l'élément matériel dont on dispose, du besoin physique ou moral auquel il faut satisfaire... ».

Dans le meilleur des cas, forme et techniques entretiennent un rapport équilibré, faisant chacune valoir ses capacités et revendications. C'est lorsque ni la technique, ni la forme ne tente d'éblouir pour elle-même que nous approchons l'architecture. « L'honnêteté technique » ne doit pas primer sur l'honnêteté globale.

Les cathédrales gothiques restent peut-être l'exemple le plus sublime d'une technique domestiquée. F.L. Wright suggère que ce n'est pas la pierre qui a inspiré les cathédrales. Elle est limitative ; c'est à se demander si l'architecture gothique est de pierre ou si elle est ce qu'elle est malgré la pierre. La pierre y est utilisée sans doute avec une plus profonde connaissance de sa nature que ce ne fut le cas dans l'Antiquité grecque. Le matériau est toute fois portée à des performances extrêmes grâce à une structure dont la logique n'est pas intrinsèque, mais issue d'une alliance entre le savoir-faire et l'objectif de glorification religieuse de l'époque.

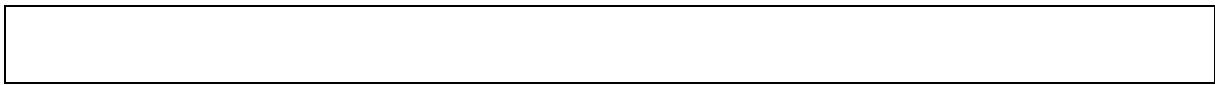


Figure 2.12 : Une symbiose qui cherche la perfection dans l'équilibre entre le désir plastique de l'homme et « le désir » physique propre aux matériaux. Mario Botta, maison à Ligornetto 1978.

Comment choisir ?

L'exposé critique de ces cinq attitudes envers les matériaux et leur mise en œuvre pourrait nous amener à épouser ou combattre l'une plutôt que l'autre au gré de nos goûts. Il ne serait pourtant pas trop difficile pour la plupart d'entre nous de donner raison à Viollet-le-Duc lorsqu'il disait : « Les Romains, gens sensés, pourvu de nos grandes pièces de fer auraient laissé de côté les formes empruntées aux Grecs pour en adapter de nouvelles ». F.L.Wright et bien d'autres modernes auraient tout aussi bien pu le dire. La vérité résiderait dans la nature même des matériaux. En adoptant cette position, nous aurions au moins des directives rassurantes pour atteindre « une architecture du vrai ».

Ce n'est plus forcément le reflet adéquat de notre culture, en cette fin du 20^e s., car notre technologie sophistiquée permet, d'une part, l'imitation « parfaite » et à bon marché d'une technique en lui substituant une autre et ouvre, d'autre part, plus que jamais la voie au revêtement en raison des exigences d'isolation thermique.

F.L.Wright rejette ces réalités en disant que l'imitation est la tendance naturelle de l'homme (pas de l'Homme). Peut-être faut-il faire une distinction plus claire entre imitation (ou substitution) et dématérialisation apparente. Cette dernière n'est plus aujourd'hui « un péché ». Nous avons vu que, par dématérialisation, on entend un processus de projet où le jeu plastique de la géométrie des espaces, des formes et des surfaces prime à tel point que les différentes matières avec lesquelles ils sont réalisés doivent être homogénéisées sous une couche unifiante de revêtement (Gerritt Rietveld, Theo Van Doesburg, J.J.P. Oud, Jörn Utzon, Peter Eisenmann, Richard Meier, John Heijduk, etc.). Avec une architecture du revêtement à laquelle conduisent nos exigences thermiques, une telle tendance acquiert son autorité. Certain édifice gagnerai d'ailleurs à être recouverts d'une couche unifiante plutôt que d'afficher avec « honnêteté » leur échantillonnage de matériaux. La dématérialisation est donc devenue aujourd'hui une des voies légitime, source d'une poétique contemporaine.

Peu utilisée condamnée par la majorité des grands architectes contemporains, cette s'oppose à une autre qui refuse de priver l'architecture du langage des matériaux et de leur mise en œuvre. Sans aller jusqu'aux clous qui traverse les planches assemblées de la porte, la matière en tant que surface et texture ainsi que les éléments dont les joints sont la trace ornementale resteront toujours un ingrédient précieux que l'architecture comme le σ Les voies de la technique imagée et de la technique de substitution sont sans doute les plus discutées et les plus discutables. L'architecture ne peut jamais n'être qu'une image. Elle serait privée de son fondement, de son rôle d'organiser l'espace du territoire en lieu intime pour accueillir la vie des hommes. On ne peut donc gère imposer les mêmes critères de vérité et de mensonge à l'architecture qu'à l'art en général. Si l'illusion est le moyen de la poétique picturale, elle ne peut pas être le fondement de l'architecture dont le rôle reste plus concret et thématique. La scénographie est une architecture, mais l'architecture n'est pas scénographie.

Remarque sur les formes issues directement de la technique

Les édifices à trame orthogonale, régulière ou non, sont aussi, bien entendu, fortement déterminés par la technique de la modulation (non classique mais procédant de la fabrication industrielle et du plan libre).

Mais nous rencontrons à présent de nombreuses formes nouvelles que la technique a rendues possibles et qu'elle a même fait naître (c'est un phénomène comparable à celui des grandes cathédrales ogivales puis des grandes constructions métalliques du XIX^e siècle). Il suffit d'évoquer ici les coques de toutes formes, les voiles plissés ou ondulés, les structures suspendues etc. Il est intéressant de constater que l'emploi inconsidéré de telles formes (pourtant essentiellement fonctionnelles du point de vue économie de structure, construction, possibilités spatiales, etc.) peut conduire à un nouveau « formalisme » artificiel dans l'architecture.

Ci-dessous, quelques réflexions pertinentes de Jürgen JOEDICKE (dans « *les structures en voile et coques* » Vincent FREAL et Cie, Paris, 1962) :

« De nombreuses constructions en coque de notre époque montrent combien il est nécessaire d'insister sur la primauté du volume. Il s'agit de monuments qui ont négligé leur rôle : être un moyen au service d'une idée plastique. D'innombrables églises présentent des formes constructives extraordinairement habiles, remarquables en tant que réalisations des ingénieurs, mais il n'y a aucune congruence entre le problème posé et la forme constructive. La construction devient une fin en soi ; le volume et le programme deviennent accessoires. Notre époque est désarmée face au problème de la teneur symbolique de la forme. »

L'emploi marqué de formes constructives intéressantes, concaves et convexes, n'est souvent rien d'autre qu'une tentative inconsciente pour masquer l'absence de contenu par des formes constructives impressionnantes. C'est aujourd'hui un phénomène général de rendre une forme (sans signification) intéressante par une plastique maniérée, des bizarreries et des courbures esthétiques. Par suite de ces évolutions sans issues, il faut à nouveau rappeler que toute forme fait partie d'un ensemble, elle ne doit pas seulement remplir une fonction ou être correctement construite, elle doit en outre exprimer l'idée à laquelle répond l'œuvre ».

On voit donc que la virtuosité constructive et la virtuosité ornementale de naguère peuvent produire des résultats analogues : les formalismes vidés de tout contenu. Par contre, quand ces formes nouvelles (dont la mise au point, il faut bien le dire, est avant tout l'œuvre de l'ingénieur) s'accordent au programme et à l'expression nécessaire de ce dernier, on obtient des oeuvres du plus haut intérêt tant sensible qu'intellectuel (*J. FRANCOIS*).

Rappel de principes élémentaires

1. Forces extérieures : charge due au poids propre (poids de la construction)

Figure 2.13 : charges dues aux efforts externes : surcharges des équipements, des gens, etc., efforts du vent, la neige, statique ou dynamique :

Figure 2.14 :

2. Efforts internes :

Figure 2.15 : (tensions) engendrés dans le matériau par les forces extérieures : $\sigma = F/S$ (Force / Section)

Figure 2.16 :

Pour la connaissance intuitive des systèmes constructifs, il faut en outre rappeler les trois conditions essentielles auxquelles les systèmes techniques doivent répondre :

l'équilibre
la stabilité
la résistance

Figure 2.17 : : Un système doit être en équilibre

Figure 2.18 : rotule d'un pont

1° **Equilibre** (interne des forces passives et actives)

Un système doit être en équilibre c'est-à-dire assurer l'immobilité relative de chacun de ses éléments et de l'ensemble.

En fait : exemple de déplacement :

rotule d'un pont
Dilatation d'un rail
tassement différentiel
flèche d'une poutre

Le tout est que les différences de longueur ne perturbent pas l'usage normal et n'entraîne pas de dommages (infiltrations) d'où : joints de dilatation, de retrait, etc.

2° **Stabilité** : c'est-à-dire vérifier en toutes circonstances les conditions d'équilibre.

Figure 2.19 : : Le système est dit « stable » si une force x peut être appliquée en tout point .

Figure 2.20 :

3° **Résistance** : le matériau doit résister aux tensions internes dues à l'application des charges et des surcharges. Certains résistent mieux aux tensions de compression variables selon le sens des efforts perpendiculaires ou parallèles aux fibres.

Exemples : la pierre : bon à la compression (200 à 500 kg/cm²)
l'acier : bon à la traction (1400 à 2800 kg/cm²)

PREMIERE PARTIE :

Première classification des Systèmes constructifs

Les systèmes constructifs peuvent être divisés en trois grandes catégories :

Les SYSTEMES MASSIFS, dans lesquels les éléments limitent et supportent,

Les SYSTEMES A OSSATURE, dans lesquels les éléments séparateurs sont distincts des éléments porteurs,

Les SYSTEMES MIXTES, qui forment une construction massive à certains égards et qui possèdent certaines propriétés des systèmes à ossature.

Figure 2.21 : Schéma de système massif

Figure 2.22 : Schéma de système à ossature :

Section 1 : Les systèmes massifs

Définitions

Un système massif consiste en éléments qui, simultanément, limitent et supportent. Les éléments de FERMETURE et les éléments de COUVERTURE réalisent le même objectif technique. Dans ce système, les efforts sont répartis dans toute la masse. Le cas le plus typique est la coupole, la voûte, où le matériau est soumis à compression. Par exemple, (fig. 6) la méthode de construction des Romains réalisait un système massif total en permettant la couverture de vastes espaces et offrant une certaine liberté pour les formes d'espaces et le placement des ouvertures.

Autres exemples:

Figure 2.23 : Le Panthéon à Rome

Figure 2.24 : constructions purement massives: murs en maçonnerie et dalles

Figure 2.25 : : igloo

Figure 2.26 :

Les éléments de fermeture correspondant à des masses plus ou moins isotropes sont soit construits par addition d'éléments secondaires: en briques (fig. 8) ou en pierre (fig. 9)

Figure 2.27 : : Les éléments de fermeture correspondant à des masses plus ou moins isotropes sont soit construits par addition d'éléments secondaires: en briques (fig. 8) ; Ziggourat d'Our (2000 av. JC). D'après Lloyd dans "The art in the ancient Near East"

Figure 2.28 : ou en pierre (fig. 9), « Borie » en pierre, Gordes, Vaucluse, France

Figure 2.29 : : soit coulés en masse monolithique plus ou moins homogène (fig. 10) Case obus, Cameroun

Figure 2.30 :

Figure 2.31 :

Figure 2.32 : .

Caractères engendrés par les systèmes massifs

Les éléments techniques de dimension plus ou moins égale engendrent un aspect approximativement équivalent sous les différents points de vue.

Le caractère apparent est "sculptural" () car la taille et la position des ouvertures assez restreintes, en tout cas par rapport au système à ossature, confèrent un caractère de figure pour laquelle la masse neutre sert de fond. Ainsi, dans la chapelle de Ronchamp de Le CORBUSIER (fig.11), les perforations relativement accidentelles donnent à la masse un caractère de figure d'apparence " sculpturale ".

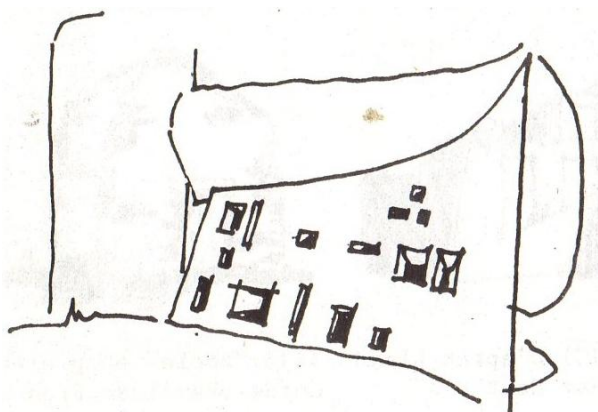


Figure 2.33 : chapelle de Ronchamp (arch. Le Corbusier)

Figure 2.34 : par rapport au système à ossature, les perforations sont " relativement " accidentelles.

La construction massive répond à des rôles architecturaux possédant une structure interne plus simple.

Toute l'histoire de l'architecture montre la lutte contre les limitations des systèmes massifs. Les exigences de la construction demandèrent parfois un système plus performant et, afin de satisfaire cette exigence, la construction massive a souvent été recouverte de membres fictifs destinés à donner l'illusion d'une construction à ossature. Par exemple, les Romains ont enrichi leurs formes architecturales de cette manière et le principe est devenu d'application courante à partir de la Renaissance. La figure 13 montre l'ensemble d'une travée des portiques superposés au théâtre de Marcellus à Rome; la colonne, au lieu d'être placée sous la retombée de l'arcade, se plaque contre le mur et se transforme en pilastre.

fig. 2.35 théâtre de Marcellus d'après GROMORT, (), f. 13

Mais on a réussi, parfois, la libération du système massif. Le meilleur exemple d'une construction ainsi passée au système à ossature, est sans doute l'architecture gothique.

fig. 2.36 nef gothique: impression visuelle du système technique

L'élément principal du système massif est le MUR.

Ce dernier supporte et limite. C'est un élément à surface continue, d'une certaine épaisseur, d'une certaine masse, et capable de résister à la compression simple, il est composé d'éléments qui reportent les efforts par les joints surfaces d'appuis lisses.

Figure 2.37 :

Figure 2.38 :

APPAREIL: disposition des pierres d'un mur ou d'une voûte, l'appareil est " le secret de l'architecture ", aux dires des anciens maîtres

BLOCAGE: appareil de pierres brutes prises dans le mortier.

BOSSAGE: appareil de pierres taillées, dont le parement saillant demeure brut ou est taillé en pointes de diamant, tables, demi-sphères, etc...

CLAVEAU: pierre d'appareil taillée en coin, élément constitutif de l'arc et de la nervure

PAREMENT: apparence extérieure des pierres d'un mur ou revêtement d'un mur de blocage en pierres taillées.

VOUSSOIR: pierre d'appareil taillée en coin ou en croix, élément constitutif des panneaux de la voûte.

Il est autant d'appareils que de styles d'architecture, sinon de civilisations, de pays, tels les appareils en ENCORBELLEMENT des bories, et les appareils paysans d'Auvergne, Bretagne, Bourgogne, Provence, etc.

Figure 2.39 : APPAREIL CYCLOPEEN: composé de mégalithes, des mycéniens, celto-ligures, cas.

Figure 2.40 : APPAREIL ISODOME ou hellénique, à joints vifs, des murs de naos du Parthénon. Opus quadratum, composé de pierres régulières, romain, roman, ... le plus extraordinaire exemple d'appareil classique est peut-être en France celui de la voûte ondulées du vestibule de l'Hôtel de Ville d'Arles.

A cette limite l'art de tracer, de couper et d'assembler les pierres relève d'une science appliquée de la géométrie dans l'espace, la STEREOTOMIE.

Figure 2.41 : Types de joints : plein, creux, en canal, baillant, en onglet, creux chanfreiné.

Figure 2.42 :

Figure 2.43 : Types d'appareillage: - régulier: - éléments identiques

Figure 2.44 :

Figure 2.45 : assises parallèles, joints verticaux se correspondant un tas sur deux. éléments plus ou moins semblables

Figure 2.46 : réglage horizontal mais éléments différents

Donc l'esthétique est fonction de plusieurs paramètres:

- 1) dimension des éléments
- 2) régularité ou non des éléments, des assises
- 3) appareillage (façon de les disposer)
- 4) nature des joints

Figure 2.47 :

Figure 2.48 :

Les appareils " cyclopéen " et " pélagique " (cf. porte des Lionnes à Mycènes) sont constitués de blocs énormes non ou très peu travaillés dont les espaces intercalaires sont remplis avec des blocs plus petits; ils sont posés à sec et c'est leur effet de masse, leur énorme inertie qui assurent la stabilité. Echelle: h = taille de l'homme. Cette maçonnerie a actuellement perdu son intérêt pratique. Mais, du point de vue de l'effet, de l'expression, son enseignement reste valable.

Dans les pays de montagnes, nous la retrouvons, à une échelle plus réduite, mais tout de même avec des unités atteignant et dépassant le mètre, notamment dans des murs de soutènement, des infrastructures d'épaisses constructions. Dans un site rocheux, on voit très bien encore un tel appareil utilisé comme infrastructure d'une construction d'esprit très actuel, que l'on veut " intégrer " en réalisant un " passage " insensible de la nature à l'oeuvre de l'homme: les pierres de base de la construction se prolongent par les blocs erratiques dont le terrain est semé. Une telle maçonnerie est " expressive ", "symbole ", de pesante solidité, d'éternité, d'enracinement.

Figure 2.49 : L'appareil POLYGONAL (" opus incertum " des Romains) dit à présent " mosaïque " était, à l'origine un cyclopéen plus petit. Pour la maçonnerie à sec il est fonctionnel (avec des matériaux de formes " quelconques ") parce que le coincement entre des plans inclinés favorise la stabilité davantage que le rachat des irrégularités d'assises sensiblement horizontales par des éléments de petites dimensions tendant à produire un effet de " bascule " .

Figure 2.50 : Les Grecs l'ont réalisé de maîtrise façon à Delphes (fig. 25) avec des pierres de grande dimension. Mais elles sont partiellement taillées pour réduire l'épaisseur des joints secs.

Cet ajustage et la grandeur absolue de pierres produisent un effet de stabilité extraordinaire.

Mais cet appareil fréquemment employé de nos jours pour la maçonnerie en moellons, produit une impression tout opposée; à cause des dimensions actuelles courantes (petites) qui multiplient les pierres dans une surface donnée de parement, et de l'épaisseur des joints de mortier, c'est un effet " dansant " et non statique que l'on obtient ainsi. Et si les teintes sont variées, cela évoque fâcheusement la charcuterie dite " tête pressée " .

Figure 2.51 : opus incertum grand format

Figure 2.52 : exemple d'appareil irrégulier avec un effet statique

Une maçonnerie actuelle en moellon, " tout venant " pour produire l'effet de calme et de statisme souhaitable, doit accuser une majorité, une " intention " d'assises horizontales. La bonne technique commande d'ailleurs de l'araser périodiquement (par ex.: tous les 0.60m environ). voir ci-après " maçonneries en moellons " .

Appareil " irrégulier " : formes et dimensions variées, placées en lit (généralement) mais sans ordre ni rang d'assise, sauf les arases périodiques (c'est celui que nous venons de d'écrire)

Appareil " réticulé " (voir hist. arch. Rome) : ainsi appelé parce que son apparence en parement est celle d'un filet constitué de pierres démaigries de petites dimensions formant hérisson dans un corps du mur en blocage. Un mur actuel en béton dont le parement serait en moellons ressortirait au même principe sans prendre l'aspect réticulé.

Figure 2.53 : fig. 28: types de bossages. Types de bossages : bossage à chanfrein, bossage en table, bossage fouillé, bossage adouci, bossage à cavet, bossage en boule, bossage rustique, bossage troué, bossage à grand chanfrein, bossage à chanfrein, bossage continu en table, bossage continu adouci, bossage à onglet, bossage en pointe de diamant, bossage à grand chanfrein.

Figure 2.54 :

bossage à chanfrein
bossage rustique
bossage en table
bossages fouillés
bossages adoucis
bossages à cavet
bossage troué
bossage à grand chanfrein
bossage à chanfrein
bossage en boule

bossages continus en table
 bossages continus adoucis
 bossage à anglet
 bossage pointe de diamant

Le mur isolé demeure en équilibre sous l'action de son seul poids propre; il en découle nécessairement une forte épaisseur (5) et le recours à des matériaux de poids spécifique relativement élevé. Dans de nombreuses occasions le mur supporte également des poussées horizontales (terres, voûtes, vent). S'il n'est pas prévu d'élément d'accrochage ou de butée, le risque de le voir se renverser est grand. C'est pourquoi on s'efforce d'abaisser le centre d'application des moments résultant de la poussée et du poids propre en donnant au mur une forme pyramidale. Cette forme fréquente en Egypte (pylônes de temple) est celle qui convient idéalement au mur car:

" la force et les lignes de forces donnent leur empreinte à la construction ". Le vocabulaire permettant de décrire cette qualité est important pour des motifs purement économiques ou esthétiques il est fréquent de voir apparaître des divisions tant horizontales que verticales dans les murs. Ces divisions sont réalisées généralement en matériaux de meilleure qualité et en éléments de relativement grandes dimensions. Les coupures horizontales se situent au niveau du plancher ou de l'allège de la fenêtre

Figure 2.55 :

Figure 2.56 : (fig. 30).

Les combinaisons verticales se retrouvent aux intersections de murs: angles ou refends, sous forme de chaînes. Entre les chaînes le plus souvent en pierre, le mur est constitué d'éléments plus petits et de moindre qualité.

Les chaînes formées d'appareils réglés comportent en principe un nombre impair d'assises afin de pouvoir commencer et se terminer par des assises longues. L'excédent de longueur des éléments longs sur les éléments courts se nomme " harpe ". architecture renaissance et Louis XIII).

Le mur, structure massive, s'accorde assez mal d'un porte-à-faux; c'est-à-dire d'une avancée du nu de la partie supérieure du mur sur celui correspondant de la partie inférieure.

De tels surplombs ont toutefois trouvé des justifications sur plan fonctionnel, esthétique et même sur celui de la stabilité.

" La corniche est le couronnement et l'abri d'un mur " (8).

C'est en tout cas un élément essentiel; la corniche la plus simple est le

" chaperon " constitué d'une assise en matériaux durs (pierre ou métal) et comportant des éléments aussi longs que possible afin de diminuer le nombre de joints. La face supérieure est appelée " glacis "; elle est en pente (évacue l'eau). Le chaperon peut coïncider avec les parements du mur ou présenter une saillie pourvue d'un " lamier ".

Le souci de rejeter l'eau aussi loin que possible du mur a conduit à élargir la saillie qui a pris le nom de corniche. La morphologie de ces corniches est évidemment adaptée aux matériaux utilisés (pierre, bois, métal, matières plastiques).

Figure 2.57 : fig. 30: palais Farnèse à Rome (Guadet " *Éléments et théorie de l'architecture*).

Figure 2.58 :

La conception classique s'efforce d'utiliser les éléments fonctionnels du mur. Le socle, élément de transition entre la fondation et le mur proprement dit, composé d'un petit nombre d'assises en matériau très dur reflète la puissance, la force, la sécurité. Il en est de même du soubassement.

Les points forts de la structure: angle, refend, niveaux des planchers ou des allèges sont marqués par des ouvrages particuliers. Chaînes dans le sens vertical, bandeaux dans le sens horizontal.

La décoration des surfaces planes est essentiellement le résultat de l'emploi de refends et de bossages. Ils jouent tous deux sur le relief. Le refend est le joint creusé après exécution du parement. "il est horizontal ou vertical, mais toujours il doit être l'expression de l'appareil lui-même" (9) (Guadet)

Le bossage au contraire est une saillie sur le parement général du mur.

La conception moderne dans la mesure où elle reste fidèle à la conception du mur massif exploite moins les caractéristiques structurelles, peut-être parce que celles-ci sont trop souvent faussées par le recours au béton armé.

On recourt plutôt aux oppositions de couleur et de matériau, aux traitements spatiaux ou architectoniques; encore que les formes résultant du traitement architectonique des matériaux soient trop souvent gratuites.

Figure 2.59 : Vocabulaire de la façade01 (Crunelle)

Figure 2.60 : Vocabulaire de la façade01 (Crunelle)

Figure 2.61 : Vocabulaire de la façade03 (Crunelle)

Figure 2.62 : Vocabulaire de la façade01 (Crunelle)

LA BAIE

Dans une structure massive, la baie constitue un accident et presque toujours un affaiblissement. Ce n'est pas le cas pour les autres structures fondamentales où le plus souvent elle participe activement à la stabilité de l'ensemble.

Le réseau d'isostatiques d'un mur massif et plein est parfaitement régulier traduisant ainsi la stabilité de l'ensemble et l'égal sollicitation des appuis.

Le percement d'une baie bouleverse la régularité des isostatiques (fig. 31) dans une partie importante du mur (tympan et piédroits). Les résultantes de compression normalement verticales sont déviées. Des perturbations sont dès lors inévitables au travers de la structure encore que la forme, l'importance et le positionnement des baies contribuent notablement à l'importance des phénomènes. Ce fait a été mis en évidence par Torroja (10). Il a également démontré que la perturbation des isostatiques est singulièrement limitée lorsque la baie se comporte non comme " un trou dans un mur " mais comme un élément structuré.

Figure 2.63 : réseau d'isostatiques dans un mur percé d'une baie cintrée.

Figure 2.64 : compression, traction

Il importe de souligner que le banal " trou dans un mur " dissimule sous son aspect familier une réalité complexe faite d'exigences contradictoires: -le passage

-la protection

-le confort psychologique et visuel (ouverture sur l'extérieur)

Les baies ont toujours concourus à la définition du style, mais encore exprime l'organisation fonctionnelle et spatiale de l'édifice.

Liée à la vie qu'elle abrite, la baie devient élément de vie; elle fera

" parler le mur " au-dedans et au-dehors et deviendra témoin d'architecture par ses proportions et les modénatures qu'elle saura exprimer. La composition de la façade résulte pour une bonne part de l'existence et de la nature des baies. (que serait le palais ducal de Venise sans les baies ?).

La part des baies, c'est-à-dire des vides n'a cessé de croître pour devenir parfois plus importante que celle des vides (système à ossature).

Section 2: Les système à ossature

Ces systèmes se définissent par la distinction entre éléments porteurs et éléments de séparation.

Les principes engendrés par ces systèmes sont:

- les ouvertures participent au système au lieu d'être des perforations accidentelles,
- puisque les surfaces délimitantes sont indépendantes des éléments porteurs, la TAILLE et la FORME des espaces peuvent être traitées avec une plus grande liberté.

Des éléments à ossature sont constitués, par exemple, par les fermes, (treillis plans), les treillis spatiaux, les constructions nervurées en béton armé, les constructions anciennes à colombages; les cases en perches et en bambous (fig. 33) ainsi que les systèmes contemporains préfabriqués en bois, en béton (fig. 32) et en acier appartiennent à cette catégorie.

Figure 2.65 : : système à poutres et colonnes.

Figure 2.66 : 32Kenya, Iles Marquises, Hutte Khoisan, Afrique du Sud, Guyane

Figure 2.67 : le plan de bois ou maisons à colombages

Figure 2.68 :

Figure 2.69 : : exemples de maisons à ossature en bois (). Ci-dessus, le camouflage du système à squelette au moyen d'un parement extérieur en briques, qui donnera l'illusion d'une construction massive.

Figure 2.70 : système Nord-Américain; système partiellement préfabriqué. ()Système ouvert de construction : en effet, ce ne sont pas les éléments de la construction (murs portants, planchers, fermes de toiture, parois, etc.) qui sont standardisés, mais bien les composants de ces éléments, notamment le bois et les panneaux qui tous deux sont utilisés en dimensions standardisées.

On parlera pour les systèmes à ossature:

- de " **trame primaire** " formant l'ossature principale; le plus souvent il s'agira d'une grille tridimensionnelle plus ou moins régulière (fig.) pour des raisons économiques (standardisation des éléments) mais également à cause d'un ORDRE formel que l'on désire exploiter. Mies Van Der Rohe qualifie de structure " CLAIRE " une construction REGULIERE où les mêmes dimensions sont soit répétées, soit modifiées de façon ordonnée (90). La trame primaire est caractérisée par des configurations soit orthogonales soit obliques suivant le degré d'adaptation choisi.
- de " **trames secondaires** " (fig. 39) constituant soit les éléments de couverture, soit les éléments de remplissage, soit enfin les éléments indépendants.

Figure 2.71 : la trame secondaire

Figure 2.72 :

Figure 2.73 : la trame secondaire (fig . 40)

Figure 2.74 :

On distinguera également deux types d'ossatures:

- les ossatures " **englobantes** " pour lesquelles il n'y a pas de distinction entre la PAROI et la COUVERTURE. Elles servent à couvrir de vastes espaces continus et sont définies suivant deux DIRECTIONS..

-les ossatures " **cellulaires** ", formées par l'addition et la répétition de cellules ou de modules tridimensionnels et définies suivant trois DIRECTIONS.).

Figure 2.75 : ossature " englobante "; d'après H. Engel, ()

Figure 2.76 : ossature cellulaire " formée de modules polyédriques; d'après H. Engel

Inhérente à la définition du système à ossature, la connexion technique des parties séparées (porter, séparer), constitue un des problèmes importants dans la conception des systèmes à ossature. Le joint détermine les possibilités structurales du squelette.

Section 3: Les systèmes mixtes.

Il serait aussi exact de classer les coques et les voiles minces dans les systèmes à ossature (puisque les armatures permettent de guider les forces) que dans les systèmes massifs (puisque les éléments séparateurs sont également des éléments porteurs).

Cependant, strictement parlant, seules les coques massives simples non armées rentrent dans la catégorie du système massif pur.

Vu la faible résistance à la flexion des matériaux utilisés, on combine souvent les systèmes massifs de fermeture avec des couvertures du type à ossature (fig. 42). Ce cas appartient donc également aux systèmes mixtes.

Figure 2.77 : système constructif de type " mixte " avec système massif de fermeture et couverture à ossature.

Figure 2.78 :

Les techniques, les matériaux et les systèmes constructifs récents ont apporté des possibilités nouvelles pour la conception des espaces architecturaux. L'acier et le béton, en autorisant des portées toujours plus grandes, ont changé totalement les PROPORTIONS classiques et traditionnelles des ouvrages ainsi que les CRITERES esthétiques.

Dans les systèmes à ossature, grâce aux progrès réalisés dans l'obtention des qualités des produits et des techniques d'application, on a pu imaginer librement dans l'espace à trois dimensions. Les espaces se sont fermés par les moyens directs des éléments constructifs (espaces englobants). L'ossature s'est intégrée dans l'espace dont elle a déterminé le nouveau caractère, aussi bien par " le principe de stabilité que par la nature géométrique de sa trame ou sa densité structurale; ses valeurs esthétiques ont été reconnues et recherchées, comme matière de composition plastique " (Du Château,p.6)

DEUXIEME PARTIE : Classification selon la transmission des efforts

Cette distinction va nous conduire à une autre classification des systèmes constructifs et à la caractérisation constructive.

On essaiera donc d'établir, à partir des systèmes constructifs, les caractères ESSENTIELS qui leur sont spécifiques.

Le critère fondamental de cette classification est celui de la transmission des efforts; en effet, l'essence même de la conception architecturale d'un système constructif consiste dans le développement d'une FORME matérielle qui conduit les forces dans certaines directions pour les reporter jusqu'au sol avec le maximum d'efficacité et de capacité.

Le problème est donc d'obtenir une classification en fonction de la connaissance des mécanismes qui font changer les forces de direction, ainsi qu'en fonction de la connaissance des systèmes capables de franchir l'espace et de résister aux déformations.

H. ENGEL () adopte une classification des systèmes, selon ces critères, qui sera reprise ci-après.

1) Systèmes où la forme est active (principalement) :

Systèmes agissant sous simple contrainte
soit principalement la traction (câble)
soit principalement la compression (arc)
câbles, tentes, structures tendues, systèmes pneumatiques, systèmes d'arcs.

2) Systèmes (de structures) agissant principalement par compression et traction des éléments :

Systèmes de vecteur-actif (vector actif structure systems)

Figure 2.79 : structures planes,)

Figure 2.80 : fermes, treillis courbes, treillis spatiaux tridimensionnels

3) Systèmes (de structures) agissant principalement par la masse et la continuité du matériau (bulk-active structure systems) :

Les éléments travaillent à la flexion essentiellement.

Figure 2.81 : exemples: poutres et portiques

Figure 2.82 : dalles, hourdis

4) Systèmes (de structures) à surface active :

Transmission des contraintes en surfaces

Figure 2.83 : structures plissées -prismatiques, pyramidales

Figure 2.84 : coques à simple courbure, -coques à 2 directions, hyperboloïdes, paraboles hyperboliques, etc...

5) Systèmes (de structures) verticaux :

c'est-à-dire des structures agissant principalement par transmission verticale des charges (etc.)

Figure 2.85 : Fig. 46. buildings à noyau central (cantilever),

Figure 2.86 :

Section 1: Les Systèmes à FORME ACTIVE

Ces systèmes agissent principalement sous simple contrainte : soit en traction (câbles, tentes, systèmes gonflables), soit en compression (arcs)

Chapitre 1: Les systèmes de câbles ou les structure suspendues

Les constructions en câble et en résille ne trouvent que peu d'applications dans la nature. La toile d'araignée elle-même fait d'avantage appel à ses propriétés élastiques qu'à celles du phénomène de tension.

Les câbles en acier (également en fibres végétales ou synthétiques) offrent une grande résistance à la traction jointe à l'efficacité de la tension simple. La faiblesse relative de leur diamètre comparativement à leur longueur les rend flexibles, c'est-à-dire incapables de résister à des efforts de flexion.

Un matériau non rigide, flexible, à qui on donne une certaine forme et fixé aux extrémités, peut supporter son poids et franchir l'espace. Les ancêtres de ces systèmes sont les câbles de suspension, verticaux qui transmettent la charge directement au point de suspension et la colonne verticale qui, en sens inverse, transfère la charge directement à la base.

Figure 2.87 : Fig. 47 traction / compression, mais même principe: un seul type de contrainte pour la transmission des charges

Figure 2.88 : . Fig. 48

Figure 2.89 : Fig. 49. La redirection des forces, pour le câble, suivant l'importance de la force horizontale:

Figure 2.90 : en prenant l'image miroir, on a le tout en équilibre.

Deux câbles avec ponts de suspension non reliés (séparés), et en les éloignant l'un de l'autre : la charge est suspendue dans l'espace : le câble transmet la charge des 2 côtés

Figure 2.91 : La forme du câble suit la direction des contraintes.(à forme active

Figure 2.92 : Plus on sépare les ponts de suspension plus les contraintes ds le câble / et plus les réactions horizontales augmentent

(H et S sont inversément prop.à h)

A cause de la faible section (due à la longueur), le câble ne peut pas résister à la flexion et donc change sa forme avec toute nouvelle condition de charge.

Formes géométriques

Figure 2.93 : poids mort : chaînette

Figure 2.94 charge uniformément répartie : parabole

Figure 2.95 : charge continue et remontant sur les bords: ellipse

Figure 2.96 : charge concentrée au centre ;: triangle

Figure 2.97 : charges symétrique: polygone

Figure 2.98 :

La suspension d'une charge ou de plusieurs charges à un câble conduit au concept du polygone funiculaire lui-même à l'origine du pont suspendu.

stabilisation

Rappelons que la: courbe caténaire est la forme prise par un câble de section constante sous son propre poids réparti uniformément sur la longueur de câble. La caténaire présente comme flèche optimale 1/3 de la portée. Au delà, il se rompra.

Un câble en acier d'une résistance de 140k/mm² peut franchir théoriquement 27 km et cela indépendamment de son diamètre.

Le plus grand pont suspendu du monde a une portée libre de 1300 m (VERRAZANNO-NARROW à N-Y). En fait la limitation de l'emploi provient essentiellement non de la résistance mais de l'instabilité sous l'effet de charges variables. Les poutres qui soutiennent le tablier d'un pont suspendu servent d'avantage à stabiliser les câbles porteurs qu'à servir d'appui au tablier. Cette rigidité est facile dans le sens de la portée des câbles mais difficile dans le sens perpendiculaire à cette portée, d'où le recours à des haubans qui soulagent le câble mais aussi le stabilisent.

A cause de son faible poids vis à vis de la portée et à cause de sa flexibilité, un câble de suspension est très sensible au vent, vibration, charges mobiles et non symétriques.

Il faut donc le stabiliser

- <soit en augmentant le poids mort
- <soit en augmentant la rigidité
- <en superposant un câble de courbure opposée avec barres rigides
- <en le fixant au sol par des câbles transversaux

Figure 2.99 : stabilisation par le poids de la toiture

Figure 2.100 :

Systèmes de mise en parallèle simple, avec stabilisation par le poids de la toiture.

Suspension directe à pylone central

Suspension par poteaux extérieurs

Toit posé sur câble de suspension

Figure 2.101 : Position du câble de stabilisation par rapport au câble de suspension

Figure 2.102 :

Figure 2.103 : Mécanisme de stabilisation pour chaque cas.

Figure 2.104 :

Figure 2.105 : . Position supérieure du câble de stabilisation

Figure 2.106 : Position inférieure

Figure 2.107 : Position mixte

Figure 2.108 : Système parallèle plan.

Le câble n'est pas une structure auto-portante, il est nécessaire des massifs d'ancrage très importants résistant à l'extraction par leur poids propre. Les tours qui portent le câble, les poutres qui le raidissent et l'ancrage qui le fixent au sol constituent un ensemble complexe réagissant à des efforts de compression (les tours) de flexion (les poutres) et de cisaillement (ancrages) tels qu'il est impossible d'imaginer des flèches supérieures au 1/12 de la portée.

Figure 2.109 : Systèmes pour retenir des câbles parallèles en suspension

Figure 2.110 :

Les toits suspendus à simple courbure

Ce ne sont pas à proprement parler des structures spatiales.

Dans ce système une série de câbles ancrés au sol sont supportés par des poteaux ou pylones capables de résister à la flexion ou encore passent au dessus des traverses comprimées rigides. Ces câbles sont suspendus dans une direction et chacun d'eux se déforme sous la charge indépendamment des autres.

Une action commune de tous les câbles ne peut être obtenue que par des poutres rigides transversales posées par dessus. Toutefois dans le cas habituel de charges inégales, les poutres rigides transversales sont incapables de stabiliser l'ensemble. Il est nécessaire de les bloquer à leurs extrémités. Pratiquement on leur substitue toujours une coque ou voile de béton travaillant comme une coque courte.

Les charges symétriques ont pour résultante des forces de tension appliquées aux points hauts de la construction et les charges asymétriques sont reportées comme dans le cas des lamelles d'une structure plissée vers les côtés.

Les charges symétriques doivent être équilibrées :

- <soit par des câbles tendus ancrés au sol
- <soit par des murs porteurs rigides perpendiculaires à la portée
- <soit par une grande poutre plate solidaire du toit.

Figure 2.111 : figure 59

Figure 2.112 : Fig 60 (Siegel)

Résille de câbles et courbure inversée

L'instabilité du système par câble est considérablement réduite si l'on combine 2 réseaux de câbles à courbures inversées.

Passage d'un simple câble de suspension à un réseau de câbles.

Figure 2.113 : Une charge ponctuelle entraîne une déformation importante au câble sollicité.

Figure 2.114 : Un câble de stabilisation transversale tend le câble de suspension et résiste mieux à la déformation.

Figure 2.115 : L'augmentation du nombre de stabilisations transversales renforce la résistance aux charges ponctuelles.

Figure 2.116 : Finalement tous les câbles participent au mécanisme de la résistance à la déformation dûe aux charges ponctuelles.

On obtient un réseau de câbles à courbures opposées.

Le pavillon d'exposition de RIO GRANDE DE SUL au Brésil se compose d'une série de câbles suspendus appelés chaînette et de câbles épousant la forme circulaire des 2 arcs comprimés et rigides des petits côtés. C'est le seul élément qui n'est pas composé de câbles.

Figure 2.117 :

Figure 2.118 :

L'arène de RALEIGH (Caroline du Nord) est une couverture tendue en parabolioïde s'appuyant sur 2 arcs paraboliques inclinés.

Figure 2.119 :

Figure 2.120 :

La piscine couverte de Monaco de SARGER est conçue suivant le même principe. A noter qu'elle n'est recouverte que par une feuille transparente de plastique qui est enlevée pendant l'été. Les arcs transversaux sont ici en acier.

Figure 2.121 :

Figure 2.122 :

Le même SARGER a conçu le pavillon d'information de la place de Brouckère à Bruxelles.

L'originalité réside dans le fait que les câbles sont remplacés par des planches collées qui travaillent en tension selon les 2 directions d'un PH exactement comme des câbles entrecroisés. A noter que les montants des fenêtres sont tendus : ils maintiennent les rives de toiture vers les fondations.

Figure 2.123 :

Figure 2.124 :

Structures combinées câbles et barres

On réalise des constructions spatiales rigides en intercalant entre des câbles des barres comprimées.

Le pavillon des USA à l'Exposition Universelle de Bruxelles 1958 comportait une toiture de ce type en forme de roue de bicyclette. Les rayons tendus soutiennent un tambour formé de 2 anneaux soumis à traction dans le sens horizontal et à compression dans le sens vertical. La jante extérieure en acier repose sur une couronne de colonnes minces.

Figure 2.125 :

Figure 2.126 :

Le même principe est exploité dans le mat-signal de l'Expo 58 et dans une des structures imaginées par BUCKMINSTER FULLER pour le musée d'art moderne de N-Y

Figure 2.127 : Pavillon des ETATS-UNIS. (f66)

Figure 2.128 : Bruxelles : Exposition universelle de 1958: (f67)

Figure 2.129 : figure 69 Types de stabilisation transversale dans les systèmes précontraints.

Figure 2.130 : figure 70 Types de contours par réseaux de câbles à courbures opposées.

Exemple d'un réseau de câbles à courbures inverses avec support en arc de béton armé.

Figure 2.131 : Une grande épine dorsale en béton armé est tendue comme arc de compression dans la direction longitudinale de la construction sur environ 85m. Un ensemble de câbles est suspendu transversalement à celle-ci selon une forme géométrique non déterminée à l'avance. Ces câbles d'abord relâchés de ce toit, sont retenus vers le bas par un groupe de câbles longitudinaux posés par-dessus. La tension est ainsi déplacée, du moins celle qui est déterminante pour la rigidité de la surface du toit. Il en résulte une surface doublement incurvée en sens opposés. Toutes ces courbures ne sont pas rigidement géométriques, mais ne sont pas arbitraires non plus. Elles sont "naturelles", inhérentes au système constructif.

Figure 2.132 : La section transversale montre la correspondance entre la forme technique et la fonction spatiale

Figure 2.133 : La forme étrange est née, d'une manière très logique à partir d'un principe constructif. Même si un jugement d'origine purement esthétique pouvait être défavorable, il faut se dire qu'une fois le système constructif choisi, il devait en être ainsi et pas autrement.

Figure 2.134 :

CHAPITRE 2 : Les tentes ou les membranes suspendues

§1. Principes généraux et définitions

C'est un système de structure suspendue vieux comme le monde. On retrouve les mêmes éléments fondamentaux : ancrages, poteaux ou arcs comprimés; quant à la résille elle prend la forme d'une membrane extrêmement souple.

FREI OTTO en Allemagne a remis en évidence le fait que dans une tente la surface gauche est la règle sans exception quelle que soit la disposition ou la forme des éléments comprimés.

Figure 2.135 : Ex: Tente pour la piste de danse des Florales de Cologne de Frei Otto

Figure 2.136 :

La comparaison des oeuvres de Frei Otto avec les réalisations des nomades Kurdes, Qashquai ou du Sistan met en évidence l'universalité de ces structures(fig. 72 à 74

Figure 2.137 : figure 72 figure 73

Figure 2.138 : figure 74

Faites d'abord de peaux de bêtes et plus tard de tissus, les tentes sont depuis toujours à la disposition de l'homme. Pour les nomades, les guerriers, elles ont toujours procurés un abri plutôt temporaire, démontable, transportable.

Figure 2.139 : figure 75

Figure 2.140 : figure 76 Abris tendus utilisés par les bergers, nomades d'Afrique du Nord.

Dans notre compréhension des formes issues des systèmes techniques (appelées aussi formes constructives ou formes structurales) les tentes sont d'un intérêt particulier, parce que dans la tente, forme et structure se confondent Comme dans tous les systèmes à forme active, la forme résulte nécessairement et directement de la répartition des efforts. Plus encore pour une tente, une forme non structurale est impossible, sinon elle flotte ou demeure instable.

Alors que nous avons parlé de câbles suspendus, de câbles prétendus et de réseaux de câbles, ici nous avons affaire à des tissus. Naturellement ce n'est qu'une façon de parler, car le tissu n'est rien d'autre qu'un réseau de câbles à mailles très serrées.

L'essence même de leurs formes vient du fait qu'elles se composent de tissus tendus. Et dans cet état tendu elles doivent être à double courbure inverse c'est à dire soumises à la même loi que les réseaux pré-tendus de câbles.

Les tentes ont besoin d'être soutenues par des mâts, des saillies, des arcs ou des nervures résistant à la compression. Elles ne peuvent être tendues qu'en combinaison avec ces éléments. L'abondance des formes possibles est illimitée et leur conception relève plus du plasticien que du mathématicien, car il est très difficile de les calculer exactement.

Aujourd'hui, elles trouvent un regain d'intérêt dans l'architecture pour abriter des activités souvent temporaires (abri de secours, loisirs, camping...) mais aussi pour couvrir des espaces plus vastes.

D'autres réalisations, souvent grandioses ont permis de mettre en évidence les qualités spécifiques de ce type de structure (Le "village des tentes" de la Mecque (Arabie Saoudite) (le hall des floralies de Floride) (le bicentennial structure de Philadelphie)

Figure 2.141 : figure 77

Figure 2.142 : figure 78

Figure 2.143 : figure 79

Figure 2.144 :

§2. Etude des formes selon les supports.

A. supports extérieurs comprimés simples PH

Figure 2.145 : figure 80 Deux poteaux extérieurs, un câble transversal

Figure 2.146 : figure 81 Quatre poteaux extérieurs, un câble

Figure 2.147 : Quatre poteaux extérieurs, deux câbles transversaux

Figure 2.148 : figure 83 Six poteaux extérieurs, deux câbles transversaux

B. Systèmes avec supports intérieurs

1. Poteaux

Figure 2.149 : figure 84 Système à un point haut

Figure 2.150 : figure 85 Par similitude avec un réseau de câble radial conique, l'augmentation du nombre de câbles périphériques augmente la résistance du réseau contre les déformations dues aux charges asymétriques. La concentration de câbles méridiens et circulaires conduit à un système de tente (membrane) A cause de la concentration des efforts ausommet il faut arrondir la surface de contact.

Figure 2.151 : figure 85 Système à plusieurs poteaux intérieurs de hauteur égales

Figure 2.152 : figure 86 Système à plusieurs poteaux intérieurs avec ancrage additionnel au centre

Figure 2.153 : figure 87 Système à plusieurs poteaux intérieurs de hauteur inégale

Figure 2.154 :

2. Supports en arcs.

Figure 2.155 : figure 88 Systèmes avec un arc intérieur

Figure 2.156 : figure 89 Systèmes avec deux arcs intérieurs

C. Systèmes avec supports extérieurs, poteaux et ancrages alternés

Figure 2.157 : figure 90 Disposition parallèle des points fixes

Figure 2.158 : figure 91 Disposition radiale des points fixes

D. Systèmes directs de suspension haute

Figure 2.159 : figure 92 Supports extérieurs (poteaux) disposition périphérique des points hauts. Un arc intérieur disposition axiale des points hauts. 1 ou 2 poteaux intérieurs disposition centrale du ou des points hauts. Supports extérieurs disposition centrale du point haut

Figure 2.160 :

E. Systèmes indirects

Figure 2.161 : figure 93 Supports extérieurs avec câbles de levage. Supports extérieurs avec câble de suspension et supports de points hauts. Supports intérieurs avec câble de suspension et supports de points hauts. Supports extérieurs disposition périphérique de points hauts avec câble de suspension et support pour un point haut central additionnel

Figure 2.162 : Figure 94

Chapitre 3 : Systèmes pneumatiques

§ 1. DEFINITION (d'après A. COOLS ())

Le principe structurel de la tente ou membrane suspendue est fortement amélioré par le fait qu'elle est tendue avant d'être chargée (Ex. : toile circulaire prétendue des pompiers, trampoline, etc.).

Une autre forme de précontrainte est celle obtenue par l'intervention de la pression. C'est le cas des halls gonflables et des constructions à coussin d'air ou à boudin.

La forme et la stabilisation de la membrane travaillant à la traction sont essentiellement déterminées par les différences de pression des milieux contigus.

"Les constructions pneumatiques sont des structures à surfaces portantes stabilisées par une différence de pression."

La différence de pression est donc un élément de la construction, alors que dans le cas des voiles, des tentes, etc., le milieu plus dense éventuel constitue une charge et n'est pas un élément de la construction.

Le milieu qui est à l'origine de la stabilisation est le plus souvent l'air ; mais ce peut également être un liquide (eau) ou un corps solide (granuleux). Il en résulte que le terme construction pneumatique est ambigu et qu'il convient de lui substituer structure-membrane à une surface portante.

Un tel type de structure apparaît dès qu'il y a convergence des deux conditions :

1° la membrane est stabilisée par des milieux de forme inconstante (pratiquement une membrane séparant des milieux de densités différentes) ;

2° le milieu stabilisant est un élément constructif et non pas une charge.

§ 2. CLASSIFICATION

1° Structures à membranes simples :

volumes dans lesquels on peut entrer en surpression ou en dépression et formés ou clos par une membrane. La différence de pression varie généralement entre 0,001 et 0,01 atmosphères (*fig. 95*)

	01. Sans stabilisation supplt.	02. Avec stabilisation supplt. ponctuelle	03. Avec stabilisation supplt. linéaire	04. Avec stabilisation supplt. linéaire et ponctuelle
1. <i>Dépression</i>	1.11	1.12	1.13	1.14
2. <i>Surpression</i>	1.21	1.22	1.23	1.24

Figure 2.163 : Figure 95 : Membranes simples

Figure 2.164 : Figure 96 : Structures à membranes doubles ou multiples

2°) Structure à membranes doubles ou multiples :

dans ce cas, une membrane fermée sur elle-même, indépendante du sol forme la structure primaire (fig. 96)

1. Dépression	2.11	2.12	2.13	2.14
2. Surpression	2.21	2.22	2.23	2.24

3°) Structure boudins sous haute pression :

une ou plusieurs membranes en forme de boudin à pression intérieure élevée constituent une structure secondaire. La pression intérieure varie généralement entre 6,2 et 7 atmosphères. Ces structures assurent généralement la fonction d'une structure secondaire pour transmettre les efforts de compression ou de flexion (fig. 97)

Figure 2.165 : Figure 97 : Structures boudins sous haute pression

Figure 2.166 :

	01. Discontinues	02. Continues
1. Droites	3.11	3.12
2. Courbes	3.21	3.22

Dans le cas où le milieu est l'air, on adopte la classification de Walter Bird :

Air supported (supporté par l'air)

Air inflated (gonflé par l'air)

§ 3. PRINCIPES CONSTRUCTIFS

La forme des composants structurels est déterminée par la pression ou la dépression, mais la forme de la structure dans son ensemble est également influencée par l'existence d'éléments de stabilisation supplémentaires.

Un soutien supplémentaire apparaît nécessaire dans le cas où de grandes portées pour réduire les rayons de courbure et aussi la tension dans la membrane (la tension est directement proportionnelle au rayon de courbure).

Le type de soutien supplémentaire est désigné suivant sa dimension :

1°) ponctuel : s'élargissant pour former des anneaux, des boucles, etc.

2°) linéaire : réalisé au moyen de calbes formant des noues, des arêtes d'arcs travaillant à la compression et de poutre soumises à flexion (A. COOLS ()).

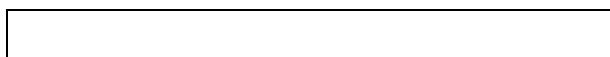


Figure 2.167 : L'air sous-pression dans l'espace fermé (étanche) supporte l'enveloppe

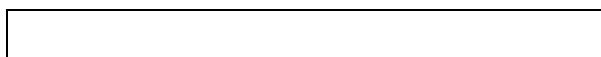


Figure 2.168 :

Principe : Par la pression croissante de l'air intérieur, non seulement le poids propre de l'enveloppe est en équilibre, mais la membrane est sous tension au point de ne pas être déformée sous une charge asymétrique.

La membrane redirige les forces uniquement selon des résultantes centrifuges.

La pression intérieure agit comme un support continu, en supplément de la membrane, avec l'avantage d'avoir un espace tout à fait livré d'un support matériel quelconque.

La résistance à la déformation est obtenue par la fermeture hermétique et par l'effort de tension de la membrane.

La bulle se déforme uniquement par perte de volume ou par augmentation de surface.

§4. GEOMETRIE DES FORMES PNEUMATIQUES

Forme de base : la sphère, car les contraintes y sont égales en tout point.

Formes dérivées : par addition ou fusion de sphères.

Types de bases :

Figure 2.169 : Système à double membrane

Figure 2.170 :

Dans ce cas, l'espace couvert n'est pas sous pression

La surface sphérique est divisée en sections ayant un rayon de courbure plus petit et donc des tensions plus faibles dans la membrane.

Les câbles reprennent les efforts principaux tandis que la membrane fonctionne comme une structure secondaire (intermédiaire).

Figure 2.171 : Figure 100 : Système à pression intérieure avec transfert des efforts principaux par l'intermédiaire de câbles

Figure 2.172 : Figure 101 (ENGEL ()) : Exemples de systèmes avec transfert ; - des efforts principaux par câbles P / - ou par des membranes fixées au sol B

Figure 2.173 : Figure 102 (ENGEL ()) : En fermant la membrane non seulement sur son pourtour mais aussi en position centrale, le rayon de courbure est réduit, et donc les contraintes dans la membrane. De cette façon, la couverture et la fermeture de larges espaces est possible, sans augmenter la hauteur de la construction.

Figure 2.174 : Figure 103 (ENGEL ()) : Types de systèmes pneumatiques, avec ancrage intérieur (à un ou plusieurs ancres ponctuels ou ancrage linéaire).

§ 5. APPLICATIONS

Des portées de 40 mètres sont aujourd'hui courantes ; elles correspondent le plus souvent à des surfaces au sol de 3 à 4000 m².

En fait, les portées sont pratiquement illimitées à condition de soutenir l'enveloppe par une résille de câbles d'acier, soulageant le tissu.

Ex. : une calotte sphérique de 100 m de \varnothing ayant un rayon de courbure de 70 m est soumise à une dépression totale de l'ordre de 80 k/m² garantissant sa stabilisation. La tension moyenne dans le tissu vaudrait 2800 kg/m ($T = \frac{PR}{2} = \frac{80 \times 70}{2} = 2.800$).

En appliquant un coefficient de 5, il faudrait un tissu dont la résistance à la rupture serait de l'ordre de 14.000 k/m, ce qui excède les possibilités des tissus courants sur le marché (6.000 kg/m). L'introduction d'une résille en acier permet de résoudre facilement le problème ().

3 exemples :

- Hall de la société Air Structure (Ingénieur L. Kaltenbach) : carré : 100 x 100 m et 15 m de hauteur; résille de câbles à mailles carrées de 5 m 50 ; chaque câble 23 mm de \varnothing résiste aux vents de 120 km/h. Projet pour agrandissement (200 m x 500 m = 10 ha en une seule portée). A noter l'extrême légèreté 2,6 k/m² pour le hall de 100 m x 100 m. Un seul ventilateur de 25 hp suffit à maintenir la surpression. Usages : stades, supermarchés, isolation de zones contre la pollution, isolation de chantier contre les intempéries).
- Théâtre expérimental gonflable de la fondation Maeght à Saint Paul de Vence : architecte Hans Walter Muller (technique et architecture 33s2 1971).
- Pavillon FUJI à l'exposition d'Osaka 1970 (architecte Yutaka Minata) en boudins de 78 m de développement (COOLS ()).

Figure 2.175 : Figure 104 : "Chambres à air" géantes, enduites d'un élastomère synthétique connu sous le nom d'"Hypalon". Schéma d'un élément de l'ossature pneumatique du pavillon Fuji. A. Enduit élastique d'"Hypalon" formant enveloppe de pneumatique. B. Tissu élastique formant la chambre à air. C. Compresseur d'air. D. Dispositif manométrique commandant le fonctionnement du compresseur. E. Une entrée du pavillon.

Figure 2.176 : Figure 105 : Pavillon Fuji - Osaka 1970 (Tech. et travaux).

Ces sortes de pneumatiques monstres, colorés en orange et en jaune, sont reliés ensemble de façon à former une construction en fer à cheval de 50 m de largeur et d'une hauteur de 25 m au centre et 35 m aux extrémités, lesquelles en forment les entrées. Chaque "pneumatique" est connecté à un compresseur qui maintient la pression de l'air emprisonné à seulement 0,1 bar pour que la structure puisse résister à la violence d'un typhon.

Les structures à simple membrane posent un problème particulier de sécurité. Le contrôle manométrique n'annule pas le danger d'une perte de pression et de voir les occupants étouffer sous le poids de la membrane s'affaisant plus ou moins brusquement. Une application intéressante de ce type de membranes a été imaginée par NEFF, inventeur du moule gonflable. Dans cette conception, la structure apparaît comme un simple coffrage permettant le montage aisé des structures tridimensionnelles. Il suffit d'étendre un treillis sur la membrane et de pulvériser au pistolet une couche de béton très fluide de quelques 2 ou 3 cm d'épaisseur. Le moule dégonflé, la structure demeure en équilibre () (Ex. : pavillon USA à Osaka - 160 x 80 m - surp. int. 20 kg f/m²).

Figure 2.177 : Figure 106 : Structures à membrane portante. Projet de Gernot MINKE et des étudiants de l'Université Technique de Hanovre. Construction à double membrane avec mat central et poutre périphérique polygonale ; stabilisée par dépression. (Stand d'exposition à Hanovre 1970)

Figure 2.178 : Figure 107 : Salle des sports à Hanovre 1970 Surface au sol : 700 m² ; construction à double membrane soutenue par un arc travaillant à la compression et comportant une stabilisation supplémentaire par 2 séries de câbles : rayonnant à l'extérieur ; parallèles à l'intérieur.

Figure 2.179 : Figure 108 : Magasin de meubles à Saint Genis Pouilly -Architecte Chanéac. Structure à simple membrane.

Figure 2.180 : Cette construction devait être implantée sur un terrain de 6.500 m². La solution la plus économique, permettant néanmoins de doter le magasin d'une image architecturale particulière, a été trouvée dans l'utilisation de coupoles gonflables, en polyester armé de P.V.C., de tailles et de couleurs standardisées. Une grande coupole blanche de 32 m de Ø et de 9 m de hauteur maximale abrite le hall de vente. Une petite coupole blanche de 15 m de Ø et de 5 m de hauteur maximale sert de réserve et de bureau. Elle est munie d'un tunnel spécial d'entrée pour les livraisons. Un sas jaune de 8 m de long et de 4 m de large établit la liaison entre les deux coupoles.

Bibliographie

- Arca International, n.28 (mars 1998)
- Arca International , n.18 (novembre 1997)
- [Ephemeral /portable, Architecture](#)
- [T&A sept./1973 n°294](#)

CHAPITRE 4 : Systèmes d'arcs, coupoles et voûtes

§ 1. Principes généraux

A. Pour le câble de suspension, nous étions partis du câble de levage.

Dans un câble, il n'y a que des efforts de traction.

Figure 2.181 :

Figure 2.182 :

Pour l'arc, on fait la même démarche mais en partant d'une colonne.

Pour éviter la flexion, la colonne doit s'incliner vers la force horizontale.

De là, la colonne couvre l'espace et devient un arc.

Sous son poids propre, la forme d'un arc est une chaînette renversée et ne développe que des contraintes de compression.

Figure 2.183 : Figure 109 En combinant un arc et un câble, on supprime toute réaction horizontale puisque les composantes horizontales des deux ont des directions opposées et donc s'annulent.

Figure 2.184 : Figure 110

B. Formes géométriques :

Comme pour le câble, les courbes "funiculaires" (sans flexion) de compression sont :

Figure 2.185 : Figure 111
 Sous poids propre : chaînette, Sous charge continue uniforme : parabole, Sous charge continue accrue sur les bords : ellipse Une charge ponctuelle, triangle
 Deux charges ponctuelles trapèze Plusieurs charges ponctuelles polygone

Figure 2.186 : Figure 112 Sous l'influence de variations thermiques P d'où contractions ou allongement de l'arc
 tassements de fondations
 charges horizontales (vent)
 charges verticales additionnelles
 la courbure de l'arc peut se modifier et s'éloigner de la courbe "funiculaire".
 Dès ce moment, il y a des contraintes de flexion.

On passe à ce problème :

Figure 2.187 : Figure 113 1) en créant une articulation au sommet d'où un arc à 3 articulations On n'a plus de flexion Δ dans la partie supérieure.

Figure 2.188 : **Figure 114.** 2) en lui donnant une forme capable de résister aux moments fléchissants soit pour un arc à 2 articulations à 3 articulations

C. Systèmes de reprises des réactions horizontales

Figure 2.189 Figure 115 fondation inclinée, arcs continus, butée, tirant

Figure 2.190 :

D. Types de systèmes d'arcs modernes

Figure 2.191 : Figure 116 (ENGEL ()), à deux articulations, fondations inclinées, toiture courbe : courbe & chaînette ($h = 1/5 L$)

Figure 2.192 : à deux articulations, butées, courbe : parabole, toiture horizontale suspendue, $f = 1/3 L$, à deux articulations butées

Figure 2.193 : toiture horizontale posée, courbe : parabole, $b = 1/5 L$

Figure 2.194 : à trois articulations, parabole $h = 1/5 L$

Figure 2.195 : à trois articulations, parabole, butées, $h = 1/5 L$

Figure 2.196 :

§ 2. Evolution historique des arcs et des voûtes

Du linteau monolithe à la voûte appareillée

S'il est relativement facile d'élever des murs, il est beaucoup plus délicat de leur faire supporter une toiture. Pour BRUTAILS (), le mode de couverture commande à l'architecture. C'est absolument vrai dans le cas des toitures massives.

3 démarches ont été expérimentées :

- A. la structure monolithique
- B. la structure en encorbellement
- C. les arcs et voûtes véritables.

A. La structure monolithique

L'espace est couvert à l'aide d'un matériau monolithe naturel ou artificiel formant dalle. Lorsque la dalle est horizontale, il est possible d'utiliser la partie supérieure comme assise pour un nouvel espace fonctionnellement utilisable. L'invention du béton armé a permis de réaliser des dalles de grandes dimensions préfabriquées ou coulées sur place. Les efforts qu'elles transmettent aux murs sont verticaux, ce qui est une condition importante pour la stabilité des murs.

Avant l'invention du béton armé, on était forcé de recourir à des matériaux naturels, le plus souvent la pierre. Dans le massif volcanique du HAURAN en Syrie, rapporte DEFFONTAINES (), on utilise encore de grandes plaques de pierre (phonolithes) de 2 m de long sur 30 cm de largeur et 20 cm d'épaisseur. La largeur des pièces est évidemment conditionnée par la portée des pierres, ou la possibilité de créer des appuis intermédiaires. Les anciens Egyptiens, après avoir employé des pierres calcaires, se tournèrent vers des monolithes de grès, plus légers et offrant un meilleur comportement à la traction et à la flexion. Les portées passèrent de 3 à 10 m dans la grande salle hypostyle de Karnak (fig. 117).

Les dimensions de la pierre conditionnaient l'espacement des points d'appuis. En Egypte, les pleins étaient généralement égaux aux vides, montrant bien les limites du système (COOLS ()).

Figure 2.197 Figure 117 : Structure monolithique / Détail de la couverture de la salle hypostyle de Karnak

Figure 2.198 : Figure 118 : Linteau : L'architecture du temple est dite "une architecture de linteau". Bloc de pierre porté par les colonnes et supportant l'entablement, son poids et sa dimension déterminent toute la proportion de l'édifice, notamment la section des colonnes. Les linteaux du temple égyptien peuvent atteindre 100 tonnes. on appelle aussi linteau le bloc de pierre qui surmonte une porte ou une fenêtre

Figure 2.199 : **Linteau**, n.m. (fig. 140). Bloc de pierre, pièce de bois ou de métal couvrant une baie et présentant un soffite¹⁴⁴. Il reçoit la charge¹⁰⁷ des parties au-dessus de la baie et la reporte sur les deux points d'appui. Le linteau est généralement formé d'un seul morceau; cependant, on peut parler de LINTEAUX EN DEUX MORCEAUX, notamment dans le cas des baies jumelées dont les linteaux, du fait de la continuité du décor, paraissent ne former qu'un seul couvrement. Le linteau a, par définition, un soffite; il ne faut pas confondre l'arc monolithe¹²⁶ avec le LINTEAU DECORE D'UN ARC (fig. 8) ou avec le LINTEAU DELARDE EN ARC (fig. 7) : dans les deux cas, il ne s'agit que d'un décor du parement ou d'un délardement¹⁴⁵ de l'arête, qui ne suppriment pas le tracé rectiligne du soffite. Par extension, on donne le nom de linteau à tout bloc qui, sans être en couvrement de baie, porte une charge entre deux points d'appui, pourvu que ce bloc ait un soffite et soit en pierre (fig. 137) : dans cette fonction, le même organe se nomme poutre ou solive⁷² quand il est en bois. Linteau en bâtière¹⁴³. Linteau sur coussinets¹²². Linteaux superposés.

Figure 2.201 : **Plate-bande**, n.f. (fig. 9 à 14). Organe clavé¹⁴⁸ porté par deux points d'appui et présentant un soffite¹⁴⁴. La plate-bande ne se distingue du linteau que par le fait qu'elle est appareillée et de l'arc que par le fait qu'elle est rectiligne. Quand elle contient un chaînage⁶⁰, elle travaille comme un linteau et ne transmet aux points d'appui que des charges¹⁰⁷; quand elle n'en contient pas, elle travaille comme un arc et transmet aux points d'appui des forces-obliques¹⁰⁷. Plate-bande à tirant (fig. 9); cf. tirant¹²⁴. Plate-bande à agrafes (fig. 9); cf. agrafe⁶⁰. Certaines plates-bandes ont plusieurs rangs de claveaux superposés. Plate-bande à deux rangs de claveaux (fig. 5). Certaines plates-bandes ne sont formées que d'une clef et de deux grands sommiers (fig. 10). Plate-bande en bâtière¹⁴³, à extradados en escalier¹⁴⁸, à crossettes en escalier¹⁴⁸, sur coussinets¹²². La PLATE-BANDE RENVERSEE, utilisée dans les fondations, n'est pas sur points d'appui et son soffite est tourné vers le haut.

Figure 2.200 : (°) Fig. 119.
Plate-bande (126)

- A. Plate-bande en bâtière (143)
- B. Plate-bande à extradados en escalier (148)
- C. Plate-bande à claveaux passe un-sur-deux (148)
- D. Plate-bande à clef passante pendante (148)
- E. Plate-bande à soffite (144)
- F. Plate-bande à crossettes en escalier (148)
 - a. Agrafe (60)
 - b. Tirant (124)
 - c. Lit brisé (148)
 - d. Tenon (148)
 - e. Clavette (149)
- f. Cavet d'adoucissement (172)

Figure 2.202 : (°) Fig. 120.
Plate-bande formée d'une clef et deux sommiers (126)

- A. Clef (149)
- B. Sommier (149)
- a. Tête de claveau (149)
- b. Lit en coupe (148)
- c. Tenon interne (148)

(¹¹) Fig. 121
Plate-bande en fausse-coupe (148)

- a. Fausse-coupe (148)
- b. Lit en coupe (148)
- c. Tête (149)

Figure 2.203 : **Architrave**, n.f. (fig. 5). Linteau¹²⁶ ou plate-bande¹²⁴ portant sur des supports verticaux¹⁰⁹. L'ARCHITRAVE MONOLITHE (fig. 6) est un linteau ; l'ARCHITRAVE CLAVEE (fig. 5), une plate-bande. Architrave d'une colonnade. L'architrave est généralement comprise dans un entablement dont elle constitue la partie inférieure : sa modénature est alors en rapport avec l'ordre³¹. Aussi, par extension, l'architrave peut n'être qu'une partie, sans fonction de couverture, comprise dans un entablement décoratif. Architrave à deux faces (fig. 36), cf. fasce¹⁸².

Figure 2.204 : **ARCHITRAVE TRANSVERSALE** (fig. 103). Architrave posée dans la largeur d'une galerie, d'un portique, d'un vaisseau, sur deux supports qui sont respectivement compris dans l'un des deux alignements de supports limitant cette galerie, ce portique, ce vaisseau. (Vocab. d'Archit. ()).

Figure 2.205 Fig. 123. Plate- bande appareillée à crossettes

Figure 2.206 : Fig. 122. Plate-bande à lits curvilignes

B. La structure à encorbellement

Les pierres même les plus épaisses ne pouvaient résister aux pressions considérables appliquées aux plafonds des couloirs et des salles ménagées au cœur des pyramides. KHEOPS imagina une solution de dalles en série pour le moins farfelue. SNEFROU dans sa pyramide Rhomboïdale imagina de recouvrir les claveaux par des dalles disposées en faibles encorbellements, chaque dalle ne dépassant la précédente que de quelques centimètres. Le caveau principal atteint une hauteur de 24 m 20 (A. COOLS ()).

Figure 2.207 : **Figure 124** : sauf sur le premier corridor d'accès et sur le caveau au fond du puits central où des dalles posées de champ suffisaient, la largeur à couvrir ne dépassant guère 1,50m. Quand les couloirs et les caveaux étaient ménagés dans la maçonnerie elle-même, un plafond fait de simples dalles horizontales était hors de question, sauf sur de très faibles portées (couloirs), SNEFROU donna à ses caveaux des voûtes en encorbellement extrêmement hautes. où chaque dalle ne dépasse que de quelques centimètres la précédente, répartissant ainsi la charge sur un grand nombre d'éléments.

Figure 2.209 : **Figure 126**, Les voûtes à poussées, les voûtes par claveaux sont étrangères à l'architecture de l'Inde : lorsqu'il s'agit de couvrir un espace carré, on procède (fig. 126 B) par empilage de dalles disposées en pan coupé et s'avancant progressivement sur le vide.

Figure 2.208 **Figure 125** : Dans CHEOPS, les pierres les plus dures n'auraient pu résister aux pressions considérables appliquées aux plafonds des couloirs (montant étroits) au cœur de la pyramide. Solution : 1) l'encorbellement à fausse voûte 2) chambres de décharge (2 dalles en V renversé) (voir plus loin)

Figure 2.210 : **Figure 127** Pour le cas d'une galerie, on procède par assises en encorbellement successif et l'on a soin (fig. 126 A et 127 M) de donner à chaque pierre une queue suffisante pour annuler toute tendance à la bascule (CHOISY ()). Les autres grands bâtisseurs de pyramides, les Mayas, adoptèrent une solution voisine, imaginant d'associer parement de pierre et maçonnerie de béton. ()

Figure 2.211 : Figure 128 : Structure en encorbellement

Type de voûtes mayas :

1. Voûte classique en gros appareil
2. Voûte avec parement-coffrage
3. Voûte "en bouteille" d'Uaxactun
4. Voûte de l'aqueduc de Palenque
5. Voûte à arc trilobé du Palais de Palenque
6. Voûte concave du Palais du Gouverneur à Uxmal (d'après Morley). Dans H. STIERLIN "HAYA" aff. du Livre, 1964

Figure 2.212 : Figure 129 : Voûte sphérique sans cintrage, en briques où chaque assise surplombe légèrement la précédente. Profil en ogive. Abydos - Egypte (CHOISY I, p 22)

Figure 2.213 : Figure 130 : Berceau appareillé (Abydos) par encorbellement sans cintrage. Empilage équilibré prend l'aspect d'une voûte clavée.

Ce n'est pas le cas. C'est une construction à contrepoids (chaque bloc en surplomb à une partie qui lui permet de se tenir en équilibre) (CHOISY I, p 31)

Figure 2.214 : Figure 131 : Le début, le germe de la voûte à poussées il faut le trouver dans la voûte réduite à deux voussoirs.

A. Deïr-el-Bahasi

B. Entrée grande pyramide (voûte double)

C. Tombe à Gizeh à 3 voussoirs : début de la voûte clavée (CHOISY I, p. 31)

C. La structure en arcs et en voûte véritables

Les structures en encorbellement sont de fausses voûtes. Il faut revenir à la couverture de la chambre royale de la pyramide de KHEOPS pour découvrir l'amorce d'une vraie voûte. Si les linteaux en série résistent depuis des millénaires, c'est parce qu'ils sont surmontés de 2 dalles en V renversé qui les soulagent de toute surcharge. Cette solution est la même que celle que nous avons rencontrée à MYCENES, à la porte des lionnes (fig. 134).

La méthode consiste à coiffer les pièces de 2 dalles disposées en V renversé.

Souvent, plusieurs couples de dalles de dimensions croissantes sont superposées.

Lorsque les Egyptiens souhaitaient obtenir quand même un plafond horizontal, ils aménageaient ce que l'on appelle une voûte, ou chambre de décharge : la dalle du plafond était alors surmontée par deux blocs en V renversé reposant soit en dehors de la dalle, soit sur sa partie soutenue ; cette dalle n'avait plus à supporter que son propre poids.

Figure 2.215 : Figure 132

Figure 2.216 :

Au-dessus du caveau supérieur de la pyramide de CHEOPS, on trouve même un ensemble complexe dont le rôle mécanique n'est pas clair : une voûte en V renversé surmontant quatre compartiment horizontaux et de même largeur; on voit mal ce qu'ajoutent ces quatre compartiments.

Ce système de voûte et de chambre de décharge fut au moins jusqu'à la fin de Moyen Empire l'objet de nombreuses variantes dans la disposition réciproque des blocs, dans leurs procédés d'appui, de jointure, variantes qu'on ne peut énumérer ici, mais qui témoignent du maintien d'un certain sens de la recherche.

Figure 2.217 : Figure 133

au moins dans le détail. Deux solutions adoptées (J.L. de CENIVAL, "L'Egypte", p.4 du Livre, 1964). Moyen Empire pour l'établissement de voûtes en V renversé

Figure 2.218 :

Rappelons que la maçonnerie au-dessus d'une baie, même couverte par un linteau transmet aux fondations les charges selon les arcs. Il en résulte que le linteau ne supporte guère que la charge du tympan qui le surmonte. Des arcs de décharge permettent de réduire encore cette contrainte, ce qui est particulièrement important dans le cas de

matériaux travaillant mal la flexion, comme la pierre. A cet égard, la porte des lionnes de Mycènes est remarquable avec sa pierre de linteau taillée pour correspondre aux moments fléchissant maximum et allégées par un arc formé de 2 pierres posées en arc et reprenant les charges sur les pieds droits eux-mêmes en pierre très dures. (COOLS ()).

Figure 2.219 : L'ancêtre de l'arc est donc le triangle de décharge, Figure 135

Figure 2.220 : L'ancêtre de la voûte, la chambre de décharge (2 plaques en V renversé) Figure 134. La porte des Lionnes à Mycène, Figure 136

Un arc est une portion définie d'une courbe ; une structure en arc est celle qui dans un espace bi-dimensionnel utilise les caractéristiques de la courbe pour assurer la stabilité de l'ensemble.

La voûte est le développement à l'espace tri-dimensionnel des structures en arc.

La courbe linéaire et la surface courbe caractérisent donc essentiellement ces structures. Elle ne doivent être confondues ni avec les portiques, ni avec les coques, bien que ces 2 structures présentent des points communs avec les arcs et les voûtes.

Dans un portique, on observe généralement une prédominance d'efforts de compression dans les piliers et de flexion dans les linteaux. Cela se traduit par des éléments verticaux élancés et par des poutres horizontales relativement hautes.

Cette structure est à la fois efficace et économique, si :

- les portées ne sont pas trop importantes
- la poutre horizontale s'impose pour des raisons fonctionnelles.

Si ces conditions ne sont pas réunies, il est préférable de recourir à des structures en arc et en voûte.

Le portique à faite triangulaire se distingue du portique normal par l'existence de 2 poutres obliques en lieu et place de la poutre horizontale (). Dans un tel portique à 3 articulations, les poutres obliques se comportent comme des barres de compression dans une poutre en treillis triangulée et les piliers ont tendance à se renverser vers l'extérieur. Plus l'obliquité des poutres est grande, plus la poussée latérale exercée sur les piliers est faible. (COOLS ()).

Figure 2.221 : Figure 137 : Portique à 3 articulations

Figure 2.222 : Figure 138

Figure 2.223 : Dans un portique : Figure 139 donc : poutre horizontale assez haute, piliers : élancés

Figure 2.224 :

Si on multiplie le nombre des éléments obliques et si on diminue la hauteur des piliers, à chaque fois l'effort de flexion diminue et celui de compression augmente. A la limite, le portique polygonal à un nombre infini de côtés devient un arc travaillant uniquement (ou essentiellement) en compression (fig. 140). L'arc est donc l'antithèse du portique qui travaille, lui, essentiellement à la flexion.

Figure 2.225 : Figure 140

Figure 2.226 : Figure 141 : Courbe funiculaire et parabole

Le problème est de définir la forme de l'arc pour que l'ensemble de la structure soit soumise à un effort de compression unique. Cette forme idéale est celle prise par un câble supportant des charges égales réparties horizontalement de façon uniforme : c'est la courbe funiculaire () de nature parabolique. Pour obtenir l'arc, il suffit d'inverser la courbe funiculaire (Fig. 141) ().

De nombreux arcs et voûtes ont été réalisés sur cette base idéale soit intuitivement (arc de Ctésiphon en Mésopotamie), soit par l'expérimentation (voûtes de la Sagrada Familia de Audi à Barcelone) ou par le calcul (les hangars d'Orly) (A. COOLS ()).

La plupart des arcs et des voûtes n'ont cependant pas cette forme idéale : ce ne sont pas des paraboles. Il en découle que, et c'est particulièrement le cas de l'arc circulaire, ces structures ne sont pas uniformément comprimées et subissent dès lors des efforts de flexion plus ou moins importants.

Si l'on recourt néanmoins à la forme circulaire, c'est essentiellement pour des raisons de facilité de mise en oeuvre.

Les arcs, et spécialement ceux en maçonnerie, sont lourds et exercent des poussées considérables sur les piliers qui les supportent. Ce problème de butées est essentiel et souvent plus important que celui de l'élimination des efforts de flexion. On le résout de deux manières :

- par un tirant situé à la base de l'arc (Loge des Lanzi à Florence) (*fig. 142*)
- par un contrefort (architecture gothique) () (*fig. 143*).

Figure 2.227 : Figure 142 : Loge des Lanzi à Florence

Figure 2.228 : Figure 143 : Cathédrale Saint-Just à Narbonne, Dessin de Viollet le Duc in Dictionnaire. op.cit.

- Batterie d'arcs-boutants
- A. Arcs superposés
 - B. Arcs successifs
 - C. Culée
 - D. Culée intermédiaire
 - E. Etrésillonnement
 - a. Tête d'arc-boutant

Figure 2.229 : Figure 144 : Relation flèche-poussée : P. Charge, f. Flèche, L. Portée, H. Poussée

Figure 2.230 : Mais on cherche surtout à réduire la poussée : "la poussée est proportionnelle à la charge totale et à la portée et inversement proportionnelle à la hauteur de l'arc " (*fig. 144*)

§ 3. NOMENCLATURE DE L'ARC-APPAREILLE

A. DEFINITIONS

Figure 2.231 : 1. Arcade, 2. Arceau, 3. Centre, 4. Reins, 5. Contre-clés, 6. Claveau ou voussoir, 7. Clé de voûte ou d'arc, 8. Imposte, 9. Piedroit, 10. Naissance, 11. Sommier, 12. Rouleau ou archivolte, 13. Flèche

Figure 2.232 : Figure 146 : Claveau-voussoir, a. Donelle d'intrados, b. Donelle d'extrados, c. tête, d. Lit en coupe

Arc, n.m. Organe clavé¹⁴⁸ porté par deux points d'appui et présentant un intrados¹⁴⁴ formé d'un seul rouleau¹⁵⁰ de voussoirs. Le tracé de l'arc est donné par l'intrados. L'arc est, par définition, appareillé; il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer l'ARC CLAVE à l'ARC MONOLITHE (*fig.*). L'arc monolithe n'est un arc que par le tracé, il travaille comme un linteau; l'arc appareillé transmet à ses appuis des forces obliques¹⁰⁷. Il peut être fait de plusieurs rouleaux superposés; mais il se distingue de la voûte en berceau¹³⁴ par le fait que son rouleau d'intrados ne présente jamais dans sa profondeur plus de trois voussoirs. Ne pas appeler arc une voûte en berceau ou une voussure¹⁴⁰ couvrant une baie. *Porte couverte d'une voûte en berceau*. L'arc est dit PROFOND lorsque son rouleau d'intrados est formé de voussoirs particulièrement longs. L'ARC RENVERSE utilisé dans les fondations n'est pas sur points d'appui et son intrados est tourné

vers le haut. Cf *arc extradossé*¹⁴³, *arc arasé*¹⁴³, *arc à extradados en escalier*¹⁴⁸, à *crosettes en escalier*¹⁴⁸. Ne pas confondre l'arc de couverture avec l'*arc de réseau* qui n'est qu'un élément décoratif; cf. *réseau*¹⁰¹.

Arceau, n.m. Les arceaux sont de petits arcs décoratifs non appareillés, en frise¹⁸¹. *Frise d'arceaux*. *Arceau d'une corniche*. Le long d'une corniche rampante, les arceaux sont RAMPANTS ou d'APLOMB; cf. modillons rampants, modillons d'aplomb¹⁷³.

L'ARCADE est une ouverture faite dans un mur avec un arc plein cintre soutenu par deux *pieds droits* : les arcades d'un cloître. Faux ami : l'ARCATURE, série d'arcades aveugles à but décoratif.

Intrados, n.m. Face inférieure curviligne de l'arc et de la voûte. le tracé de l'intrados donne la définition géométrique de l'arc architectural. la courbure de l'intrados est variable; elle peut comprendre certaines parties droites; dans la trompe plate¹²⁹, l'intrados est plat. L'axe directeur de l'intrados est généralement horizontal : mais dans la voûte inclinée¹⁴⁷, il est rampant¹⁴, et dans le pendentif¹²⁹ pratiquement vertical. Ne pas confondre l'intrados d'un arc avec le *réseau d'intrados*¹⁰¹ qui double l'arc intérieurement. *Voûte à caissons*, cf. caisson¹⁴³.

Extrados, n.m. Face supérieure arquée ou pyramidée d'un arc ou d'une voûte, exceptionnellement d'un linteau ou d'une plate-bande. L'arc ou la voûte sont généralement EXTRADOSES, c'est-à-dire que leur extrados est concentrique à leur intrados. Il n'est nécessaire de le préciser que pour opposer les arcs ou les voussures extradossés aux arcs et aux voûtes à extradados non concentrique à l'intrados ou arasés¹⁴³. Les différents tracés d'extrados sont désignés par les mêmes termes que l'arc lui-même. *Arcs plein-cintre à extradados brisé*. *Arc à extradados en escalier*¹⁴⁸, à *crosettes en escalier*¹⁴⁸. Certains linteaux, certaines plate-bandes ont un extrados. Linteau à extradados segmentaire.

Archivolte, n.f. Corps de moulures¹⁷⁹ porté par le front d'un arc ou d'une voussure, au nu ou en saillie sur le nu du mur. Cette définition exclut donc toute la mouluration en renforcement par rapport à ce nu. Sur un arc à ressauts¹³¹ ou sur une voussure¹⁴⁰, l'archivolte n'est qu'un couronnement à l'extrados; elle a accessoirement une fonction de larmier⁸⁷; elle peut être taillée sur les voussoirs mêmes de l'arc ou former un mince rouleau¹⁵⁰ supérieur. LE ROULEAU D'ARCHIVOLTE. Sur l'arc sans ressaut, l'archivolte est l'ensemble de la mouluration du front. Dans l'architecture classique, cette mouluration est généralement soumise à la règle des ordres : l'archivolte est moulurée comme l'architrave et présente des fascies¹⁸². *Archivolte composite à deux fascies*. Dans l'ARCHIVOLTE RETOURNEE, la mouluration fait retour horizontalement à la base, soit pour former une *chassette*, soit pour régner en cordon. Ne pas confondre l'archivolte avec le gâble¹⁷⁷. (Dictionnaire, fig. IX...)

L'arc ne travaille jamais comme un monolithe mais comme un ensemble articulé. Viollet le Duc a démontré qu'un berceau en plein cintre fortement chargé périclité par l'écartement des piedroits en se divisant en 4 voussoirs déterminant 5 joints de rupture caractéristiques : 2 aux reins (ouverts vers l'extrados), 1 à la clé et 2 aux naissances (ouverts à l'intrados). ()

Figure 2.233 : Figure 147 : Les "voussoirs" d'un arc en plein cintre.

Figure 2.234 :

L'anneau d'une coupole en maçonnerie, s'il est fortement chargé, se fissure verticalement marquant ainsi les points de moindre résistance entre les voussoirs soumis à traction.

La coupole ne retrouve son équilibre que sous l'effet de voûte par lequel 2 éléments forment un ensemble statique dans la mesure où il n'y a pas de déformation, c'est-à-dire si la rigidité est suffisante ; d'où l'épaisseur et l'aspect massif des arcs et des voûtes anciennes. Précisons enfin que toutes les voûtes traditionnelles reposent sur une conception empirique et que même l'architecture gothique glorifiée par Viollet le Duc ne correspond pas statiquement à son apparence structurelle : les nervures ne jouent pas le rôle de soutien qu'on leur prête et encore moins les arcs boutants, les pinacles et les contreforts. Tout au plus contribuent-elles à maintenir l'équilibre () () ().

B. La plupart des arcs (et des voûtes) ont besoin pour être édifiés d'un ouvrage en charpente : le cintre () (A. COOLS ()).

Figure 2.235 : Figure 148 : Le cintre, Dessin de Viollet le Duc in Dictionnaire op. cit. 1868. A. Cintre (146), B. Couchis (146), C. Blocage chargeant les reins (151)

Figure 2.236 :

Variétés d'après le tracé et la forme.

Figure 2.237 : Figure 149 : Arc en plein cintre Arc en segment égal ou semblablement égal au dem-cercle. Voûte en berceau plein-cintre. Dans l'arc en plein-cintre, la flèche¹⁴⁷ est égale à la moitié de la portée¹⁴⁷. On nomme ARC SURBAISSE tout arc dont la flèche est inférieure à la moitié de la portée et ARC SURHAUSSE tout arc dont la flèche est supérieure à la moitié de la portée. Ne pas confondre l'arc surhaussé et l'arc surélevé¹³³. Voûte surbaissée à lunettes..

Figure 2.238 : **Brisé**. Arc à deux branches concaves se rejoignant en pointe au faite; VOUTE EN BERCEAU BRISÉ. Ne pas appeler ogive l'arc brisé. En général, l'arc brisé et la voûte en berceau brisé n'ont pas de clef mais un joint de faite. Préciser éventuellement arc brisé à clef.

Figure 2.239 : Figure 150 : Arc brisé en tiers-point. Arc brisé à deux segments, dans lequel peut s'inscrire un triangle quilatéral : le centre de chaque segment est placé à la naissance de l'autre; leur rayons est égal à la porté. VOUTE EN BERCEAU TIERS-POINT.

Figure 2.240 : Figure 151 : Arc brisé en lancette. Arc brisé à deux segments, plus aigu que l'arc en tiers point : les autres sont placés à l'extérieur de l'arc et les rayons sont plus grands que la portée. Ne pas confondre l'arc lancette avec un quelconque arc brisé surélevé. VOUTE EN BERCEAU LANCETTE.

Figure 2.241 : Figure 152 : Arc brisé surbaissé Arc brisé à deux segments, moins aigu que l'arc en tiers-point : les centres sont placés à l'intérieur de l'arc et les rayons sont plus petits que la portée. VOUTE EN BERCEAU BRISÉ SURBAISSE.

Figure 2.242 : Figure 153 : Arc en chaînette Arc dont le tracé est une chaînette renversée, la chaînette étant la courbe que dessine naturellement une chaîne suspendue à ses extrémités et abandonnée à la pesanteur. VOUTE EN BERCEAU CHAINETTE

Figure 2.243 : Figure 154 : Arc en anse de panier Arc surbaissé en demi-ovale, la portée étant le plus grand diamètre de l'ovale. On distingue théoriquement des arcs en anse de panier à trois, cinq, sept, etc, centres. VOUTE EN BERCEAU ANSE DE PANIER.

Figure 2.244 : **Figure 155** Arc infléchi. Arc à deux branches convexes se rejoignant en pointe au faite.

Figure 2.245 : **Arc déprimé**. Arc surbaissé dont le tracé est une droite raccordée à la naissance par deux segments de cercle : le rayon de ces segments est égal ou supérieur au cinquième de la portée de l'arc, ce qui distingue l'arc déprimé de certaines plates-bandes ou de certains linteaux à soffite surélevé. LA VOUTE DEPRIMEE présente un plafond.

Figure 2.246 : **Arc outrepassé**. Arc de tracé quelconque se prolongeant en petits segments en-dessous de la plus grande ouverture. Arc plein cintre outrepassé. Lambris en berceau outrepassé.

Figure 2.247 :

Figure 2.248 : Arc en mitre. Sorte d'arc tracé suivant deux droites rampantes formant un angle au faite. L'ARC EN MITRE EMOUSSE est un arc en mitre dont l'angle est remplacé par un petit segment de cercle.

TYPOLOGIE DES VOUTES D'APRES LA FORME ET LA STRUCTURE.

I Définitions

Voûte, n. f. Ouvrage maçonné, construit entre des appuis, couvrant un espace et présentant un intrados. La voûte travaille comme l'arc et transmet à ses appuis des forces obliques. Cependant, la voûte plate à un plafond et non un intrados et ne travaille comme un arc que lorsque son appareil est clavé. *Vaisseau voûté*. LE VOUTEMENT est un ensemble de voûte formant un seul couvrement. Ne pas appeler voûte un couvrement non maçonné ; la FAUSSE VOUTE est un couvrement non maçonné imitant les dispositions d'une voûte. *Lambris en berceau peint en fausse voûte*. Ne pas confondre l'arc profond avec la voûte en berceau. LA VOUTE EN BERCEAU VERTICAL et la VOUTE EN BERCEAU RENVERSE ne sont pas des couvrements : la première, à direction verticale, est mise en œuvre entre les contreforts de certains murs de terrassement ; la seconde, à intrados tourné vers la haut, est mise en œuvre dans certaines fondations où certains radiers. Cf. *voûte extradossée*. Les MAITRESSES VOUTES couvrent les parties principales d'un édifice voûté.

II Premières classifications

“ C'est à l'occasion des voûtes que le génie des architectes aux prises avec les difficultés les plus redoutables, a obtenu les plus splendides résultats ”.

Le principal problème né de l'extension de la structure en arc aux trois dimensions de l'espace est celui des butées ; dans la cas de l'arc tout se passe dans un plan qui est celui du mur, de l'arc, du contrefort ; dans celui de la voûte il s'agit de donner aux ouvrages porteurs, aux murs par exemple, une épaisseur suffisante pour résister aux poussées qui sont cette fois perpendiculaires à leur axe.

Les éléments voûtés doivent pouvoir, comme le font les arcades d'un portique dans le système bi-dimensionnel, se contrebuter les uns les autres afin d'équilibrer leurs poussées réciproquement (églises à coupoles byzantines par exemple).

Les voûtes peuvent être réalisées essentiellement selon deux principes.

Figure 2.249 : Voûtes pleines : la voûte naît du développement d'un ou de plusieurs arcs selon leurs génératrices (architecture romane).

Figure 2.250 :

Dans le cas A, les voûtes transmettent leur charge en principe tout au long de leur naissance à des ouvrages porteurs continus.

Il existe en outre des méthodes qui permettent de localiser les charges transmises par les voûtes du type A.

Figure 2.251 :

Figure 2.252 :

Début, p. 97

B. - Voûtes à remplissage :

La voûte résulte de l'emploi de plusieurs arcs de caractère funiculaire disposés parallèlement ou en convergence. Les vides sont ouverts par des éléments travaillant en flexion ou également voûtés (architecture gothique)

Dans le cas B, au contraire, les charges transmises par les arcs sont localisées en des points précis.

Figure 2.253 : Fig. 162 : Structure en voûte à remplissage Résultant de l'emploi d'arcs disposés parallèlement ou en convergence et réunis par des remplissages. Sources : H/HOFSTATTER op.cit.

Figure 2.254 : Fig. 163 La sainte Chapelle, Paris : plan et coupe 1:250 : A : Eglise inférieure, B :Eglise supérieure

III. Classification des voûtes et des coupoles

A. Voûtes pleines transmettant leurs pousses a des ouvrages continus.

1) La voûte cylindrique ou en berceau.

a)Principes de formation et de stabilité

Elle est engendrée par un arc en forme de plein cintre, elliptique, parabolique ou à plusieurs centres se déplaçant selon une génératrice perpendiculaire à l'arceau (cas de la voûte ordinaire) ou selon une génératrice courbe, elliptique ou circulaire (cas de la voûte annulaire ou torique).

Figure 2.255 : Figure 164. Voûte en berceau

Figure 2.256 : Figure 165. : Voûte en berceau, en brique, sans cintrage (Egypte). Pour éviter les cintres on procédait par tranches verticales et non par assises convergentes. La première tranche (a) est maçonnée sur M, le mur de tête et ainsi de suite presque N. Il faut seulement un cintre par l'arceau de tête (choisy, I, p.23).

L'épaisseur des murs soutenant la voûte résulte de la nécessité de maintenir la résultante des forces au niveau de l'assise inférieure en deçà du parement extérieur.

Dans l'architecture traditionnelle (non calculée) on s'efforçait empiriquement de la maintenir dans le 1/3 central de l'assise de base.

L'imprécision des méthodes obligeait à des épaisseurs considérables (Basilique de Constantin à Rome : voûte en berceau en brique et blocage de 24 m de diamètre posant sur des murs de 4.20 m d'épaisseur à la naissances ; rapport diamètre / ép. mur: 5.76).

18 siècle plus tard les murs au droit des arcs doubleaux de la voûte en berceau de la salle des pas du Palais de Justice de Paris ont pour une portée de 12.50 m de diamètre, 1.90 m d'épaisseur soit rapport D/M = 6;58 (A.Cools).

b) Types de voûtes pleines.

Figure 2.257 : **Voûte en berceau** (fig. 167) Voûte dont l'intrados est engendré par la translation d'un arc suivant un axe. La voûte en berceau se distingue de l'arc par le fait qu'elle présente au moins quatre voussoirs en profondeur ou (quand elle est appareillée en rouleaux) plusieurs rouleaux d'intrados. Le mot berceau ne désigne qu'une forme qui peut être aussi bien celle d'un lambris que celle d'une voûte ; employé seul, il n'implique donc pas nécessairement l'idée de voûtement. Lambris en berceau (IV, fig.). Les berceaux prennent le nom des arcs de même tracé. **Voûte en berceau continu** (fig.167) voûte en berceau sans doubleau. Voûte en berceau continu sur trois travées. La voûte en berceau fractionné a un doubleau sur chaque travée. Ne pas confondre la voûte en berceau fractionné avec un suite de voûtes barlongues en pendentif.

Figure 2.258 :

Figure 2.259 :

Figure 2.260 :

Il ne faut pas confondre le *demi-berceau* (fig. 170) qui n'a qu'une retombée, le *berceau rampant* (fig.168) dont les retombées sont à des hauteurs différentes et le *berceau incliné* (fig.171) dont la ligne de faite est rampante ; cf. voûte inclinée. *Voûte en berceau incliné à ressauts* (fig.171).

Figure 2.261 : **Voûte en berceau transversal** (fig. 166 A) Voûte en berceau dont l'axe est perpendiculaire à l'axe longitudinal d'un vaisseau, d'une galerie. Lambris en berceau transversal.

Figure 2.262 : **Voûte en berceau tournant** (fig. 169) Voûte en berceau dont l'axe est une courbe dans un plan horizontal. Déambulateur couvert d'une voûte en berceau plein-cintre tournant. Voûte en berceau tournant sur le noyau, le pilier,...L'axe est un cercle ou un ovale complet : la retombée centrale repose sur un noyau d'escalier, sur un pilier,...

Figure 2.263 : Voûte en berceau hélicoïdal (fig. 172) Voûte en berceau dont l'axe est une hélice. L'escalier en vis-de-Saint-Gilles est couvert par une telle voûte.

Figure 2.264 :

Figure 2.265 : **Arc diaphragme** (fig. 166 B) Ensemble formé d'un arc et d'un diaphragme porté par cet arc. Le diaphragme est un pan de mur intérieur, plus ou moins développé, dont les deux faces sont dégagées. L'arc diaphragme peut être utilisé sous une voûte, un plafond, un toit,... Cf. ogive diaphragme, doubleau diaphragme. (Vocabulaire de l'architecture ()).

Figure 2.266 : **Doubleau** (fig. 173) renforcement, redoublement en ab de l'épaisseur du mur à l'intérieur d'un berceau, destiné à lui donner une résistance plus grande à cet endroit. (Gromort ()). L'éclairage des salles couvertes en berceau est difficile. En dehors de la zone des tympans, il faut recourir à des pénétrations voûtées (vestibule de Saint Pierre à Rome. Le berceau transversal permet de surmonter ce problème.

Figure 2.267 :

Figure 2.268 : Exemple : figure 174, Palais de Tag-Eivan, Perse : la voûte est partagée en une ossature active et des voûtains de remplissage : au lieu d'un berceau longitudinal, on a une série de berceaux B transversaux et posés sur des arcs doubleau ; les poussées se localisent non plus uniformément mais en des zones localisées (A). Ingénieuses décomposition des efforts qui influenceront les architectes de la Perse musulmane et l'occident chrétien. (Choisy I p.106)

Figure 2.269 :

Figure 2.270 :

Figure 2.271 :

Figure 2.272 :

Figure 2.273 :

Figure 2.274 :

La voûte en arc de cloître

a) Définition et formation.

Lorsqu'il s'agit de couvrir des espaces carrés on peut recourir à ce type de voûte résultant de l'intersection de deux demi-cylindre dont les génératrices sont parallèle aux quatre murs de la salle qui leur servent de retombées. Il est également possible de couvrir des salles légèrement rectangulaire par ce procédé en faisant varier la forme d'une des voûtes selon

un profil elliptique sans toutefois modifier la flèche totale. L'effet est rarement heureux.

La voûte en arc de cloître composée avec la voûte en berceau permet de couvrir des plans rectangulaires allongés. (Cools,...).

Figure 2.275 : Fig. 175 **Voûte en arc de cloître** (fig. 175, 176) Voûte constituée de quatre voûtains sur plan carré ou rectangulaire et de même hauteur, dont les rencontres forment des arêtes rentrantes : la voûte en arc de cloître est théoriquement le résultat de la compénétration de deux berceaux de même hauteur en croix dont les naissances rectilignes restent entières. La coupole polygonale n'est qu'un cas particulier de voûte en arc de cloître à plus de quatre voûtains.

Voûte en arc de cloître rectangulaire peut être barlongue ou oblongue : ses arêtes se réunissent toutes les quatre au faite ou deux par deux sur une ligne de faite. La voûte en arc de cloître peut avoir théoriquement tous les tracés et tous les appareils de voûte en berceau.

Voûte en arc de cloître déprimée (fig.) formée de berceaux déprimés présente un plafond à son sommet.

Voûte en demi arc de cloître (fig.) ne présente que trois voûtains.

b) Différences avec la voûte d'arêtes. (voir plus loin)

Deux cylindres - deux berceaux-circulaires de même rayon, A et B (fig.177), donnent dans ces conditions, à leur intersection, une voûte d'arêtes: 1,2,3,3,4. Mais, si nous considérons le solide C commun aux deux surfaces (solide où nous considérons comme pleines, opaques, les parties qui dans la première voûte en arc de cloître. Il s'agirait encore d'une voûte d'arêtes si, l'un des cylindres F étant circulaire, la directrice de l'autre était une ellipse G dont le petit axe serait égal au diamètre du premier (Gromort,).

Figure 2.277 : Fig. 177 Expression géométrique des voûtes d'arêtes et en arc de cloître. (Gromort,).

Figure 2.278 :

c) **Voûte en arc de cloître avec pénétration**

Figure 2.279 : Fig. 178 d'après Gromort.

Figure 2.280 : Fig. 179 d'après J. François. D'après J. François : prétoire de Mousmiyeh (vers 160) converti en église vers 400
1. Voûte en dalles posées sur axes
2. Voûte en arc de cloître
3. cul de four

d) **Voûte en cul-de-four (fig.)**

Voûte dont le plan est un segment de cercle et l'intrados une concavité de révolution. Le plan de la voûte en cul de four est théoriquement un demi-cercle ; par extension, on parle de cul de four polygonal. Le plan du demi cul de four est un segment voisin du quart de cercle. Suivant l'arc générateur, on distingue les culs de four en plein-cintre, segmentaires, en anse de panier, déprimé, cul de four en quart de sphère, lambris en cul de four.

Figure 2.281 : Figure 179. D'après J. François : prétoire de Mousmiyeh (vers 160) converti en église vers 400

Figure 2.282 : Voûte dont le plan est un segment de cercle et l'intrados une concavité de révolution.

1. Voûte en dalles posées sur axes
2. Voûte en arc de cloître
3. cul de four

Le plan de la voûte en cul-de-four est théoriquement un demi-cercle; par extension, on parle de cul-de-four polygonal. Le plan du demi cul-de-four (fig.). Est un segment voisin du quart de cercle. Suivant l'arc générateur, on distingue les culs-de-four en plein cintre, segmentaire, en anse de panier, déprimé, etc. Cul-de-four en quart de sphère. Lambris en cul-de-four. Le cul-de-four est habituellement assisé, c'est-à-dire qu'il est formé d'assises de voussoirs ou d'assises en tas de charge. Il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer le cul-de-four assisé (fig.) avec cul-de-four appareillé en limaçon avec la coquille. Cul-de-four en tas de charge. Trompe en cul-de-four.

Cul-de-four appareillé en limaçon. Cul-de-four formé de rangs de voussoirs hélicoïdaux.

Voûte en coquille.

Voûte en cul-de-four dont le pôle est à la naissance et non au faite : la coquille n'a pas de clef, mais un trompillon, ce qui distingue le cul-de-four assisé. La coquille est généralement appareillée en panache: il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer cette disposition à la coquille formée de monolithes en panache (fig.) ou appareillé en rouleaux. Ne pas confondre la voûte en coquille avec l'arrière voussure de sainte Antoine trompe en coquille.

Voûte dallée (fig.)

Voûte sans voussoir, formée de dalles plus ou moins cintrées reposant sur des arcs-diaphragmes ou des nervures. Voûte en berceau dallée (fig.)

e) La voûte en arc de cloître est toute indiquée pour couvrir des salles qui à l'opposé des portiques ou galeries sont limitées sur leurs quatre faces par des murs percés ou non d'ouverture. Elle présente avec la voûte d'arêtes cette différence qu'elle peut être construite par assises successives et que, chacune d'elles une fois mise en place, on peut interrompre la construction. Il est donc possible d'éclairer ces voûtes facilement par le haut. Les voûtes d'arêtes, au contraire, ne tiennent que par la pression de différents voussoirs contre la clef : la stabilité de la voûte n'est assurée et elle ne peut être décintrée, débarrassée de l'échafaudage qui la soutient que quand cet élément essentiel est en place. Une fois familiarisé avec la géométrie de la voûte en arc de cloître, on se rendra compte des facilités qu'elle offre un décors intérieur et des effets qu'en ont tirés les architectes de la

renaissance, notamment dans cette salle de la farnésine où Raphaël a retracé, sur des fonds d'un admirable bleu, les épisodes de la légende de Pyché (fig.) (Gromort).

Figure 2.283 : Fig 180 Voûte en arc de cloître

Figure 2.284 : Fig 181 Loge de farnésine, à Rome, d'après Letarouilly.

John B., Ward Perkins, « [Architecture Romaine](#) », Berger-Levrault, p. 286.

Schéma montrant une voûte en berceau de briques « dressées », époque romaine tardive et byzantine.

Le principe de la voûte permet de transmettre les poussées à des ouvrages continus.

John B., Ward Perkins, « [Architecture Romaine](#) », Berger-Levrault, p. 286.

Exemple de voûte en berceau de briques « dressées » : soubassement de la basilique à Aspendos (Pamphylie).

Hans Erich Kubach, « [Architecture Romane](#) », Berger-Levrault, p. 96.

Exemple de voûte d'arêtes : crypte de la cathédrale de Gerace.

Hans Erich Kubach, « [Architecture Romane](#) », édition Gallimard/Electra, p. 54

Exemple de voûte en arc de cloître : Vue intérieure de la cathédrale de Spire.

La voûte en arc de cloître permet de recouvrir un volume à base carrée par le croisement de 2 demi cylindres.

Hans Erich Kubach, "[Architecture romane](#)", p.92 Cathédrale de Soest: vue intérieure.

Dieter Kimpel et Robert Suckale, « [L'architecture gothique en France 1130-1270](#) », édition Flammarion, p.293, 99, 176.

Exemples de voûtes à remplissage : Eglise abbatiale Notre-Dame (Mouzon) ; vaisseau central, vue vers l'est.

Dans une voûte à remplissage, les arcs sont disposés parallèlement ou en convergence et transmettent les efforts en des points précis. Les vides sont couverts par des éléments voûtés.

Saint-Loup-de-Naud, église priorale: vaisseau central, vue vers l'est.

Mantes, collégiale royale: Voûtes de la partie occidentale du vaisseau central.

J.M Rouquette, "[Provence Romane 1](#)", collection zodiaque, p.131

Vue intérieur des voûtes de la chapelle Sainte Croix à Montmajour.

Référence bibliographique:

John B., Ward Perkins, "[Architecture Romaine](#)", Berger-Levrault, p.286

Hans Erich Kubach, "[Architecture Romane](#)", Berger-Levrault, p.96

Hans Erich Kubach, "[Architecture Romane](#)", édition Gallimard/ Electra, p.54, 92

J.M Rouquette, "[Provence Romane 1](#)", collection Zodiaque, P.131

Dieter Kimpel et Robert Suckale, "[L'architecture gothique en France 1130-1270](#)", édition Flammarion, p.293, 99, 176.

3) Coupoles pleines sur murs continus.

a) Définitions et principes.

Coupoles : Voûte de plan circulaire dont l'intrados est théoriquement une concavité de révolution : il est tracé par la rotation d'un arc générateur sur un axe vertical.

Différents types de coupoles :

Le tracé de la COUPOLE OVALE, de plan ovale ou elliptique, de la COUPOLE POLYGONALE, le plan polygonale, et de la COUPOLE A COTES, de plan polylobé, tend vers concavité de révolution. La coupole polygonale a nécessairement un nombre de voûtains supérieur à quatre; c'est un cas particulier de la voûte en

arc-de-cloître-COUPOLE HEXAGONALE. Suivant l'arc générateur, on distingue les COUPOLES PLEIN-CINTRE SURBAISSEE et SURHAUSSEE. La COUPOLE HEMISPHERIQUE est une coupole circulaire en plein-cintre. Théoriquement la coupole peut-être tracée suivant n'importe quel arc surbaissé ou surhaussé, COUPOLE EN LANCETTE, etc. Quant la base de la coupole est marquée par une corniche, la naissance est généralement surélevée de façon que la saillie de la corniche ne cache pas une partie du tracé; COUPOLE SURELEVEE, cf arc surélevé. Quand le plan de la coupole ne monte pas de fond, celle-ci est portée par des trompes, des pendentifs ou des arcs-diaphragmes qui rachètent le carré ou le polygone du plan de base. Quand il y a plusieurs COUPOLES SUPERPOSEES, celles-ci se comptent de bas en haut. Première coupole, deuxième coupole, etc. Le TAMBOUR est le mur de plan circulaire, ovale ou polygonal placé sous une coupole. La CALOTTE est la partie supérieure de la coupole. La coupole à ouverture zénithale ou à oculus n'a pas de calotte; l'oculus peut-être ouvert sous un lanterneau ou sous une seconde coupole. FAUSSE COUPOLE. Ne pas appeler ogives les nervures rayonnantes de la COUPOLE NERVUREE. La coupole est habituellement appareillée en assises de voussoirs concentriques : il n'est donc pas nécessaire de le préciser que pour opposer cette disposition à la COUPOLE EN TAS-DE-CHARGE, qui est assisée mais non clavée, ou à toute autre disposition. Coupole à extradados en couverture. La coupole est souvent couverte par un dôme. La COUPOLETTE est une petite coupole. COUPOLE EN COQUILLES. Coupole appareillée comme la voûte en coquille : elle paraît formée de plusieurs coquilles dont les trompillons sont à la naissance de la coupole. COUPOLE APPAREILLEE SUR LE PLAN D'UNE VOÛTE D'ARETES, SUR LE PLAN DE LA VOÛTE EN ARC-DE-CLOITRE. Coupole dont les voussoirs sont rangés sur le même plan que ceux de la voûte d'arêtes assisée ou la voûte en arc-de-cloître assisée : le dessin des joints alignés est identique en projection horizontale. Il ne s'agit donc que d'un plan d'appareillage.

Figure 2.285 : Fig.182 Coupole hémisphérique assisée.

Figure 2.286 : Fig.183 Coupole hexagonale en plein-cintre assisée.

Figure 2.287 : Fig.184 Coupole hémisphérique appareillée sur le plan d'une voûte en arc-de-cloître.

Figure 2.288 : Fig.185 Coupole en coquilles .A.Trompillon.

Figure 2.289 : Fig.186 Coupole appareillée sur le plan d'une voûte d'arêtes.

Figure 2.290 :

Rien n'empêche d'imaginer des voûtes en arc de cloître couvrant des salles polygonales et même des salles circulaires. Dans ce dernier cas on parle de coupole. Ces deux types de voûtes sont cependant fondamentalement différentes.

Figure 2.291 : Fig.188 : Coupole

Figure 2.292 : Fig.189 : Le Panthéon à Rome.

Les voûtes en arc de cloître (ou en berceau) ont une surface réglée, développable; la voûte sur le plan circulaire n'est pas développable. Les voûtes cylindriques ont des génératrices droites s'appuyant sur des directrices courbes, les voûtes en coupole ont des méridiens (circulaires, elliptiques, paraboliques, etc.) et des parallèles circulaires (ou elliptiques si la salle est elliptique). Ces voûtes travaillent à la compression selon les méridiens et tendent donc à s'ouvrir par le bas malgré tous les chainages mis en place (ex : Sainte-Marie des Fleurs à Florence). Par contre elles offrent l'avantage que chaque assise complète constitue un ensemble équilibré (Panthéon de Rome) : chaque voussoir contrebutant son voisin. D'où la possibilité de réaliser des « oculus » comme au Panthéon (Panthéon de Paris) (A.COOLS).

Figure 2.293 : Fig. 190 : Panthéon romain (détails)

Figure 2.294 :

b) Coupoles doubles

Lorsque les coupoles sont utilisées comme toiture elles réagissent mal au froid et au chaud d'où le grand nombre de cas où la véritable coupole est isolée de l'extérieur par une fausse coupole charpentée.

Figure 2.295 : Fig. 191 : San Giorgio Maggiore à Venise.
Architecte A.PALLADIO

Figure 2.296 : Fig. 192 : Le dôme en maçonnerie creuse - La figure montre le dôme persan réalisé à l'aide mon point de maçonnerie pleine, mais des deux coquers de briques reliées (détail M) par des éperons et des arceaux d'entoiement : on obtient ainsi une voûte tant aussi rigide qu'une pleine, mais plus légère et de moindre poussée. L'exemple vient de la mosquée de Sultaniel. (Choisy, II, p.82).

Coupoles pleines sur plan carré - Les trompes.

La coupole est également employée pour convenir un plan carré. On passe de la base circulaire au plan carré par l'intermédiaire d'un ouvrage en encorbellement appelé « trompe ».

Fig.193 : Voûte sur trompes.

Fig.194 : La trompe est l'élément de raccord, situé dans l'angle, entre le cube et un côté de la coupole octogonale.

Fig.195 : Sarvistan (Perse). Palais voûté. 4 trompes d'angle. Voûte spécifique enserrée entre 4 arceaux de la tête T eux mêmes maintenus par des massifs d'angle formant.....

Pas de contreforts à l'extérieur. De l'intérieur, on peut lire tout de suite l'aspect rassurant d'une voûte et ses conditions d'équilibre. (Choisy)

Fig.196 : Voûte spécifique sur plan carré. On a une sorte de pendentif en trompe. (Le pendentif en triangle spécifique n'apparaît qu'au début de l'arch. byzantine). (Choisy).

Trompes : Nomenclature.

Trompe : Petite voûte formant support sans un ouvrage ou sans un pan de mur en surplomb et permettant un changement de plan à un niveau quelconque de la construction. Toute voûte ayant fonction de support plus que de couverture est une trompe. Cependant le mot trompe désigne plus particulièrement une voûte-support à intrados tracé en fraction de cône dont le sommet, matérialisé par un trompillon, est placé à la rencontre des deux naissances. Il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer la TROMPE CONIQUE aux trompes EN CUL-DE-FOUR, EN DEMI-BERCEAU, etc.; cf les différents types de voûte. La trompe est habituellement construite dans un angle rentrant et sous un pan-coupé. Il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer la TROMPE DANS L'ANGLE aux TROMPES-SUR-LE-PAN ou sur l'ANGLE, c'est-à-dire sous deux pans, sous un OUVRAGE POLYGONAL ou CIRCULAIRE. Parmi les trompes coniques, on distingue des trompes plein-cintre, segmentaire, rampante, etc., suivant le tracé de la direction du cône. Ce tracé est le même que celui de l'arc de front, sauf quand la trompe est biaise. Quand la trompe est sous-le-coin, elle a deux DEMI-ARCS DE FRONT et non tracé ne peut être retrouvé qu'en restituant le plan vertical perpendiculaire à son axe.

Trompe inclinée, cf.incliné.

Trompe appareillée en rouleaux, à versants, appareillée en panache, formée de monolithes en panache, etc.
TROMPE PLATE. Trompe dont l'intrados est une surface à peu près plane et inclinée. TROMPE ONDEE. Trompe dont l'intrados est une surface ondulée. TROMPE EN EVENTAIL. Trompe dont l'intrados dessine un volume de plan convexe évasé de bas en haut selon un galbe concave. Ne pas confondre la trompe en éventail avec le cul-de-lampe qui est conique ou à galbe convexe, ou avec le pendentif, qui est concave en plan. Le plan de l'éventail est généralement un arc de cercle. Il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer l'EVENTAIL CINTRE à l'EVENTAIL POLYGONAL. Cf.Voûte en éventails.

Fig.197 : Trompe plein cintre appareillée en panache. A.Trompillon. B. Arc de front

Fig.198 : Trompe plein cintre suélevée formée de monolithes en panache. A.Trompillon. B. Arc de front.

Fig.199 : Trompe plein cintre appareillée en rouleaux à versants délardés. A.Trompillon. B. Chanfrein.

Fig.200 : A.Trompe en cul-de-four déprimé. a. plafond.

Fig.201 : A.Trompe en demi-berceau

Fig.202 : Trompe plate sur-le-plan et sous un ouvrage circulaire.

Fig.203 : Trompe rampante sous un ouvrage circulaire.

Fig.204 : Trompe plate sous le coin.

Fig.205 : Trompe plate sous un plan concave.

Fig.206 : Trompe inclinée sous un ouvrage circulaire.
(Dans : Vocabulaire de l'archit.).

Fig.207:cathédrale de Coutances(Manche)

A:Trompe plate assisée à ressauts

B:Tambour

C:Voûte d'ogives à seize quartiers rayonnants

Fig.208:Avignon

Cathédrale Notre Dame des Doms.Dessin de Viollet le Duc,op.cit 1859

A:Coupole à extrados en couverture

B:Tambour

C:Trombe inclinée

D:Voûte en berceau incliné appareillée en rouleaux à ressauts

B) Voûtes pleines à poussées localisées.

1) La voûte d'arête.

a) Définitions et principes généraux.

Elle résulte de l'intersection de 2 voûtes en berceau dont les génératrices sont perpendiculaires aux murs de la salle à couvrir. L'intersection est constituée de 4 angles de la salle. Les poussées sont donc localisées et l'intersection des berceaux forme des arêtes saillantes et non rentrantes comme dans le cas des voûtes en arc de cloître. (Cools)

Figure 2.297 : Voûte d'arête

Figure 2.298 : Voûte d'arêtes perspective

Voûte d'arêtes: voûte constituée de quartiers dont les rencontres forment des arêtes saillantes se recoupant à un faite commun: la voûte d'arêtes est donc théoriquement le résultat de la compénétration de plusieurs berceaux de même hauteur dont les lignes de faite restent entières. Cependant l'on ne nomme pas voûte d'arêtes la croisée des voûtes en berceau qui n'est que la rencontre de deux grandes voûtes et non une voûte particulière limitée aux quartiers. La voûte d'arêtes comprend habituellement quatre quartiers. Voûte d'arêtes à grands et petits quartiers alternés. Préciser éventuellement voûte d'arêtes à six quartiers. Suivant le tracé des quartiers, on distingue les voûtes d'arêtes à quartiers plein-cintre, brisés, surbaissés, etc. Ne pas confondre la voûte d'arêtes avec la voûte à lunettes ou avec la voûte en arc de cloître. Cf les différentes manières d'appareiller les arêtes. Dans la voûte d'arêtes à calotte, seules les parties basses de la voûte ont la structure de la voûte d'arêtes, le faite étant une calotte de coupole: les arêtes ne sont marquées qu'à la retombée et disparaissent progressivement en tendant vers la clef

Figure 2.299 : Voûte d'arêtes à grands et petits quartiers alternés / A: Petits quartiers/ B: Grands quartiers

Figure 2.300 : Voûte d'arêtes fourrée / A: arête à voussoirs en v. / B: Fourrure.

Figure 2.301 : Voûte d'arête appareillée (période romaine), tombe de Pergame, sans doute la voûte d'arêtes la plus ancienne. (Choisy, I., p.410)

Figure 2.302 : Salle voûtée de la Basilique de Maxence (achevée sous Constantin). La partie centrale est couverte en voûtes d'arêtes. Celles-ci sont maintenues par des éperons E reliés deux à deux par des voûtes en berceaux V. Le mur de clôture R englobe les contreforts (Choisy, I., p.419)

b) Types

Voûte d'arêtes avec doubleaux.

Quand on désire couvrir une galerie ouverte par une série de voûtes d'arête, il est important de bien se rendre compte de ce qui limite, d'une façon précise, les deux berceaux qui se rencontrent, et de voir s'il y a ou non des doubleaux. Nous allons voir, en effet, qu'un même point en plan peut donner lieu à des interprétations différentes.

Un même point de maçonnerie A (fig.215) peut s'interpréter différemment en coupe suivant que la croisée des deux berceaux retombe aux points a, b ou c: les berceaux considérés ne sont plus les mêmes. Dans le cas de la figure n°1, leur diamètre est af et fg, il y a dans les deux sens renforcement du berceau en M, M', N, N' qui sont des doubleaux. Dans la disposition n°2, les diamètres sont bh et hk; il n'y a renforcement et doubleau qu'en façade: P et P' sont des doubleaux. Enfin, si l'on adopte la disposition n°3, il n'y a, au contraire, de doubleaux que perpendiculairement à la façade, en Q et Q', où ils renforcent le berceau de diamètre cx se poursuit jusqu'au nu vertical de la façade. Il est de la première importance de s'exercer à distinguer ces retombées de

voûtes les unes des autres et de se rendre compte sans hésitation de la silhouette de coupe qui, chaque fois, correspond à la disposition adoptée (Gromort, Int. à la théorie de l'architecture, p.36)

Figure 2.303 : Voûtes d'arêtes. Doubleaux

Figure 2.304 : Voûte d'arêtes avec doubleaux. D'après Gromort p.34

Voûtes d'arêtes à quartiers multiples

Voûte d'arêtes plate. Voûte d'arêtes dont les quartiers ont leur ligne de faite dans le même plan horizontal; le faite des doubleaux et des formerets est donc sensiblement à la hauteur de la clef de voûte.

Voûte d'arêtes bombée. Voûte d'arêtes à quartiers inclinés. Leur ligne de faite montant vers la clef de voûte.

Voûte d'arêtes tournante. Voûte d'arêtes dont l'un des berceaux composants est tournant. Déambulateur couvert de voûtes d'arêtes tournantes. La projection horizontale des arêtes d'une voûte d'arêtes tournante est rectiligne, curviligne ou brisée: arêtes à projection rectiligne, curviligne, brisée.

Voûtes à arêtes.

Voûte à arêtes doubles. Voûte constituée de lunettes séparées les unes des autres par des voûtains triangulaires qui forment avec elles des arêtes doubles convergeant vers les points d'appui. La voûte à arêtes doubles peut donc être considérée comme un cas particulier de voûte d'arêtes dont les berceaux ne se compénétreraient pas. Les arêtes doubles dessinent ensemble une étoile autour de la clef de voûte. Le centre de l'étoile est formé par un plafond dans la voûte à arêtes doubles déprimées; cf. voûte déprimée. Voûte à arêtes doubles à cinq lunettes. Ne pas confondre la voûte à arêtes doubles avec la voûte d'arêtes à petits et grands quartiers alternés.

Voûte à arêtes triples.

Voûte constituée de lunettes séparées par des voûtains, formant ensemble des arêtes triples convergeant vers les points d'appui. Elle est donc constituée comme la voûte à arêtes doubles, mais présente une troisième arête médiane qui passe par la clef de voûte, comme les arêtes de la voûte d'arêtes. ces arêtes médianes divisent la voûte en cantons, chaque canton étant formé d'une lunette et de deux voûtains. Voûte à arêtes triples de huit cantons.

Figure 2.305 : Voûte d'arêtes bombée à six quartiers, A: quartier plein-cintre incliné

Figure 2.306 : Fig.218: Voûte d'arêtes plate, A: quartier plein-cintre droit et horizontale.

Figure 2.307 : Fig.219: Voûte à arêtes doubles déprimées. A B: Lunette droite en plein-cintre / A: Lunette longitudinale / B: Lunette transversale / C: Voûtain / D: Plafond / E: Arrière voussure / a: Doubleau

Figure 2.308 : Fig.220: Voûte à arêtes triples de huit cantons. A: canton formé d'une lunette et de deux voûtains / B: Trombe / a: Lunette brisée / b: Voûtain

La voûte barlongue.

Figure 2.309 : Voûte barlongue

Figure 2.310 :

Il est possible de construire une voûte d'arêtes sur plan rectangulaire à condition de faire varier les courbures des berceaux tout en maintenant une flèche identique.

Les voûtes barlongues introduisent la notion de surfaces de pénétration courbures dont les intersections sont très difficiles à définir. Elles sont de plus rarement heureuses et on leur substitue la combinaison de sections identiques (par exemple deux demi cercles) raccordées par des voûtes en génération conique ou ellipsoïdale (voûte en « bonnet d'évêque »). Les voûtes d'arêtes normales ou barlongues présentent deux avantages: localisation des poussées, éclairage par quatre tympans (Cfr. thermes de Caracalla) (Cools)

La voûte sur pendentifs.**a). Définitions & généralités**

Si l'on désire recourir à une voûte sphérique pour couvrir une salle de plan carré, tout en localisant les charges aux quatre angles, il faut recourir au « pendentif ».

« La voûte en pendentif pure est une voûte sphérique dont le diamètre est la diagonale de la salle carrée à

Figure 2.311 : couvrir » Les plans verticaux qui prolongent les quatre murs de la salle ont des arcs qui reportent les charges dans les angles.

Figure 2.312 : Pendentif, n.m. Trompe dont l'intrados est un triangle sphérique concave. Les angles de ce triangle se nomment cornes.

PENDENTIF:

Trompe dont l'intrados est un triangle sphérique concave. Les angles de ce triangle se nomment cornes. Coupole en pendentifs, sur pendentifs. Le pendentif est généralement assisé: il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer le pendentif assisé au pendentif appareillé en panache et au pendentif appareillé en rouleaux, qui se distingue par le fait que ses joints continus ne sont pas dans des plans obliques ou verticaux. Ne pas confondre le pendentif avec l'écoinçon incurvé qui est un triangle cylindrique, c.à.d qu'il n'est cintré qu'en plan. Quand on oppose le pendentif à la trompe, le mot trompe ne désigne, sauf précision contraire, que la trompe conique.

Figure 2.313 :

Figure 2.314 :

COUPOLE EN PENDENTIFS:

Coupole tracée sur la même courbe que ses pendentifs: elle paraît formée par des pendentifs prolongés jusqu'au faite. Par opposition, l'expression coupole sur pendentifs désigne plus particulièrement une coupole dont les pendentifs ont un tracé distinct. La coupole en pendentifs, habituellement appareillée en assises de voussoirs concentriques, est quelquefois appareillée en chevrons: les rangs de voussoirs se joignent en chevrons sur les lignes réunissant le faite des arcs de front.

L'EVOLUTION DE LA COUPOLE.

Figure 2.315 : Le pendentif, remplaçant la trompe, permet de construire une coupole sur une base circulaire. Cette base est soutenue par des portions de sphère appelées pendentifs et remplaçant les trompes. Cette forme sphérido-triangulaire permet de transférer la poussée sur la pile, plus bas, et non plus sur l'arc lui-même comme le faisait la trompe.

Figure 2.316 :

Figure 2.317 :

Figure 2.318 :

On nomme voûte en pendentifs une coupole en pendentifs très fortement surbaissée qui, de ce fait, n'évoque plus les formes habituelles de la coupole. Cette voûte peut être barlongue ou oblongue. Vaisseau couvert de voûtes en pendentifs barlongues.

b. Types**1. Même hémisphère**

Figure 2.319 :

Figure 2.321 : FIGURE 231 : Le pendentif à Rome est à peine connu. Un essai timide pourtant aux thermes de Caracalla: ça n'est pas un triangle sphérique mais une amorce d'arc de cloître coupée par une arête rentrante.

Figure 2.320 :

Figure 2.322 : FIGURE 232 ; Voûte sphérique de type oriental romain. Coupole appareillée sur plan carré. Le raccord entre le plan carré et la calotte sphérique est obtenu par des pendentifs mais dont les lits sont plans. Un peu exceptionnel dans l'architecture romaine qui est plutôt artificiellement monolithe(concrétion). (Choisy 1 p. 411)

2 Hémisphères différents

Figure 2.323 :

2 Type a :avec tambour intermédiaire.

Figure 2.324 :

Figure 2.325 : Fig.239. Sainte Sophie de Salonique / 4 pendentifs en triangle sphérique. Aux 4 angles, 4 massifs forment éparons(?) contre l'effort diagonal de poussées que transmettent les pendentifs. Des voûtes en berceaux reliaient ces massifs 2 à 2 et couvrent les 4 branches du plan en croix. Tout le système d'équilibre est intérieur. Tout est subordonné à la coupole, motif central. (CHOISY)

Figure 2.326 : Fig.240. (FLEICHER,()).

Figure 2.327 : Fig.241. Eglise athénienne (CHOISY)

Figure 2.328 : Fig.242. Vatopedi (Athos) / 1 coupole centrale les 4 branches de la croix sont des tronçons de berceaux. / Aux 4 angles des pendentifs : butée enserrement de 2 berceaux. (CHOISY)

B. LES VOUTES A REMPLISSAGE ET NERVURE.

Dans ce type de voûtes on recourt à un système d'arcs (en principe funiculaires) supportant des toitures incurvées.

Elles trouvent d'avantage que les voûtes pleines, des applications contemporaines.

Le type le plus simple est celui constitué d'arcs parallèles. Ceux ci peuvent être reliés par des éléments travaillant à la flexion ou par des éléments voûtés travaillant à la compression (Terminal aérien de Saint-Louis Missouri de l'architecte YAMASAKI).

L'architecture à nervures est née historiquement de la voûte en pendentif que l'on s'est efforcé de renforcer par des arcs convergents(diagonaux : c'est la croisée d'ogives perpendiculaires aux murs latéraux c'est l'arc clé) et de l'élégissement des voûtes massives par des caissons déterminant eux aussi des arcs intermédiaires. Il existe un vocabulaire spécifique pour désigner les éléments de ces voûtes.(COOLS,()).

Figure 2.329 : Fig.243./ Dans la voûte romane et gothique on se sert d'armatures de pierre, les nervures, entre lesquelles on maçonna, suivant l'arc voulu, les panneaux ou VOUTAINS. Ces armatures sont les doubleaux et les ogives, puis les liernes et les tiercerons.

Figure 2.330 : Fig.244. **OGIVE.** A ne pas confondre avec l'ARC BRISE comme le font Victor Hugo et le Petit Larousse illustré. L'ogive n'est donc pas l'arc brisé du doubleau (b) mais la nervure soulignant l'arête de l'arc diagonal dont la clef est en (a), cet arc pouvant être aussi bien plein cintre que brisé. L'ogive définit la voûte ogivale improprement dite gothique, elle existe déjà dans l'architecture romane. Son origine est obscure, on parle d'influences arabes, perses ou arméniennes antérieures au IXème siècle. Armature de pierre, elle permet d'élever les très grandes et très hautes voûtes des cathédrales d'Ile-de-France du XII et XIIIème siècles, tout en ouvrant de larges verrières.

Voûte d'ogives

Voûte construite sur le plan d'une voûte d'arêtes, mais sans arête, la rencontre des quartiers étant formée par des branches d'ogive.

La voûte d'ogives a généralement quatre quartiers. Il n'est donc pas nécessaire de le préciser que pour opposer la voûte d'ogives à quatre quartiers à la voûte d'ogives à trois quartiers ou à plus de quatre quartiers. Voûtes d'ogives à huit quartiers rayonnants ; cf. quartier rayonnant. Ne pas confondre la voûte d'ogives à quartiers rayonnants avec la coupole nervurée. La voûte d'ogives couvrant une abside a normalement autant de quartiers rayonnants que l'abside a de pans ou de travées.

Figure 2.331 :

Figure 2.332 : Fig.245.

LIERNE. Nervure allant de la clef d'une croix d'ogive à la clef du doubleau, du forme ou des tiercerons, regardez la figure, est incompréhensible autrement. Ce type de nervure est surtout caractéristique des architectures gothiques anglaise et allemande des XIV et XVème siècles.

Figure 2.333 : Fig.247.

Figure 2.334 : Fig.248.

Notons ici que les arcs doubleaux si fréquents dans l'architecture romane ne peuvent être considérés comme des nervures.

(Leur rôle correspond à la reprise d'une charge localisée autour par exemple à la croisée du transept) ou au désir de plaider un ensemble (faible rendement) quand il n'obéit pas simplement à un souci décoratif.

Il en est de même des « nervures » du gothique flamboyant, purement décoratives. Certains ont contesté leur utilité réelle à l'époque gothique. Constatons quelles sont pour le moins autoportantes.

Figure 2.335 : Fig.249, Fig.250.

Figure 2.336 : Fig.251.

SECTION 2 : SYSTEMES A VECTEURS ACTIFS.

Introduction.

Dans les Systèmes à vecteur actif, les vecteurs (tubes, barres, ou tout autre élément rigide) sont sollicités par des forces principalement longitudinales (traction et/ou compression)

On distinguera

- les treillis plans
- les treillis courbes
- les treillis spatiaux ou tridimensionnels

Le treillis est un assemblage triangulé formant un ensemble stable et complet en lui-même, qui arrangé d'une certaine manière, et sous des charges variables, redirige les efforts à ses extrémités. Il peut donc répartir des charges sur de longues distances, sans supports intermédiaires.

Figure 2.337 : Fig.252 / Concept de base : triangulation. Un cadre à 4 coins n'est qu'en équilibre théorique. Sous charge asymétrique, le système se déforme tant que les coins restent faibles. Une barre diagonale empêche la déformation. Le cadre devient un treillis. Une deuxième diagonale augmente la rigidité, mais n'est pas nécessaire.

Figure 2.338 : Fig.253

Chapitre 1 : Les treillis plans

§1. Origines.

Figure 2.339 Fig.254.: Dans la construction traditionnelle de l'habitat à murs porteurs assez rapprochés (3 à 3.5m), comme la plupart des habitations rurales anciennes de l'Ardenne, la charpente consistait souvent en poutres posées sur les pignons et murs intermédiaires. Elles recevaient les chevrons et le lattage. Ce système à squelette combiné au système massif de murs à la fois porteurs et séparateurs, ne constitue pas un treillis.

Figure 2.340 : Fig.255. Le véritable treillis plan a commencé avec la ferme simple, destiné à remplacer un ou plusieurs murs intermédiaires, afin d'obtenir un espace plus vaste (granges).

Figure 2.341 :

Figure 2.342 :

Beaucoup de maisons actuelles sont construites selon ces deux principes.

Le (a) permettant une utilisation des combles

Le (b) étant plutôt remplacé par un système à fermes légères, de faible section et plus rapprochées les unes des autres. (Gang-Nail)

L'utilisation des combles est dans ce dernier cas, plus aléatoire malgré l'utilisation des fermes à entrain retroussé

§2.Nomenclature des fermes anciennes.

Figure 2.343 : Fig.256. Cette ferme se compose de :

- Entrait de fermette
- Chevron de terrasson
- Panne faitière ou loup
 - Poinçon
- Panne ou verne
 - contre - fiche
 - Arbalétrier
- Panne de brisis
 - Aisselier
- Chevron de brisis
 - Jambe de force
 - Panne sablière
 - Coyau
- Entait pouvant former une poutre du plancher

Figure 2.344 :

Entrait, n.m., pièce maîtresse horizontale d'une ferme, dans laquelle sont assemblés les pieds des arbalétriers, des chevrons-arbalétriers ou des jambes-de-force. Les extrémités des entrails sont quelquefois sculptées en forme de gueules grimaçantes appelées *engoulants*. Entrait engoulé, c'est-à-dire à engoulants. Dans certaines fermes, l'entrait est remplacé par un *tirant* en métal. Le *demi-entrait* est l'entrait d'une demi-ferme ; le *coyer*, le demi-entrait d'une demi-ferme d'arêtier.

Ne pas confondre les entrails avec les poutres du plancher de comble : la poutre est au-dessous du plan des pieds des arbalétriers ou des jambes-de-force et engagée à ses extrémités dans le mur.

Entrait des jambes-de-force. Entrait de fermette. Demi-entrait de croupe, d'appentis.

PETIT-ENTRAIT. Pièce horizontale d'une ferme réunissant les arbalétriers à un niveau supérieur à celui de leur pieds. L'entrait retroussé est un entrait dont l'emplacement a été placé plus haut que le pied des arbalétriers pour dégager l'espace du comble ; de même que l'entrait qu'il remplace, il a pour fonction d'empêcher l'écartement des arbalétriers ; son assemblage avec ceux-ci est donc conçu pour travailler à la traction : de ce fait l'entrait retroussé est souvent moisé. Les fermes avec entrait retroussé n'ont pas d'entrait. Ne pas confondre l'entrait retroussé avec le *faux-entrait*, qui est un petit entrait travaillant à la compression ; son assemblage avec les arbalétriers est habituellement à tenon et mortaise.

Le faux-entrait double généralement un entrait ou un entrait retroussé : cependant certaines fermes, dont l'écartement n'est maintenu que par la résistance des murs-gouttereaux, n'ont que des faux-entrails. Quand il y a plusieurs faux-entrails, on les compte de bas en haut. *Premier faux-entrait*, etc..

BLOCHET, n.m. Petite pièce horizontale d'une ferme occupant la même position que l'entrait au pied de l'arbalétrier, mais arrêtée à quelque distance de celui-ci. Sa longueur est généralement calculée de manière qu'il puisse recevoir également le pied d'une jambette ; lorsqu'il se prolonge au-delà de ce pied, il est dit *saillant*. Les deux blochets d'une ferme constituent une sorte d'entrait interrompu.

Le *blochet d'arêtier* ou *de noue*, au droit d'un arêtier ou d'une noue, est à peu près aligné sur la bissectrice de l'angle de toit, que matérialise l'arêtier ou la noue. *Blochets figurés*

FAÎTAGE, n.m. Pièce maîtresse de charpente posée sous l'arête supérieure d'un toit.

SOUS-FAÎTAGE. Pièce horizontale placée au-dessous d'un faitage dans le même plan vertical.

Quand il y a plusieurs sous-faîtages, ils se comptent de bas en haut. *Premiers sous-faîtages*, etc. Par assimilation avec les voûtes, on nomme **LIERNE** (N.F.)

Le premier sous-faîtage d'une charpente lambrissée en berceau lorsque ce sous-faîtage apparaît à la ligne de faîte de ce berceau.

SABLIÈRE, n.f. Pièce maîtresse horizontale posée sur l'épaisseur d'un mur dans le même plan que celui-ci. Les **SABLIÈRES DE TOIT**. Perpendiculaires aux fermes, portent celles-ci de chaque côté sur le même côté d'un toit. Il peut y avoir plusieurs sablières en cours parallèles. *Sablières jumelées*. Les **SABLIÈRES DE PLANCHER** portent les solives dont les bouts sont assemblés dans la sablière ou posés sur celle-ci. Ne pas confondre les sablières de plancher avec les poutres, qui ne sont pas comprises dans l'épaisseur d'un mur.

PANNE, n.f. Pièce horizontale d'un versant de toit posé sur les arbalétriers et portant les chevrons. La panne est portée directement par l'arbalétrier auquel elle est fixée ou indirectement par un petit corbeau en bois appelé **CHANTIGNOLLE** (n.f.) fixé sur l'arbalétrier. Entre la chantignolle et la panne est quelquefois placé un support supplémentaire, le **TASSEAU**, petit cube assemblé dans l'arbalétrier. Il y a généralement plusieurs cours de panne pour relier les fermes. Certaines charpentes n'ont pas de pannes : cf. charpente à chevrons-portant-fermes.
Ne pas confondre la panne avec la lierne de versant.

ARBALETRIER, n.m. Pièce oblique de la ferme : les deux arbalétriers portent les versants du toit. Ils sont généralement assemblés à leur base dans un entrait et à leur sommet commun dans un poinçon. Le **CHEVRON-ARBALETRIER** est la pièce oblique des charpentes à chevrons-portant-fermes, qui joue à la fois le rôle d'arbalétrier et de chevron. *Arbalétrier courbé*.

SOUS-ARBALETRIER. Pièce doublant l'arbalétrier. Les pieds des sous-arbalétriers portent souvent au même point que ceux des arbalétriers, mais leurs têtes s'assemblent dans le poinçon plus bas que celles des arbalétriers : leur pente est donc moins accentuée.

Le sous-arbalétrier est quelquefois *courbe* : les deux sous-arbalétriers forment alors un arc qu'il ne faut pas confondre avec celui que forment, dans certaines charpentes, jambettes et aisseliers courbes

JAMBE-DE-FORCE, n.f. Sorte de gros arbalétrier bas sur lequel porte une fermette. Les jambes-de-force permettent de dégager un étage dans les combles à surcroît et sous les toits brisés. Dans le premier cas, la naissance des jambes-de-force est en-dessous des corniches : dans le second, les jambes-de-force portent le brisis et les arbalétriers de la fermette, le terrasson. Les pieds des jambes-de-force sont généralement engagés dans le mur, plus rarement réunis par un entrait : ne pas confondre la poutre de plancher, qui est en-dessous du pied des jambes-de-forces, avec *l'entrait des jambes-de-force*. Ne pas confondre l'entrait de fermette avec un entrait retroussé.

Toit mansardé (d'après le nom de l'architecte français , François Mansart 1598 - 1666)

Il s'agit d'un toit à versants , aux pans brisés . La ligne de brisés peut également être pourvue d'une gouttière . Ce toit offre plus d'espace sur les combles qui peuvent être aménagés en chambres .

Ce type de toit se prête particulièrement à l'aménagement d'un grenier . Il se compose d'une partie inférieure et d'une partie supérieure . La partie inférieure est trapézoïdale et doit être consolidée contre le gauchissement au moyen d'aiseliers .

Figure 2.345 : [Toit en croupe](#)

Figure 2.346 :

Contrairement aux autres formes de toits , nous distinguons ici les fermes courantes , les fermes de croupe et les demi - fermes de croupe . Les fermes courantes et les fermes de croupe s'assemblent de la même manière

que dans un toit à deux versants . Les demi - fermes sont encastrees dans les fermes de croupe . Aux angles du bâtiment les sablières se superposent à mi - bois .

Pour permettre à l'arêtier de reposer sur la plus grande surface possible , on ajoute une pièce d'angle .

Les arêtiers supportent les extrémités des pannes . La base des arêtiers repose sur la sablière , tandis que les sommets s'insèrent entre les poinçons de la ferme de croupe et de la demi - ferme de croupe .

Figure 2.347 :

§3. Les fermes modernes

Figure 2.348 :

Figure 2.349 :

I. Caractérisations

Une ferme se caractérise suivant :

- le nombre de divisions des arbalétriers (4 , 6 , 8 divisions)
- La hauteur : - basse 10 à 15 °
 - Moyenne 25 °
 - haute 45 °

Figure 2.350 :

Figure 2.351 :

II. Types de fermes

Les fermes les plus courantes :

Les fermes allemandes

- Noeuds peu nombreux mais complexes à la membrure inférieure .
- A ces noeuds l'assemblage seulement , une barre verticale .
- Des barres obliques dans deux directions .

Les fermes anglaises

- Une barre verticale à chaque noeud.
- Des barres obliques orientées vers le sommet .

Les fermes américaines

- Une barre verticale à chaque noeud
- Des barres obliques détournées du sommet

Les fermes belges

- Des barres sous les pannes , perpendiculairement à la membrure supérieure .
- Des barres obliques orientées vers le sommet

Figure 2.352 :

Figure 2.353 :

III. Les treillis plans de grande portée : poutres en treillis

En architecture le problème des grandes portées est apparu d'abord lié aux toitures. Les solutions requérant l'usage de pièces soumises à la flexion ne devinrent efficaces et rationnelles qu'au XVIII^e avec le développement du calcul vectoriel. Des systèmes comme la ferme Bétancourt (en bois: manège de Moscou 48 m de portée) et surtout la ferme Polonceau permirent des progrès étonnants. C'est toutefois la tour Eiffel qui fit connaître et reconnaître les possibilités extraordinaires de la triangulation.

Celle-ci dans son principe est presque une structure particulière; ses applications sont universelles: fermes de charpente mais aussi poutres en général, poteaux, arcs, portiques, réseaux maillés. Elle connaît aujourd'hui des applications dans le domaine de structures tri-dimensionnelles.

"La triangulation est une disposition particulièrement adaptée au travail de flexion; même les éléments qui travaillent essentiellement en compression comme les poteaux trouvent dans la triangulation la raideur qui évite la flexion partielle ou totale de ses montants verticaux et de tout l'ensemble."

Les ingénieurs du XIX^e siècle partirent de la poutre en I en acier dont ils conservèrent les 2 semelles appelées membrure et substituèrent à l'âme pleine une combinaison d'éléments de faibles sections, assemblées en triangle dont les côtés inclinés entre 45 et 60° présentent des longueurs approximativement égales. Ces éléments alternativement tendus et comprimés expriment plus ou moins fidèlement le réseau des lignes isostatiques de la poutre pleine (les noeuds sont articulés).

La déjà ancienne poutre WARREN est représentative de cette recherche (-e).

La principale difficulté est d'éviter le flambage des pièces comprimées; c'est pourquoi l'ingénieur PRATT imagina une poutre dont à la pleine charge les poteaux verticaux (plus courts) supportaient l'effort de compression (-f). Lorsque une telle poutre n'est pas à pleine charge ou encore sous l'effet de charges mobiles, le comportement est différent; c'est pour cette raison que HOWE préconisa d'inverser le sens des pièces obliques (-g). Cette solution n'est pas non plus absolument satisfaisante et on dut adopter finalement la double diagonale (-h) qui elle offre l'inconvénient majeur de la multiplication des pièces et d'un comportement hyperstatique des noeuds. D'autres solutions sont aujourd'hui en concurrence comme la forme en K (-j). (COOLS, ()).

Figure 2.354 : figure 271. /

Figure 2.355

Un changement de technique peut également bouleverser une conception. Ainsi en fut-il des poutres triangulées lorsque le développement de la construction rivée et surtout celle de la construction soudée contribua à rendre le comportement de noeuds hyperstatiques; la plus grande rigidité qui en résulte étant composée dans bien des cas par une moindre résistance.

Outre les poutres triangulées droites et planes, le principe des systèmes à vecteur actif peut être utilisé sous forme de portiques d'arcs à 2 ou 3 articulations. Les treillis plans, placés en parallèle, donnent par exemple :

Figure 2.356 : 272 / Portiques à 2 articulations

Figure 2.357 : 273 / Portiques à 3 articulations

Figure 2.358 : .274.arcs à 3 articulations

Chapitre 2 : Les treillis courbes.

§1.Principes généraux .

On peut élargir le principe de redistribution des efforts dans les barres, en utilisant des formes à simple ou double courbures .On à alors des treillis courbeset à la limite de cette catégorie, des dômes .

Figure 2.359 : ferme plane

Figure 2.360 : fermes jointes au sommet

Figure 2.361 : treillis à profil polygonal

Figure 2.362 : profil polygonal

Figure 2.363 : profil quasi cylindrique

Figure 2.364 :

Déformations critiques des profils transversaux : figure 276

Figure 2.365 : dislocation latérale des points de base

Figure 2.366 : écrasement du sommet

Figure 2.367 : changement des angles

Figure 2.368 : flexion des barres sup.

D'où renforts transversaux , dont les formes typiques sont :

Figure 2.369 : diaphragme en treillis sur supports

Figure 2.370 : treillis en arc à 2 articulations

*Figure 2.371 : treillis à 3 articulations
avec câble de traction (tirant)*

Figure 2.372 :

§2.Dômes géodésiques et coupoles en treillis.

Si des surfaces ne sont incurvées que d'un côté ,les formes qui en découlent sont cylindriques .

Un pas de plus nous conduit à la double courbure :les ph et les coupoles .

Une coupole en treillis a une grande capacité portante et peut couvrir de vastes espaces avec un poids propre assez faible. Mais le dôme présente un inconvénient inhérent à son essence même.

Les surfaces ne peuvent être exactement semblables .

Le polyèdre régulier le plus grand qui peut s'inscrire dans une sphère ,est le polyèdre à 20 faces .

Ce qui veut dire qu'il est impossible de recouvrir la calotte sphérique d'un réseau plus étroit de polygones semblables régulier .Des hexagones réguliers forment ensemble une surface de la surface plane .Si on veut les faire entrer de force dans la surface de la sphère ,ils doivent être irréguliers et incurvés spatialement.(6) Si on veut définir avec précision les longueurs d'arête ,voilà un fameux problème de géométrie sphérique !

Conclusion : les barres seront de longueur différente

D'où : problèmes de tolérance de fabrication & problèmes de montage

La nature s'efforce en vain de résoudre un problème comparable; elle non plus n'est pas capable de distribuer une surface sphérique en un nombre quelconque de parties égales.

Figure 2.373 : figure 278. Carapace d'un tatou .

Figure 2.374 :

Figure 2.375 : figure 279 **Treillis à simple courbure**
Deux cylindres se joignant au centre en montant
Quatre surfaces cylindriques formant un dôme (voûte en arc de cloître.)
Pénétration de deux cylindres (voûte d'arêtes)

Figure 2.376 : figure 280 **Treillis à double courbure**
trois ph sur plan triangulaire
Quatre ph sur plan carré.
six ph sur plan hexagonal

Treillis sphériques (dômes). Figure 281.

Figure 2.377 : 1. Anneaux sphériques en treillis avec diagonale gauche.

Figure 2.378 : 2. Anneaux sphériques en treillis avec diagonale à 2 directions

Figure 2.379 : 3. Segments sphériques avec barres parallèles.

Figure 2.380 : 4. Bandes sphériques, treillis hexagonal

Figure 282. Trames typiques de dômes géodésiques.

Figure 2.381 : 1. Triangulaire.

Figure 2.382 : 2. Demi-losange.

Figure 2.383 : 3. Losange

Figure 2.384 : 4. Hexagone

Figure 2.385 : Figure 283. Icosaèdre sphérique avec treillis triangulaire.

Figure 2.386 :

CHAPITRE 3 : Treillis spatiaux.

§1 Principes généraux.

Un treillis spatial va diffuser ses charges dans plusieurs directions différentes d'où une plus grande adaptation à différentes sortes de sollicitations de directions très variées.

Une sollicitation excessive à un endroit particulier, est interceptée avec une grande souplesse grâce au concours des barres voisines.

La nature fait mieux que l'homme. Dans un treillis de 1000 barres semblables utilisées à différents endroits, 999 barres ne seront pas entièrement sollicitées. Elles ont donc une dimension excessive. Ce sera toujours le cas pour des treillis spatiaux à éléments préfabriqués.

Figure 2.387 : Figure 284 Dans une structure osseuse par exemple, il n'y a pas deux fibres semblables. Chaque fibre correspond entièrement dans sa forme à la sollicitation qui lui est assignée. (exemple : un fémur)

Figure 2.388 :

Mode d'action d'un ouvrage en treillis spatial.

Le poids du corps (résultante P) appuie sur la console et produit un moment $M = P \times a$.

Mais cette résultante change de position selon la position du corps et la rotation de l'articulation.

Pour chaque sollicitation, il y a un système porteur approprié. D'où un ensemble de systèmes (fibres de forme compliquée, ce qui ne change rien au principe) formant une unité spatiale.

Chaque système pénètre les autres, partage ses fibres avec des systèmes voisins, intercepte leurs charges et donc contribue à augmenter la capacité portante de l'ensemble.

Il va de soi que la construction n'agit pas seulement sur un seul plan, mais qu'elle s'adapte spatialement selon l'allure et la position du corps, aux forces qui s'exercent dans toutes les directions.

La densité de matière est plus grande là où l'ensemble spatial est plus sollicité. (8)

Figure 2.389 : Il s'agit de la généralisation à l'espace de treillis bidimensionnels dont la ferme de charpente ou la poutre treillis sont les exemples connus (projet pour le théâtre de Mannheim, fig. 285)

Figure 2.390 : Deux poutres treillis disposées perpendiculairement se renforcent mutuellement du fait de leur intersection (1). Ce renforcement s'accroît si on dispose de la même manière deux séries de poutres treillis parallèles (2). On peut également imaginer de réaliser une intersection entre deux poutres non plus planes mais spatiales dont l'organisation structurelle est calquée sur l'arrangement des directrices du système réticulé de base. Il s'ensuit un nouveau renforcement (3). Cf. fig.286.

Si, enfin, on généralise ces intersections à la totalité des longueurs des 2 ensembles de poutres parallèles, on réalise une structure offrant une résistance maximum et présentant tous les caractères d'une structure monolithique (4).

Cette structure ne devient tridimensionnelle que si le système qu'elle forme est hyperstatique. Le fémur de l'homme fonctionne comme un treillis spatial hyperstatique.

Figure 2.391 :

Figure 2.392 :

Pour réaliser l'hyperstaticité et la calculer sans trop de difficultés, il convient de réunir les conditions suivantes :

- les nœuds sont parfaitement rigides.
- les barres sont de section et de longueur identiques
- la structure, planaire, multiplanaire ou courbe comporte au moins 2 nappes dont chaque nœud d'une des nappes est réuni à celui de l'autre par des diagonales orientées symétriquement.
- au sein d'une même nappe toutes les figures sont identiques et remplissent parfaitement l'espace (cadre hexagonal des ruches d'abeilles).
- les figures d'une nappe forment avec les diagonales qui l'unissent à l'autre nappe des polyèdres ou des semi-polyèdres réguliers et automorphiques (Modules shapes). Un polyèdre automorphique est un polyèdre qui en phase de croissance ou décroissance organise l'espace identiquement à lui-même.

Les polyèdres automorphiques les plus courants sont :

- 1) le tétraèdre
- 2) l'hexaèdre
- 3) l'octaèdre et le décaèdre.

Ils ont entre autres propriétés, celle d'avoir des conformations nodulaires identiques.

§2. Formes de treillis spatiaux.

Figure 2.393 : Fig.287 type 1 : treillis spatiaux composés de prismes rectangulaires.

Figure 2.394 : Fig.288 type 2 : treillis spatiaux composés de prismes triangulaires.

Figure 2.395 : Fig.289 type 3 : treillis spatiaux composés de pyramides hexagonales.

Figure 2.396 : Fig.290 type 4 : treillis spatiaux composés de tétraèdres et semi-octaèdres.

Figure 2.397 : Fig.291 type 5 : treillis spatiaux composés de tétraèdres et octaèdres.

Figure 2.398 :

Exemples supplémentaires.

1. Treillis sphériques : *La salle hémisphérique du parc scientifique de la Vilette, Paris- 1985.*

La salle de spectacle hémisphérique la « Géode » s'inscrit dans une sphère de 36 mètres de diamètre située au sud du musée dans l'axe du hall d'accueil ; elle a une capacité de 360 spectateurs. Elle s'élève au milieu d'un bassin aménagé sur la terrasse qui surplombe la douve d'environ 6 mètres. La structure géodésique est revêtue d'acier inoxydable poli en miroir. Elle reflète le ciel et l'eau du bassin, elle-même réfléchissante.

Par sa forme symbolique, sa position dans le site et son environnement, la salle hémisphérique forme un grand signal dans le parc. *Source : La Vilette, Département Communication-1985.*

2. Treillis spatiaux : *Aéroport national de Kansai, Japon- Renzo Piano.*

L'aéroport japonais de Kansai est situé sur une île artificielle de 4370 mètres sur 1250 mètres bâtie à 5 kilomètres de la côte dans la baie d'Osaka.

La forme du terminal s'inspire de la dynamique des écoulements d'air. Le caractère du bâtiment découle d'un équilibre entre nature et technologie auquel semble aspirer cette fin de siècle. *Source : L'architecture du futur. Ed. Terrail, Paris 1995. Pages 51->54.*

3. Illustration supplémentaire : *Mannheim Opera House Project, 1953-Mies Van der Rohe.*

Source : Architectural Monographs : Mies Van der Rohe, *Academy Editions / St Martin's Press, New York-1986.*

Section3: Systèmes à volume actif

Introduction

Les poutres, portiques, dalles, hourdis et tout système travaillant à la flexion sont des structures agissant par l'intermédiaire de la masse (ou volume) du matériau ; ce sont des systèmes de structures à volume actif (ou à masse active).

Bien qu'une poutre droite soit un élément linéaire (surtout si sa longueur est importante), les dimensions de sa section ne sont pas négligeables. En effet, pour résister à la flexion, elle doit avoir un certain volume, une certaine massivité.

Et si la différence existe entre les éléments porteurs et les éléments de séparation, nous sommes toujours bien dans un système à ossature (alors que c'est plutôt la masse qui « travaille »).

Les poutres sont les éléments de base des systèmes de structures à volume actif. Grâce à leur capacité de transférer latéralement les charges et de délimiter de façon simple des espaces, les poutres ont été les éléments de structure les plus utilisés dans la construction. On en retrouve dès l'époque préhistorique dans les lieux réservés au culte, avec les *dolmens* (simple poutre de pierre reposant sur deux colonnes portantes), et plus tard sous des formes plus raffinées dans presque toutes les civilisations ayant élevé des monuments (temples grecs, romains...).

Toutes ses formes ne résultent pas du hasard, mais bien d'un même principe constructif : ce sont des formes constructives (ou structurales) déterminées par la nature de la construction.

Chapitre 1 : Systèmes de poutres et colonnes

Figure 2.399 :

Figure 2.400 :

§ 1 : Principes généraux

Le linteau de pierre est assez fragile de par sa faible résistance à la flexion et c'est pourquoi on lui a très tôt préféré le bois, dont les qualités conviennent beaucoup mieux car plus flexible (par contre sa résistance à au cisaillement est faible car le bois a tendance à se fendre).

Figure 2.401 :

Figure 2.402 :

L'utilisation du bois connaît de sérieuses restrictions dans deux domaines :

Les assemblages

Les noeuds dans les systèmes bi-dimensionnels sont obtenus par entaillage des pièces à assembler (c-à-d par leur déforçement). La rigidité demeurant assez aléatoire, on a recouru à des *jambes de force* (pièces obliques raidissant les mailles de structure) ou à des *colombages* (panneaux de maçonnerie bloquant les mailles).

L'assemblage du squelette en bois avec le soubassement en maçonnerie est délicat à cause de l'humidité. La solution japonaise consistant à enfoncer des pieux profondément dans le sol permet une rigidité suffisante mais expose la base au pourrissement.

Les techniques modernes (clouage, collage et assemblage par pièces métalliques) ont permis de résoudre ce problème.

Les sections de bois

Le diamètre limité des *grumes* (troncs d'arbres abattus et ébranchés) ne permet pas le débitage de très grosses sections et surtout de sections de grandes hauteurs.

Le problème est résolu par l'association de deux ou plusieurs pièces de manière telle que la résistance soit non pas additionnée mais multipliée.

Parmi les techniques très nombreuses citons :

- association de deux ou plusieurs pièces avec interposition de coins empêchant tout glissement longitudinal
- réalisation de poutre composée
- association très étroite de petites sections par collage (bois lamellé)

Remarque : lorsque les portées ou les charges sont importantes on remplace le bois par l'acier ou le béton armé

§ 2 : Esthétique des systèmes et nomenclature

I . Le support vertical

Figure 2.403 :

Figure 2.404 :

II. La base

Figure 2.405 :

Figure 2.406 :

Figure 2.407 :

Figure 2.408 :

- **Socle** : Massif surélevant un support.
- **Piédestal** : Socle formé d'une base, d'un dé et d'une corniche et ayant +/- le tiers de la colonne qu'il porte. Sa mouluration varie avec les ordres.
- **Stylobate** : Soubassement portant une colonnade et une ordonnance de pilastres.
- **Base** : pied d'un support verticale, formé habituellement d'un corps de moulures et d'une plinthe. La base peut-être elle-même surélevée par un socle qu'il ne faut pas confondre avec la plinthe.
- **Plinthe** : Assise inférieure carrée, polygonale, etc..., non mouluré. Il existe différents type de bases suivant les différents ordres.
- **Griffe** : Petit élément décoratif sculpté sur les angles de la plinthe.
- **Base Toscane**
- **Base Dorique**
- **Base Ionique**
- **Base Corinthienne**
- **Base Composite**
- **Base Attique**

III. Le Chapiteau

Figure 2.409 :

Figure 2.410 :

Figure 2.411 :

Figure 2.412 :

- **Chapiteau** : Élément formant épanouissement entre le corps de la colonne, du pilier ou du pilastre, et la charge. Le chapiteau est essentiellement formé d'un corps et d'un couronnement.
- **Gorgerin** : Partie de certains chapiteaux placée juste au-dessus de l'astragale, Prolongeant le volume du corps de la colonne ou du pilastre sous l'évasement de l'échine.
- **Echine** : Corps de certains chapiteaux, formé par une grosse moulure convexe ou par un chanfrein.
- **Corbeille** : Corps de certains chapiteaux, formé par un tronc de cône ou de pyramide renversé ou par un volume à galbe concave. La corbeille se distingue de l'échine par son développement en hauteur.
- **Abaque** : Tablette couvrant le corps de certains chapiteaux.
- **Tailloir** : Couronnement du corps de certains chapiteaux, formé par une assise ou ayant sensiblement la hauteur d'une assise.
- **Chapiteau papyriforme**
- **Chapiteau campaniforme**
- **Chapiteau palmiforme**
- **Chapiteau hathorique**
- **Chapiteau protodorique**
- **Chapiteau dorique**
- **Chapiteau toscan**
- **Chapiteau à glyphes**
- **Chapiteau attique**
- **Chapiteau cubique**
- **Chapiteau conique, pyramidal**
- **Chapiteau feuillagé**

IV. Couronnement

Couronnement: n.m. élément décoratif formant le faîte horizontal ou le sommet pyramidé d'une élévation ou d'une partie d'élévation. Certains couronnement sont des ensembles complexes d'éléments qui se couronnent les un les autres. Couronner, couronnement horizontal. Le couronnement pyramidé s'inscrit plus ou moins exactement dans une forme triangulaire ou pyramidale et évoque par ses lignes rampantes le volume d'un toit. Le couronnement couvre toute la longueur et toute la surface de la partie qu'il couronne: aussi ne faut-il pas attribuer à l'ensemble de se qui n'est que le couronnement d'une partie. Le couronnement n'étant qu'un élément décoratif, il ne faut pas appeler couronnement le pignon, le toit, la flèche et d'une manière générale toute les partie haute appartenant à la structure. Ne pas confondre le couronnement avec l'amortissement. Cependant, les couronnement pyramidé très développé en hauteur peuvent aussi servir d'amortissement.

Entablement: n.m. couronnement horizontal d'une ordonnance d'architecture comprennent une corniche qui couronne elle même une frise, une architrave, éventuellement l'une et l'autre. A ses éléments s'ajoutent quelquefois un bandeau d'attique, bandeau nu ou orné régnant au dessus de la corniche sur la longueur de la frise. Ne pas confondre le bandeau d'attique avec l'attique. Exceptionnellement, l'entablement est rampant, cintré, en plein-cintre, en archivolte, comme la

corniche. L'entablement à ressauts est formé d'avancées et de renforcements. Dans certaines arcades, la retombée des arcs est séparée du chapiteau par un morceau d'entablement qui est un surhaussement du support, profilé comme un entablement classique, et non un couronnement. La frise de l'entablement est parfois pressée de baies: l'entablement forme alors un niveau de l'élévation.

Corniche: n.f. couronnement allongé d'un entablement, d'un piédestal, d'une élévation, d'un morceau d'élévation..., Formés de moulures en surplomb les une sur les autres. La corniche est habituellement horizontale; il est nécessaire de le préciser que pour opposer la corniche horizontale à la corniche rampante ou aux corniches tracées en arc, corniches cintrées, en plein-cintre, segmentaires, chantournées, en mitre,....Ne pas confondre les corniches en arc avec le fronton qui a une base horizontale. La corniche comprends souvent une cimaise, un larmier, des modillons. Quand elle porte un chéneau, sa cimaise est habituellement munie de gargouilles. La corniche rampante a des modillons rampants c'est à dire perpendiculaires à son tracé, ou, plus rarement des modillons d'aplomb, c'est à dire verticaux. Le soffite au-dessous de la corniche est quelquefois orné. Le glacis est un dessus de corniche incliné. Ne pas appeler corniche les larmiers isolés et les cordons régnant sur une façade: à la différence de la corniche, le cordon n'est pas formé de moulures en surplomb les une sur les autres.

Entablement Toscan: Entablement de l'ordre toscan formé théoriquement d'une architrave sans fasce généralement couronnée par un cavet et un réglet; d'une frise nue; d'une corniche à larmier et cimaise, le larmier étant généralement souligné par un talon.

Entablement Dorique: Entablement de l'ordre dorique formé théoriquement d'une architrave à deux fascas couronnée d'un réglet, d'une frise avec alternance de métopes et de triglyphes; d'une corniche à larmier et cimaise, le larmier étant généralement porté par des mutules et souligné par un corps de moulures. Le soffite de la corniche est souvent orné de petit cônes ou gouttes. Dans le dorique grec l'architrave n'a pas de fasce.

Entablement Ionique: Entablement de l'ordre ionique formé théoriquement d'une architrave à 3 fascas couronnées par un talon et un réglet; d'une frise; d'une corniche à larmier et cimaise, le larmier étant souligné par des denticules entre 2 corps de moulures l'architrave du ionique grec n'a parfois que deux fascas. Entablement ionique à 2 fascas et frise bombée.

Entablement Corinthien: formé théoriquement d'une architrave à 3 fascas séparées l'une de l'autre par une baguette ou par des olives couronnées d'un quart de rond ou d'un talon et d'un réglet; d'une frise; d'une corniche à larmier et cimaise, le larmier étant porté par une rangée de modillon à volutes, elle même généralement soulignée par des denticules entre 2 corps de moulures.

Entablement Composite: Entablement de l'ordre composite formé théoriquement d'une architrave à 2 fascas couronnées d'un corps de moulure; d'une frise, généralement raccordée avec l'architrave par un adoucissement en cavé renversé d'une corniche à larmier et cimaise, le larmier étant souligné par des denticules entre 2 corps de moulures.

V. Perte des formes structurales pures

V. Perte des formes structurales libres

Dans des formes tardives classiques, l'exagération des dimensions fait remplacer la poutre de pierre par un revêtement appliqué sur un support d'acier, la forme expressive de la forme pure, authentique se perd brutalement. Elle fait place à des exigences monumentales. La forme structurale est morte.

§ 2 : Systèmes en béton armé

I. Principes généraux

Les efforts de flexion et de cisaillement sont traduits en termes de moments fléchissants et d'efforts tranchants. Ils varient pour une même charge en fonction de la section, de l'élément et de la rigidité des appuis. C'est ainsi que la résistance d'une poutre est considérablement augmentée lorsqu'elle est rendue solitaire des appuis.

Le moment fléchissant d'une poutre M posée sur appui est ramenée dans une poutre encastrée aux $2/3$ de M . Les poutres continues possédant des qualités de résistance et de rigidité comparables à celle des poutres encastrées.

Cette rigidité présente cependant un inconvénient en raison notamment de la plus grande difficulté d'adaptation à la dilatation thermique, aux effets de retraits, etc. La tension interne produite par ces phénomènes est intense et modifie sa capacité de résistance.

Il convient alors de multiplier les joints de dilatation et de contraction ce qui est l'encontre du caractère fondamentale de la structure avec squelette: l'hyperstaticité. Les structures massives sont généralement isostatiques; les systèmes ossature modernes sont hyperstatiques, c'est à dire que le travail de chaque élément de la structure par celui des pièces voisines est en continuité directe. Le risque de rupture est ainsi éloigné mais les conséquences d'une mauvaise conception sont généralement plus lourdes. Le système hyperstatique permet une économie de section et de matière considérable par rapport au système isostatique. tous les systèmes à squelette ne sont pas hyperstatiques, en fait la plupart des systèmes antérieurs au XIX siècle ne l'étaient pas du tout ou très partiellement; à l'inverse d'autres structures sont hyperstatiques; ainsi par exemple les treillis tridimensionnels, ect.

Mécanisme de flexion

Mécanisme de flexion: La somme des forces extérieures entraîne une rotation des extrémités libres qui entraînent une courbure de l'axe longitudinal: flexion, le moment de rotation des forces extérieures produit une déformation de flexion des fibres supérieures et des fibres inférieures, seule la fibre neutre ne change pas.

Puisque les directions de la charge et de la réaction ne se rencontrent pas, les forces extérieures provoquent un glissement des forces verticales, d'où cisaillement vertical.

La déformation due à la flexion entraîne une contraction des couches supérieures et une extension des couches inférieures. Les fibres horizontales tendent à glisser les une par rapport aux autres, d'où: cisaillement horizontal.

Le moment de rotation de forces extérieures produit une déformation de flexion jusqu'à un point où le moment de réaction interne est devenu assez grand pour compenser le moment externe.

Figure 2.413 :

Figure 2.414 :

Distribution générale des contraintes

Distribution générale des contraintes: Avec un porte à faux de $1/3L$, on a des M_f de signes contraires, mais d'une valeur égale à la moitié de ce que l'on obtient dans les 2 autres cas. D'où économie d'armature et de matière.

Poutre discontinue: la déformation de flexion dans une travée n'influence pas l'autre travée.

Poutre continue: la charge sur une travée est répartie sur la longueur totale de la poutre. La valeur absolue de M_f de chaque signe est inférieure dans ce cas.

Le maximum de flexion se produit dans des travées externes, où la rotation des extrémités sur les

En généralisant le principe du portique on obtient des portiques multiples offrant les même avantages de continuité. Il est important de remarquer que le système en portique présente toujours des déplacements latéraux qui n'existent pas dans le cas de poutres simples appuyées ou continues.

L'avantage essentiel de la continuité dans un ensemble de portiques est qu'il suffit en principe de contreventer ou renforcer les travées extrêmes.

Un portique simple à travée unique avec une poutre reliant de façon rigide la base des piliers est un élément structural fermé capable de supporter des charges horizontales et verticales ; combiné en plusieurs travées, il permet d'être utilisé comme une poutre treillis et de franchir de grande distances : c'est la poutre Vierendeel (Fig. 361).

Dans les structures de grandes hauteurs on fait appel à des portiques à étages multiples ; chaque portique se comporte comme un portique à une seule travée avec l'avantage supplémentaire que les poutres horizontales servent à la fois d'éléments de support des charges pour un étage et de tirant pour le portique supérieur.

Les charges horizontales croissent avec la hauteur et la largeur du bâtiment. Il y a donc intérêt à augmenter le nombre de travées afin de réduire plus économiquement ces charges. La structure prend alors l'aspect d'un réseau constitué d'une quantité de mailles rectangulaires (Fig. 362). De tels portiques disposés parallèlement sont généralement reliés entre eux par des poutres horizontales et forment une structure en forme de cage de nature tridimensionnelle, réagissant aux charges horizontales provenant de toutes les directions.

Telles quelles, elles constituent un des principaux moyens de réaliser des constructions de grand auteur et sont spécialement adaptés aux programmes architecturaux prévoyant des charges réparties sur des plans horizontaux superposés (immeubles de bureaux, logements collectifs, etc.).

La possibilité ; largement utilisée, de dissocier la structure portante du revêtement (verre et acier) a conduit à un « style » original mais déconcertant et dans une certaine mesure accablant.

Le répertoire des formes est réduit : surfaces à angles droits délimitant des constructions en forme de cubes ou de parallélépipèdes, très rarement de cylindres ; l'absence d'ornements sur les façades, la taille importante des édifices, leur ordonnancement généralement rigide, rendent la solution difficile sur le plan esthétique.(A.Cools)
Fig.361-362 : déformations de portiques à étages multiples sous l'effort de forces horizontales et sous l'effet d'une charge concentrée.

§2 Compréhension intuitive.

Passage de la poutre au portique.

Figure 2.421 : Fig. 363 : les réactions horizontales aux bases du portique empêchent la rotation des angles et réduit la déformation du cadre exactement de la même façon que si on avait une charge ponctuelle à chaque extrémité de la poutre en porte à faux.

Figure 2.422 :

Mécanisme de résistance aux forces latérales.

Figure 2.423 : Fig. 364 : contrairement à la simple poutre qui à besoin de supports rigides renforcés à la base pour répondre au moment de rotation dans le portique rigide la déformation due à une force latérale engendre des réactions verticales qui produisent une rotation inverse.

Figure 2.424 :

Relation entre raideur du portique et la distribution des contraintes.

Figure 2.425 : Fig. 365 Grâce à la continuité des angles, les déformations du portique peuvent être différentes selon les raideurs relatives données aux montants et à la traverse. La distribution des contraintes se fait également en fonction de la forme donnée aux éléments du portique.

Figure 2.426 :

§3. Types de formes.

1. Combinaison horizontale et verticale de portiques simples.
2. Formes renversées ou doublées.

Figure 2.427 : Fig.366 : 2 articulations.

Figure 2.428 : Fig. 367 : 3 articulations.

Figure 2.429 : Combinées avec cadres en T

Figure 2.430 :

Systèmes verticaux de portiques renversés et/ou doublés. (Exemples).

Figure 2.431 : Fig. 368 : système à 2 articulations.

Figure 2.432 : Fig. 369 : système à 2 articulations et porte à faux double.

Figure 2.433 : Fig. 370 : système à 3 articulations et porte à faux double.

Figure 2.434 : 2 articulations, 1 porte à faux et demi-cadre.

Figure 2.435 : Système à 2 articulations et porte à faux simple.

Figure 2.436 : Système 3 articulations et porte à faux double.

Compositions de portiques articulés.

Figure 2.437 : Fig. 371 : (Engel, ()).Portique à 2 articulations sur un portique à porte à faux double à 2 articulations.

Figure 2.438 : Portique à 2 articulations sur un portique renversé à 2 articulations et supports.

Figure 2.439 : Portique à 2 articulation sur un portique à porte à faux double à 3 articulations.

Figure 2.440 :

Caissons à Panneaux Multiples.

1. Principes.

Fig. 372 : caisson à 3 panneaux, supports aux extrémités.

Déformation de flexion sous charge verticale et sous charge latérale.

A cause des déformations de flexion, les extrémités des colonnes sont en rotation, mais en sens opposé : d'où résistance grâce aux colonnes (donc de panneaux).

Réduction de matière là où les contraintes sont minimales.

Renforcement des coins.

Suivant la distribution du cisaillement dans une poutre, les colonnes sont soumises à des flexions très différentes. On peut en tenir compte, soit en faisant varier l'épaisseur des colonnes, soit en utilisant les mêmes sections de colonnes mais en faisant varier la largeur des panneaux.

Fig. 373 : Panneaux égaux, sections plus fortes près des supports.

Sections égales des colonnes, panneaux plus étroits près des supports.

2. Exemple de structures avec systèmes de poutres-caissons.

Fig. 374 (Engel ()) : Structure à longue portée, simple étage, 2 supports.

Structure à longue portée, 2 supports et porte à faux double.

Structure à longue portée, simple étage, support central.

Structure à étages multiples, 1 niveau par caisson.

Assemblage de caissons à simple étage mais supportant chacun 2 niveaux.

Chapitre 3 : Grilles de poutres et dalles.

§1 : Principes des grilles.

Comparaison entre Système de poutres parallèles et Systèmes de grilles.

Figure 2.441 : Fig.375, Dans le système de poutres parallèles, seule la poutre chargée se déformera. Les autres poutres ne participent pas au mécanisme de résistance à la simple charge.

Figure 2.442 : Fig.376, Par l'insertion d'une poutre transversale, perpendiculaire aux poutres parallèles, une part de la charge est transmise aux poutres non directement chargées. Donc, le système participe dans son entièreté au mécanisme de résistance à la simple charge. On dira qu'il y a dispersion biaxiale de la charge.

Figure 2.443 : Fig.377, 2 poutres perpendiculaires, de même longueur reçoivent chacune une moitié de la charge totale. Donc, la réaction à chaque support sera $\frac{1}{4}$ de la charge.

Figure 2.444 : Fig.378, Si les deux poutres de même section ont des longueurs différentes, la poutre raidisseuse (ainsi appelée pcq. la plus courte) recevra en fait le plus de charge. Si le rapport des côtés est de $\frac{1}{2}$, la raideur des poutres devra avoir le rapport $\frac{1}{8}$, sinon la plus courte reçoit les $\frac{8}{9}$ de la charge totale.

Figure 2.445 : Fig.379 :Poutre de bordure. Si les deux ensembles de poutres ont plus ou moins la même raideur, une charge continue est dispersée par mécanisme de flexion suivant les deux directions. En cas de charge concentrée, l'interpénétration mutuelle des poutres ne provoque pas une déformation directe. La résistance à la flexion est accrue.

Figure 2.446 : Fig.380, Dans le cas de plans où un côté est nettement plus long que l'autre, les poutres longitudinales montrent une perte d'efficacité, vu leur faible raideur. En vue de permettre une répartition équitable de la charge, suivant les deux directions, les poutres longues doivent être raidies en conséquence. Par exemple si le rapport des côtés est de $\frac{1}{2}$, les poutres longues devront être 8 fois plus raides.

Figure 2.447 : Fig.381, Le grillage en diagonale évite l'inconvénient des poutres de longueur différente.

Figure 2.448 : Fig.382, Poutres perpendiculaires (grille carrée). Poutres obliques (grille en diagonale).

Figure 2.449 : Fig.383, grille carrée et diagonale.

Figure 2.450 :

§2 : Les dalles.

Résistance d'une dalle sur appuis simple.

Figure 2.451 : Résistance à la flexion : Par l'action combinée de la traction, compression, cisaillement (mécanisme de flexion), la charge est transmise aux supports, comme pour une poutre.

Figure 2.452 : Résistance au cisaillement : Par cisaillement vertical, la charge est transmise d'une bande déformée à la bande voisine. Par ce mécanisme, la charge est répartie sur la dalle entière même dans le cas d'une charge concentrée.

Figure 2.453 : Résistance à la torsion : La déformation de flexion d'une bande suivant un axe entraîne la torsion d'une bande suivant l'autre axe. Dans une dalle sur appuis simple, 50% de la charge sera transmise aux supports par résistance à la torsion.

Figure 2.454 : Fig.385 Puisque dans les coins de la dalle, les deux supports se rencontrent à chaque angle droit, les zones angulaires montrent une rigidité plus grande. Par conséquent, les bandes diagonales de la dalle n'effectuent pas une rotation libre de leurs extrémités. C'est un peu comme si on avait deux poutres encastrées, avec changement de courbure aux extrémités.

SECTION 4 : Systèmes à Surface active.

Introduction

Les surfaces, ayant une forme finie et déterminée, constituent des ESPACES. Une surface est un élément de détermination de l'espace, sans doute le plus intelligible et le plus effectif.

Si une surface remplit, en plus de son rôle de détermination spatiale, un rôle de support de charges, alors elle devient SURFACE STRUCTURALE. Elle est à la fois structure portante et séparation d'espace.

Les surfaces structurales peuvent être composées pour former des mécanismes qui redirigent les forces : ce sont les systèmes de structures à surface active. Ce sont des structures agissant principalement suivant la continuité des éléments suivant 2 axes et développant surtout une résistance :

à la compression.

à la traction.

au cisaillement.

Ces systèmes à surface active sont en même temps l'enveloppe de l'espace intérieur et le volume extérieur de la construction. Ils déterminent donc la forme et l'espace.

En ce sens, ils représentent plutôt des systèmes massifs que des systèmes à squelette, encore que dans le béton armé, les armatures redirigent une grande part des efforts.

Dans ces systèmes, la forme structurale est moins arbitraire que jamais, l'espace, et la forme détermine l'espace, sont soumises à la discipline des lois de statique. Toute déviation par rapport à la forme exacte aura une conséquence sur l'économie du projet ou sur son fonctionnement global.

Pour les surfaces planes, 2 mécanismes différents de résistance (ou la combinaison des deux) :

-Mécanisme des dalles, si la force est dirigée perpendiculairement à la surface.

-Mécanisme des plaques, si la force est dirigée parallèlement à la surface.

En inclinant la surface dans la direction de la force agissante, soit en pliant ou en incurvant, il est possible de concilier l'efficacité horizontale (couvrir un espace) et l'efficacité verticale (Résister aux forces de gravité).

Chapitre 1 Surfaces plissées Prismatiques.

§1 : Généralités.

La conception des formes plissées est relativement nouvelle. Il n'en existe pas dans l'histoire de la construction.

Parmi les objets d'usage courant, on trouve le paravent, le soufflet d'accordéon ! Le monde végétal nous offre bien des feuilles renforcées par un pli, et pas grand chose d'autre.

Expérience :

Une feuille de papier placée entre 2 objets n'a pas de rigidité. Elle se courbe presque sans opposer de résistance.

Si on la plie parallèlement au sens de la portée, elle devient rigide. Elle peut alors porter 100 fois son propre poids. Si on augmente la charge jusqu'au point de rupture, à ce moment les plis s'ouvrent.

Pour empêcher ce phénomène, il suffit d'appliquer sur le fronton un tympan qui renforce le dispositif. Le papier plissé supporte alors une nouvelle augmentation de la charge.

Il naît ainsi ce qu'on appelle des «plaques de fixation » sans lesquelles un ouvrage plissé ne peut exister. Les tympan frontaux renforcent les plis et augmentent la capacité portante.

C'est ce qui se passe dans la construction à une plus grande échelle. On suppose dans tous les cas un matériau rigide càd résistant à la fois à la traction et à la compression (B.A., acier, Alu) (10).

Figure 2.455 : Fig.386

Figure 2.456 :

Figure 2.457 : Ex :Fig.387 Plus la hauteur du pliage est grande, plus la portance est grande. (11)

	Portance	Portée
Plaque ép . 10 cm	1	4m
H= 50 cm	25	11.7m
H= 100 cm	100	18.5m
H= 200 cm	400	29.5m

Figure 2.458 :

§2 : Principes du Mécanisme (12)

1. Dans le sens transversal :

Figure 2.459 : Perpendiculairement au sens de la travée, les surfaces entre les plis (arêtes et creux) travaillent comme des dalles inclinées.

L'espace défini par les creux et les arêtes, en suivant le trajet de leur support en haut et en bas.

Les supports étant constitués par l'action de raidissement du pli supérieur à l'arête et du pli inférieur au creux.

Figure 2.460 : Chaque pli agit comme un support rigide.

Fig.388

2. Dans le sens longitudinal :

Figure 2.461 : Fig.389, Les plis interceptent comme des supports, les charges extérieures. Ils les détournent, réduites en composantes vers les surfaces obliques suivant leur inclinaison. Ces surfaces se comportent comme des poutres inclinées qui s'appuient l'une sur l'autre, et transmettent les charges aux véritables supports.

Figure 2.462 : Dans le cas d'une inclinaison trop faible, l'ouvrage plissé perd son efficacité. La capacité portante augmente avec la pente, c'est-à-dire avec l'inclinaison et la hauteur d'inclinaison. Fig.390, Par rapport à une dalle horizontale, la structure plissée n'a pas besoin de poutre d'appui puisque chaque surface agit comme une poutre dans la direction longitudinale.

3. Mode d'action des tympans :

Figure 2.463 : L'ouverture des plis a pour conséquence la perte de la hauteur et ainsi son effondrement. Le tympan maintient la cohésion de l'ouvrage, et agit contre les déformations critiques du profil, qui sont : -écartement des bases, -voilement de 2 surfaces, -voilement d'une surface

Figure 2.464 : Fig.391, Tympan en dessous

Figure 2.465 : Tympan au-dessus

Figure 2.466 :

A condition d'observer les trois fonctions ci-avant, il est possible de créer toutes sortes de formes dérivées. Le plus important demeure toujours le plissement. Les relations qui existent entre sa hauteur et son inclinaison par rapport à sa largeur déterminent la rigidité et la résistance.

Figure 2.467 : Fig.392, La proportion des plis, les tympans (ou diaphragmes) et le cas échéant, la rive frontale, sont les éléments qui expriment l'action portante de l'ouvrage plissé. La forme judicieuse qui lui sera donnée, conduira à une FORME STRUCTURALE.

Figure 2.468 :

Rive Frontale :

Raidissement contre les déformations critiques des bords libres.

Figure 2.469 : Fig.393, Une déformation peut survenir sur le bord laissé libre des surfaces extrêmes. (composante perpendiculaire au plan des efforts)

Figure 2.470 : Pour les fortes pentes : Fig.394, On prendra des rives frontales de la forme soit perpendiculaire aux plans, soit horizontales. Pour les faibles pentes : Perpendiculaire aux plans, verticales ou encore, la rive peut être intégrée à la surface. (fig.393)

Formes de base des Systemes Plissés.

Figure 2.471 : Fig.395, -Plis Parallèles
-Plis à contre sens
-Plis en éventail
-Pieds dans le plan des arêtes
-Formation d'angles rigides. Dans ce cas, l'ouvrage devient une construction en portique.
Pieds du portique dans le plans des creux.

Figure 2.472 :

§3. Types de Formes.

I. Surfaces avec plis à contresens (même hauteur de pli, même hauteur par rapport au soleil).

Figure 2.473 : Fig.396 (ENGEL) Les plis supérieurs sont dans un même plan (arêtes).

Figure 2.474 : Chaque pli est à la fois arête et creux.

Figure 2.475 : Contre profil au centre.

Figure 2.476 :

Manquent pages 177 à 202 de la version originale scannée

Table des matières

Volume 1 (1 ^è ANNÉE)	3
Livre 1A : Architecture, espace et perception	3
Première partie : Totalité architecturale et grille d'analyse	3
Deuxième partie : Introduction à l'espace architectural	3
Troisième partie : Espace, perception et détermination	3
Livre 1B : Variables et géométrie de l'espace	3
Livre 1C : Composition et paramètres du contexte	3
Volume 2 (2 ^è ANNÉE)	4
Livre 2A : Théories contemporaines	4
Livre 2B : Formes et structure.	4
Volume 3 : Composition et critères de base (3 ^è ANNÉE)	4
Volume 4 : Composition et critères d'organisation (4 ^è ANNÉE)	4
Avant - Propos	5
Introduction	6
Définitions	6
1. Système constructif et ordre technique	6
2. Formes structurales	6
Vérité ou mensonge ?	8
1. Technique exaltée ou les « formes structurales »	10
2. Technique imagée	11
3. Falsification	11
4. Technique soumise	12
5. Technique domestiquée	13
Comment choisir ?	15
Remarque sur les formes issues directement de la technique	15
Rappel de principes élémentaires	17
PREMIERE PARTIE : Première classification des Systèmes constructifs	18
Section 1 : Les systèmes massifs	19
Définitions	19
Caractères engendrés par les systèmes massifs	19
L'élément principal du système massif est le MUR.	20
Section 2: Les système à ossature	25
Section 3: Les systèmes mixtes.	27
DEUXIEME PARTIE : Classification selon la transmission des efforts	28
1) Systèmes où la forme est active (principalement):	29
2) Systèmes (de structures) agissant principalement par compression et traction des éléments:	29
3) Systèmes (de structures) agissant principalement par la masse et la continuité du matériau (bulk-active structure systems):	29
4) Systèmes (de structures) à surface active:	29
5) Systèmes (de structures) verticaux:	29
Section 1: Les Systèmes à FORME ACTIVE	30
Chapitre 1: Les systèmes de câbles ou les structure suspendues	30
CHAPITRE 2 : Les tentes ou les membranes suspendues	35
§1. Principes généraux et définitions	35
§2. Etude des formes selon les supports.	36
A. supports extérieurs comprimés simples PH	36
B. Systèmes avec supports intérieurs	36
1. Poteaux	36

2. Supports en arcs.	37
C. Systèmes avec supports extérieurs, poteaux et ancrages alternés	37
D. Systèmes directs de suspension haute	37
E. Systèmes indirects	37
Chapitre 3 : Systèmes pneumatiques	38
§ 1. DEFINITION (d'après A. COOLS ())	38
§ 2. CLASSIFICATION	38
1°) Structures à membranes simples :	38
2°) Structure à membranes doubles ou multiples :	39
3°) Structure boudins sous haute pression :	39
§ 3. PRINCIPES CONSTRUCTIFS	39
§4. GEOMETRIE DES FORMES PNEUMATIQUES	40
Types de bases :	40
§ 5. APPLICATIONS	40
CHAPITRE 4 : Systèmes d'arcs, coupoles et voûtes	43
§ 1. Principes généraux	43
A. Pour le câble de suspension, nous étions partis du câble de levage.	43
B. Formes géométriques :	43
C. Systèmes de reprises des réactions horizontales	44
D. Types de systèmes d'arcs modernes	44
§ 2. Evolution historique des arcs et des voûtes	44
Du linteau monolithe à la voûte appareillée	44
A. La structure monolithique	44
B. La structure à encorbellement	46
C. La structure en arcs et en voûte véritables	47
§ 3. NOMENCLATURE DE L'ARC-APPAREILLE	49
A. DEFINITIONS	49
B. La plupart des arcs (et des voûtes) ont besoin pour être édifiés d'un ouvrage en charpente : le cintre () (A. COOLS ()).	51
Variétés d'après le tracé et la forme.	51
TYPOLOGIE DES VOUTES D'APRES LA FORME ET LA STRUCTURE.	52
I Définitions	52
II Premières classifications	52
B. - Voûtes à remplissage :	52
III. Classification des voûtes et des coupoles	53
A. Voûtes pleines transmettant leurs pousses a des ouvrages continus.	53
1) La voûte cylindrique ou en berceau.	53
b) Types de voûtes pleines.	53
La voûte en arc de cloître	55
a) Définition et formation.	55
b) Différences avec la voûte d'arêtes.(voir plus loin)	55
c) Voûte en arc de cloître avec pénétration	56
d) Voûte en cul-de-four (fig.)	56
3) Coupoles pleines sur murs continus.	57
a) Définitions et principes.	57
b) Coupoles doubles	59
Coupoles pleines sur plan carré - Les trompes.	59
Trompes : Nomenclature.	59
B)Voûtes pleines à poussées localisées.	61
1)La voûte d'arête.	61
a)Définitions et principes généraux.	61
b)Types	61
a). Définitions & généralités	63
b. Types	63
1. Même hémisphère	63
2 Hémisphères différents	64
2 Type a :avec tambour intermédiaire.	64
B. LES VOUTES A REMPLISSAGE ET NERVURE.	64

SECTION 2 : SYSTEMES A VECTEURS ACTIFS.	66
Introduction.	66
Chapitre 1 :Les treillis plans	66
§1. Origines.	66
§2.Nomenclature des fermes anciennes.	67
§3. Les fermes modernes	69
I. Caractérisations	69
II. Types de fermes	69
III. Les treillis plans de grande portée : poutres en treillis	70
Chapitre 2 : Les treillis courbes.	72
§1.Principes généraux .	72
§2.Dômes géodésiques et coupôles en treillis.	72
CHAPITRE 3 : Treillis spatiaux.	74
§1 Principes généraux.	74
Mode d'action d'un ouvrage en treillis spatial.	74
§2. Formes de treillis spatiaux.	75
Exemples supplémentaires.	75
Section3: Systèmes à volume actif	77
Introduction	77
Chapitre 1 : Systèmes de poutres et colonnes	77
§ 1 : Principes généraux	77
§ 2 : Esthétique des systèmes et nomenclature	78
I . Le support vertical	78
II. La base	78
III. Le Chapiteau	79
IV. Couronnement	79
V. Perte des formes structurales pures	80
§ 2 : Systèmes en béton armé	81
I. Principes généraux	81
Mécanisme de flexion	81
Distribution générale des contraintes	81
Comparaison entre poutres discontinues et continues	82
II. Poutres sur 5 travées, formes possibles	82
Chapitre 2 : les portiques.	82
§1. Principes généraux.	82
§2 Compréhension intuitive.	83
§3. Types de formes.	84
Compositions de portiques articulés.	84
Caissons à Panneaux Multiples.	85
Chapitre 3 : Grilles de poutres et dalles.	86
§1 : Principes des grilles.	86
§2 : Les dalles.	86
Résistance d'une dalle sur appuis simple.	86
SECTION 4 : Systèmes à Surface active.	88
Introduction	89
Chapitre 1 Surfaces plissées Prismatiques.	89
§1 : Généralités.	89
Expérience :	89
§2 : Principes du Mécanisme (12)	90
1.Dans le sens transversal :	90
2.Dans le sens longitudinal :	90
3.Mode d'action des tympans :	90
Rive Frontale :	91
Formes de base des Systèmes Plissés.	91
§3. Types de Formes.	91
I. Surfaces avec plis à contresens (même hauteur de pli, même hauteur par rapport au soleil).	91
Table des matières	92
BIBLIOGRAPHIE des systèmes constructifs	Erreur ! Signet non défini.

Table des figures

Figure 2.1 : gothique 1 ^è période	7
Figure 2.2 : gothique flamboyant	7
Figure 2.3 : Types de colonnes « structurales », d'après SIEGEL, p. 9	7
Figure 2.4 : La technicité est établie ici comme un principe de l'art ; Joseph Paxton, Crystal Palace, exposition universelle de Londres, 1850.	10
Figure 2.5 : « Les révolutions des méthodes de construction ont provoqué des stimulations auxquelles l'esprit sensible et réellement créatif se devait de réagir » (K. Wachsmann). Pier Luigi Nervi, palais des expositions, Turin. 1947/1949.	10
Figure 2.7 :	11
Figure 2.8 : « Les romains, gens sensés, pourvus de nos grandes pièces de fer, auraient laissé de côté les formes empruntées aux Grecs pour en adopter de nouvelles » (Viollet-le-Duc) R.Bofill, édicule à St-Quentin-en-Yvelines,1982.	12
Figure 2.9 : Entre charpente et voûte : comme pour le baroque, la volonté plastique et spatiale de Jörn Utzon prime sur la réalité constructive. Eglise de Bagsvaerd, Copenhague, 1973-1976.	12
Figure 2.10 : « c'est a se demander si l'architecture gothique est de pierre ou si elle est ce qu'elle est malgré la pierre ». (F.L.wWight). cathédrale de Rouen.	13
Figure 2.11 : « L'ornement ne signifie pas seulement une surface qualifiée par l'imagination de l'homme mais l'imagination donnant un dessin à la structure..., articuler et rendre visible la structure matérielle de l'édifice comme sont articulées la structure des arbres ou celle du lys des champs ..., ce sont ces qualités qui distinguent l'architecture essentielle du simple acte de construction ». (F.Lwright) .Perret ,Notre Dame du Raincy ,1923.	13
Figure 2.12 : Une symbiose qui cherche la perfection dans l'équilibre entre le désir plastique de l'homme et « le désir » physique propre aux matériaux. Mario Botta, maison à Ligornetto 1978.	14
Figure 2.13 : charges dues aux efforts externes : surcharges des équipements, des gens, etc., efforts du vent, la neige, statique ou dynamique :	17
Figure 2.14 :	17
Figure 2.15 : (tensions) engendrés dans le matériau par les forces extérieures : $\sigma = F/S$ (Force / Section)	17
Figure 2.16 :	17
Figure 2.17 : : Un système doit être en équilibre	17
Figure 2.18 : rotule d'un pont	17
Figure 2.19 : : Le système est dit « stable » si une force x peut être appliquée en tout point .	17
Figure 2.20 :	17
Figure 2.21 : Schéma de système massif	18
Figure 2.22 : Schéma de système à ossature :	18
Figure 2.23 : Le Panthéon à Rome	19
Figure 2.24 : constructions purement massives: murs en maçonnerie et dalles	19
Figure 2.25 : : igloo	19
Figure 2.26 :	19
Figure 2.27 : : Les éléments de fermeture correspondant à des masses plus ou moins isotropes sont soit construits par addition d'éléments secondaires: en briques (fig. 8) ; Ziggourat d'Our (2000 av. JC). D'après Lloyd dans "The art in the ancient Near East"	19
Figure 2.28 : ou en pierre (fig. 9), « Borie » en pierre, Gordes, Vaucluse, France	19
Figure 2.29 : : soit coulés en masse monolithique plus ou moins homogène (fig. 10) Case obus, Cameroun	19
Figure 2.30 :	19
Figure 2.31 :	19
Figure 2.32 : .	19
Figure 2.33 : chapelle de Ronchamp (arch. Le Corbusier)	20
Figure 2.34 : par rapport au système à ossature, les perforations sont " relativement " accidentelles.	20
fig. 2.35 théâtre de Marcellus d'après GROMORT, (), f. 13	20
fig. 2.36 nef gothique: impression visuelle du système technique	20
Figure 2.37 :	20
Figure 2.38 :	20
Figure 2.39 : APPAREIL CYCLOPEEN: composé de mégalithes, des mycéniens, celto-ligures, cas.	21

Figure 2.40 : APPAREIL ISODOME ou hellénique, à joints vifs, des murs de naos du Parthénon. Opus quadratum, composé de pierres régulières, romain, roman,... le plus extraordinaire exemple d'appareil classique est peut-être en France celui de la voûte ondulées du vestibule de l'Hôtel de Ville d'Arles.	21
Figure 2.41 : Types de joints : plein, creux, en canal, baillant, en onglet, creux chanfreiné.	21
Figure 2.42 :	21
Figure 2.43 : Types d'appareillage: - régulier: - éléments identiques	21
Figure 2.44 :	21
Figure 2.45 : assises parallèles, joints verticaux se correspondant un tas sur deux. éléments plus ou moins semblables	21
Figure 2.46 : réglage horizontal mais éléments différents	21
Figure 2.47 :	21
Figure 2.48 :	21
Figure 2.49 : L'appareil POLYGONAL (" opus incertum " des Romains) dit à présent " mosaïque " était, à l'origine un cyclopéen plus petit. Pour la maçonnerie à sec il est fonctionnel (avec des matériaux de formes " quelconques ") parce que le coincement entre des plans inclinés favorise la stabilité davantage que le rachat des irrégularités d'assises sensiblement horizontales par des éléments de petites dimensions tendant à produire un effet de " bascule ".	22
Figure 2.50 : Les Grecs l'ont réalisé de maîtresse façon à Delphes (fig. 25) avec des pierres de grande dimension. Mais elles sont partiellement taillées pour réduire l'épaisseur des joints secs.	22
Cet ajustage et la grandeur absolue de pierres produisent un effet de stabilité extraordinaire.	22
Figure 2.51 : opus incertum grand format	22
Figure 2.52 : exemple d'appareil irrégulier avec un effet statique	22
Figure 2.53 : fig. 28: types de bossages. Types de bossages : bossage à chanfrein, bossage en table, bossage fouillé, bossage adouci, bossage à cavet, bossage en boule, bossage rustique, bossage troué, bossage à grand chanfrein, bossage à chanfrein, bossage continu en table, bossage continu adouci, bossage à onglet, bossage en pointe de diamant, bossage à grand chanfrein.	22
Figure 2.54 :	22
Figure 2.55 :	23
Figure 2.56 : (fig. 30).	23
Figure 2.57 : fig. 30: palais Farnèse à Rome (Guadet " Eléments et théorie de l'architecture).	23
Figure 2.58 :	23
Figure 2.59 : Vocabulaire de la façade01 (Crunelle)	24
Figure 2.60 : Vocabulaire de la façade01 (Crunelle)	24
Figure 2.61 : Vocabulaire de la façade03 (Crunelle)	24
Figure 2.62 : Vocabulaire de la façade01 (Crunelle)	24
Figure 2.63 : réseau d'isostatiques dans un mur percé d'une baie cintrée.	24
Figure 2.64 : compression, traction	24
Figure 2.65 : : système à poutres et colonnes.	25
Figure 2.66 : 32Kenya, Iles Marquises, Hutte Khoisan, Afrique du Sud, Guyane	25
Figure 2.67 : le plan de bois ou maisons à colombages	25
Figure 2.68 :	25
Figure 2.69 : : exemples de maisons à ossature en bois (). Ci-dessus, le camouflage du système à squelette au moyen d'un parement extérieur en briques, qui donnera l'illusion d'une construction massive.	25
Figure 2.70 : système Nord-Américain; système partiellement préfabriqué. ()Système ouvert de construction : en effet, ce ne sont pas les éléments de la construction (murs portants, planchers, fermes de toiture, parois, etc.) qui sont standardisés, mais bien les composants de ces éléments, notamment le bois et les panneaux qui tous deux sont utilisés en dimensions standardisées.	25
Figure 2.71 : la trame secondaire	25
Figure 2.72 :	25
Figure 2.73 : la trame secondaire (fig. 40)	25
Figure 2.74 :	25
Figure 2.75 : ossature " englobante "; d'après H. Engel, ()	26
Figure 2.76 : ossature cellulaire " formée de modules polyédriques; d'après H. Engel	26
Figure 2.77 : système constructif de type " mixte " avec système massif de fermeture et couverture à ossature.	27
Figure 2.78 :	27
Figure 2.79 : structures planes,)	29
Figure 2.80 : fermes, treillis courbes, treillis spatiaux tridimensionnels	29
Figure 2.81 : exemples: poutres et portiques	29
Figure 2.82 : dalles, hourdis	29

Figure 2.83 : structures plissées -prismatiques, pyramidales	29
Figure 2.84 : coques à simple courbure, -coques à 2 directions, hyperboloïdes, paraboles hyperboliques, etc...	29
Figure 2.85 : Fig. 46. buildings à noyau central (cantilever),	29
Figure 2.86 :	29
Figure 2.87 : Fig. 47 traction / compression, mais même principe: un seul type de contrainte pour la transmission des charges	30
Figure 2.88 : . Fig. 48	30
Figure 2.89 : Fig. 49. La redirection des forces, pour le câble, suivant l'importance de la force horizontale:	30
Figure 2.90 : en prenant l'image miroir, on a le tout en équilibre.	30
Figure 2.91 : La forme du câble suit la direction des contraintes.(à forme active	30
Figure 2.92 : Plus on sépare les ponts de suspension plus les contraintes ds le câble / et plus les réactions horizontales augmentent	30
Figure 2.93 : poids mort : chaînette	31
Figure 2.94 charge uniformément répartie : parabole	31
Figure 2.95 : charge continue et remontant sur les bords: ellipse	31
Figure 2.96 : charge concentrée au centre ;; triangle	31
Figure 2.97 : charges symétrique: polygone	31
Figure 2.98 :	31
Figure 2.99 : stabilisation par le poids de la toiture	31
Figure 2.100 :	31
Figure 2.101 : Position du câble de stabilisation par rapport au câble de suspension	31
Figure 2.102 :	31
Figure 2.103 : Mécanisme de stabilisation pour chaque cas.	32
Figure 2.104 :	32
Figure 2.105 : . Position supérieure du câble de stabilisation	32
Figure 2.106 : Position inférieure	32
Figure 2.107 : Position mixte	32
Figure 2.108 : Système parallèle plan.	32
Figure 2.109 : Systèmes pour retenir des câbles parallèles en suspension	32
Figure 2.110 :	32
Figure 2.111 : figure 59	32
Figure 2.112 : Fig 60 (Siegel)	32
Figure 2.113 : Une charge ponctuelle entraîne une déformation importante au câble sollicité.	33
Figure 2.114 : Un câble de stabilisation transversale tend le câble de suspension et résiste mieux à la déformation.	33
Figure 2.115 : L'augmentation du nombre de stabilisations transversales renforce la résistance aux charges ponctuelles.	33
Figure 2.116 : Finalement tous les câbles participent au mécanisme de la résistance à la déformation dûe aux charges ponctuelles.	33
On obtient un <u>réseau de câbles à courbures opposées.</u>	33
Figure 2.117 :	33
Figure 2.118 :	33
Figure 2.119 :	33
Figure 2.120 :	33
Figure 2.121 :	33
Figure 2.122 :	33
Figure 2.123 :	33
Figure 2.124 :	33
Figure 2.125 :	34
Figure 2.126 :	34
Figure 2.127 : Pavillon des ETATS-UNIS.(f66)	34
Figure 2.128 : Bruxelles : Exposition universelle de 1958: (f67)	34
Figure 2.129 : figure 69 Types de stabilisation transversale dans les systèmes précontraints.	34
Figure 2.130 : figure 70 Types de contours par réseaux de câbles à courbures opposées.	34
Figure 2.131 : Une grande épine dorsale en béton armé est tendue comme arc de compression dans la direction longitudinale de la construction sur environ 85m. Un ensemble de câbles est suspendu transversalement à celle-ci selon une forme géométrique non déterminée à l'avance. Ces câbles d'abord relâchés de ce toit, sont retenus vers le vas par un groupe de câbles longitudinaux posés par-dessus. La tension est ainsi déplacée, du moins celle qui est déterminante pour la rigidité de la surface du toit. Il en résulte une surface doublement incurvée en sens opposés. Toutes ces courbures ne sont pas rigidement géométriques, mais ne sont pas arbitraires non plus. Elles sont "naturelles", inhérentes au système constructif.	34

Figure 2.132 : La section transversale montre la correspondance entre la forme technique et la fonction spatiale	34
Figure 2.133 : La forme étrange est née, d'une manière très logique à partir d'un principe constructif. Même si un jugement d'origine purement esthétique pouvait être défavorable, il faut se dire qu'une fois le système constructif choisi, il devait en être ainsi et pas autrement.	34
Figure 2.134 :	34
Figure 2.135 : Ex: Tente pour la piste de danse des Florales de Cologne de Frei Otto	35
Figure 2.136 :	35
Figure 2.137 : figure 72 figure 73	35
Figure 2.138 : figure 74	35
Figure 2.139 : figure 75	35
Figure 2.140 : figure 76 Abris tendus utilisés par les bergers, nomades d'Afrique du Nord.	35
Figure 2.141 : figure 77	36
Figure 2.142 : figure 78	36
Figure 2.143 : figure 79	36
Figure 2.144 :	36
Figure 2.145 : figure 80 Deux poteaux extérieurs, un câble transversal	36
Figure 2.146 : figure 81 Quatre poteaux extérieurs, un câble	36
Figure 2.147 : Quatre poteaux extérieurs, deux câbles transversaux	36
Figure 2.148 : figure 83 Six poteaux extérieurs, deux câbles transversaux	36
Figure 2.149 : figure 84 Système à un point haut	36
Figure 2.150 : figure 85 Par similitude avec un réseau de câble radial conique, l'augmentation du nombre de câbles périphériques augmente la résistance du réseau contre les déformations dues aux charges asymétriques.	36
La concentration de câbles méridiens et circulaires conduit à un système de tente (membrane)	36
A cause de la concentration des efforts ausommet il faut arrondir la surface de contact.	36
Figure 2.151 : figure 85 Système à plusieurs poteaux intérieurs de hauteur égales	36
Figure 2.152 : figure 86 Système à plusieurs poteaux intérieurs avec ancrage additionnel au centre	36
Figure 2.153 : figure 87 Système à plusieurs poteaux intérieurs de hauteur inégale	36
Figure 2.154 :	36
Figure 2.155 : figure 88 Systèmes avec un arc intérieur	37
Figure 2.156 : figure 89 Systèmes avec deux arcs intérieurs	37
Figure 2.157 : figure 90 Disposition parallèle des points fixes	37
Figure 2.158 : figure 91 Disposition radiale des points fixes	37
Figure 2.159 : figure 92 Supports extérieurs (poteaux) disposition périphérique des points hauts. Un arc intérieur disposition axiale des points hauts. 1 ou 2 poteaux intérieurs disposition centrale du ou des points hauts. Supports extérieurs disposition centrale du point haut	37
Figure 2.160 :	37
Figure 2.161 : figure 93 Supports extérieurs avec câbles de levage. Supports extérieurs avec câble de suspension et supports de points hauts. Supports intérieurs avec câble de suspension et supports de points hauts. Supports extérieurs disposition périphérique de points hauts avec câble de suspension et support pour un point haut central additionnel	37
Figure 2.162 : Figure 94	37
1. Dépression	38
1.11	38
1.12	38
1.13	38
1.14	38
2. Surpression	38
1.21	38
1.22	38
1.23	38
1.24	38
Figure 2.163 : Figure 95 : Membranes simples	39
Figure 2.164 : Figure 96 : Structures à membranes doubles ou multiples	39
1. Dépression	39
2.11	39
2.12	39
2.13	39
2.14	39
2. Surpression	39

2.21	39
2.22	39
2.23	39
2.24	39
Figure 2.165 : Figure 97 : Structures boudins sous haute pression	39
Figure 2.166 :	39
1. Droites	39
3.11	39
3.12	39
2. Courbes	39
3.21	39
3.22	39
Figure 2.167 : L'air sous-pression dans l'espace fermé (étanche) supporte l'enveloppe	39
Figure 2.168 :	39
Figure 2.169 : Système à double membrane	40
Figure 2.170 :	40
Figure 2.171 : Figure 100 : Système à pression intérieure avec transfert des efforts principaux par l'intermédiaire de câbles	40
Figure 2.172 : Figure 101 (ENGEL ()) : Exemples de systèmes avec transfert ; - des efforts principaux par câbles p/β ou par des membranes fixées au sol β	40
Figure 2.173 : Figure 102 (ENGEL ()) : En fermant la membrane non seulement sur son pourtour mais aussi en position centrale, le rayon de courbure est réduit, et donc les contraintes dans la membrane. De cette façon, la couverture et la fermeture de larges espaces est possible, sans augmenter la hauteur de la construction.	40
Figure 2.174 : Figure 103 (ENGEL ()) : Types de systèmes pneumatiques, avec ancrage intérieur (à un ou plusieurs ancrages ponctuels ou ancrage linéaire).	40
Figure 2.175 : Figure 104 : "Chambres à air" géantes, enduites d'un élastomère synthétique connu sous le nom d'"Hypalon". Schéma d'un élément de l'ossature pneumatique du pavillon Fuji. A. Enduit élastique d'"Hypalon" formant enveloppe de pneumatique. B. Tissu élastique formant la chambre à air. C. Compresseur d'air. D. Dispositif manométrique commandant le fonctionnement du compresseur. E. Une entrée du pavillon.	41
Figure 2.176 : Figure 105 : Pavillon Fuji - Osaka 1970 (Tech. et travaux).	41
Figure 2.177 : Figure 106 : Structures à membrane portante. Projet de Gernot MINKE et des étudiants de l'Université Technique de Hanovre. Construction à double membrane avec mat central et poutre périphérique polygonale ; stabilisée par dépression. (Stand d'exposition à Hanovre 1970)	41
Figure 2.178 : Figure 107 : Salle des sports à Hanovre 1970 Surface au sol : 700 m ² ; construction à double membrane soutenue par un arc travaillant à la compression et comportant une stabilisation supplémentaire par 2 séries de câbles : rayonnant à l'extérieur ; parallèles à l'intérieur.	41
Figure 2.179 : Figure 108 : Magasin de meubles à Saint Genis Pouilly -Architecte Chanéac. Structure à simple membrane.	42
Figure 2.180 : Cette construction devait être implantée sur un terrain de 6.500 m ² . La solution la plus économique, permettant néanmoins de doter le magasin d'une image architecturale particulière, a été trouvée dans l'utilisation de coupoles gonflables, en polyester armé de P.V.C., de tailles et de couleurs standardisées. Une grande coupole blanche de 32 m de \varnothing et de 9 m de hauteur maximale abrite le hall de vente. Une petite coupole blanche de 15 m de \varnothing et de 5 m de hauteur maximale sert de réserve et de bureau. Elle est munie d'un tunnel spécial d'entrée pour les livraisons. Un sas jaune de 8 m de long et de 4 m de large établit la liaison entre les deux coupoles.	42
Figure 2.181 :	43
Figure 2.182 :	43
Figure 2.183 : Figure 109 En combinant un arc et un câble, on supprime toute réaction horizontale puisque les composantes horizontales des deux ont des directions opposées et donc s'annulent.	43
Figure 2.184 : Figure 110	43
Figure 2.185 : Figure 111	43
Sous poids propre : chaînette, Sous charge continue uniforme : parabole, Sous charge continue accrue sur les bords : ellipse Une charge ponctuelle, triangle Deux charges ponctuelles trapèze	
ieurs charges ponctuelles polygone	Plus 43
Figure 2.186 : Figure 112 Sous l'influence de variations thermiques p d'où contractions ou allongement de l'arc	43
tassements de fondations	43
charges horizontales (vent)	43
charges verticales additionnelles	43
la courbure de l'arc peut se modifier et s'éloigner de la courbe "funiculaire".	43
Dès ce moment, il y a des contraintes de flexion.	43
	99

Figure 2.187 : Figure 113 1) en créant une articulation au sommet d'où un arc à 3 articulations On n'a plus de flexion Å dans la partie supérieure.	43
Figure 2.188 : Figure 114. 2) en lui donnant une forme capable de résister aux moments fléchissants soit pour un arc à 2 articulations à 3 articulations	43
Figure 2.189 Figure 115 fondation inclinée, arcs continus, butée, tirant	44
Figure 2.190 :	44
Figure 2.191 : Figure 116 (ENGEL ()), à deux articulations, fondations inclinées, toiture courbe : courbe & chaînette ($h = 1/5 L$)	44
Figure 2.192 : à deux articulations, butées, courbe : parabole, toiture horizontale suspendue, $f = 1/3 L$, à deux articulations butées	44
Figure 2.193 : toiture horizontale posée, courbe : parabole, $b = 1/5 L$	44
Figure 2.194 : à trois articulations, parabole $h = 1/5 L$	44
Figure 2.195 : à trois articulations, parabole, butées, $h = 1/5L$	44
Figure 2.196 :	44
Figure 2.197 Figure 117 : Structure monolithique / Détail de la couverture de la salle hypostyle de Karnak	45
Figure 2.198 : Figure 118 : Linteau : L'architecture du temple est dite "une architecture de linteau". Bloc de pierre porté par les colonnes et supportant l'entablement, son poids et sa dimension déterminent toute la proportion de l'édifice, notamment la section des colonnes. Les linteaux du temple égyptien peuvent atteindre 100 tonnes. on appelle aussi linteau le bloc de pierre qui surmonte une porte ou une fenêtre	45
Figure 2.199 : Linteau , n.m. (fig. 140). Bloc de pierre, pièce de bois ou de métal couvrant une baie et présentant un soffite ¹⁴⁴ . Il reçoit la charge ¹⁰⁷ des parties au-dessus de la baie et la reporte sur les deux points d'appui. Le linteau est généralement formé d'un seul morceau; cependant, on peut parler de LINTEAUX EN DEUX MORCEAUX, notamment dans le cas des baies jumelées dont les linteaux, du fait de la continuité du décor, paraissent ne former qu'un seul couvrement. Le linteau a, par définition, un soffite; il ne faut pas confondre l'arc monolithe ¹²⁶ avec le LINTEAU DECORE D'UN ARC (fig. 8) ou avec le LINTEAU DELARDE EN ARC (fig. 7) : dans les deux cas, il ne s'agit que d'un décor du parement ou d'un délardement ¹⁴⁵ de l'arête, qui ne suppriment pas le tracé rectiligne du soffite. Par extension, on donne le nom de linteau à tout bloc qui, sans être en couvrement de baie, porte une charge entre deux points d'appui, pourvu que ce bloc ait un soffite et soit en pierre (fig. 137) : dans cette fonction, le même organe se nomme poutre ou solive ⁷² quand il est en bois. Linteau en bâtière ¹⁴³ . Linteau sur coussinets ¹²² . Linteaux superposés.	45
Figure 2.200 : (°) Fig. 119.	45
Plate-bande (126)	45
A. Plate-bande en bâtière (143)	45
B. Plate-bande à extradados en escalier (148)	45
C. Plate-bande à claveaux passe un-sur-deux (148)	45
D. Plate-bande à clef passante pendante (148)	45
E. Plate-bande à soffite (144)	45
F. Plate-bande à crossettes en escalier (148)	45
a. Agrafe (60)	45
b. Tirant (124)	45
c. Lit brisé (148)	45
d. Tenon (148)	45
e. Clavette (149)	45
f. Cavet d'adoucissement (172)	45
Figure 2.201 : Plate-bande , n.f. (fig. 9 à 14). Organe clavé ¹⁴⁸ porté par deux points d'appui et présentant un soffite ¹⁴⁴ . La plate-bande ne se distingue du linteau que par le fait qu'elle est appareillée et de l'arc que par le fait qu'elle est rectiligne. Quand elle contient un chaînage ⁶⁰ , elle travaille comme un linteau et ne transmet aux points d'appui que des charges ¹⁰⁷ ; quand elle n'en contient pas, elle travaille comme un arc et transmet aux points d'appui des forces-obliques ¹⁰⁷ . Plate-bande à tirant (fig. 9); cf. tirant ¹²⁴ . Plate-bande à agrafes (fig. 9); cf. agrafe ⁶⁰ . Certaines plates-bandes ont plusieurs rangs de claveaux superposés. Plate-bande à deux rangs de claveaux (fig. 5). Certaines plates-bandes ne sont formées que d'une clef et de deux grands sommiers (fig. 10). Plate-bande en bâtière ¹⁴³ , à extradados en escalier ¹⁴⁸ , à crossettes en escalier ¹⁴⁸ , sur coussinets ¹²² . La PLATE-BANDE RENVERSEE, utilisée dans les fondations, n'est pas sur points d'appui et son soffite est tourné vers le haut.	45
Figure 2.202 : (10) Fig. 120.	45
Plate-bande formée d'une clef et deux sommiers (126)	45
A. Clef (149)	45
B. Sommier (149)	45
a. Tête de claveau (149)	45
b. Lit en coupe (148)	45

c. Tenon interne (148)	45
(¹¹) Fig. 121	45
Plate-bande en fausse-coupe (148)	45
a. Fausse-coupe (148)	45
b. Lit en coupe (148)	45
c. Tête (149)	45
Figure 2.203 : Architrave , n.f. (fig. 5). Linteau ¹²⁶ ou plate-bande ¹²⁴ portant sur des supports verticaux ¹⁰⁹ . L'ARCHITRAVE MONOLITHE (fig. 6) est un linteau ; l'ARCHITRAVE CLAVEE (fig. 5), une plate-bande. Architrave d'une colonnade. L'architrave est généralement comprise dans un entablement dont elle constitue la partie inférieure : sa modénature est alors en rapport avec l'ordre ³¹ . Aussi, par extension, l'architrave peut n'être qu'une partie, sans fonction de couverture, comprise dans un entablement décoratif. Architrave à deux faces (fig. 36), cf. fasce ¹⁸² .	46
Figure 2.204 : ARCHITRAVE TRANSVERSALE (fig. 103). Architrave posée dans la largeur d'une galerie, d'un portique, d'un vaisseau, sur deux supports qui sont respectivement compris dans l'un des deux alignements de supports limitant cette galerie, ce portique, ce vaisseau. (Vocab. d'Archit. ()).	46
Figure 2.205 Fig. 123. Plate- bande appareillée à crossettes	46
Figure 2.206 : Fig. 122. Plate-bande à lits curvilignes	46
Figure 2.207 : Figure 124 : sauf sur le premier corridor d'accès et sur le caveau au fond du puits central où des dalles posées de champ suffisaient, la largeur à couvrir ne dépassant guère 1,50m. Quand les couloirs et les caveaux étaient ménagés dans la maçonnerie elle-même, un plafond fait de simples dalles horizontales était hors de question, sauf sur de très faibles portées (couloirs), SNEFROU donna à ses caveaux des <u>voûtes en encorbellement extrêmement hautes, où chaque dalle ne dépasse que de quelques centimètres la précédente, répartissant ainsi la charge sur un grand nombre d'éléments.</u>	46
Figure 2.208 Figure 125 :	46
: Dans CHEOPS, les pierres les plus dures n'auraient pu résister aux pressions considérables appliquées aux plafonds des couloirs (montant étroits) au cœur de la pyramide.	46
Solution : 1) l'encorbellement à fausse voûte	46
2) chambres de décharge (2 dalles en V renversé) (voir plus loin)	46
Figure 2.209 : Figure 126 , Les voûtes à poussées, les voûtes par claveaux sont étrangères à l'architecture de l'Inde : lorsqu'il s'agit de couvrir un espace carré, on procède (fig. 126 B) par empilage de dalles disposées en pan coupé et s'avançant progressivement sur le vide.	46
Figure 2.210 : Figure 127	46
Pour le cas d'une galerie, on procède par assises en encorbellement successif et l'on a soin (fig. 126 A et 127 M) de donner à chaque pierre une queue suffisante pour annuler toute tendance à la bascule (CHOISY ()).	46
Les autres grands bâtisseurs de pyramides, les Mayas, adoptèrent une solution voisine, imaginant d'associer parement de pierre et maçonnerie de béton. ()	46
Figure 2.211 : Figure 128 : Structure en encorbellement	47
Type de voûtes mayas :	47
1. Voûte classique en gros appareil	47
2. Voûte avec parement-coffrage	47
3. Voûte "en bouteille" d'Uaxactun	47
4. Voûte de l'aqueduc de Palenque	47
5. Voûte à arc trilobé du Palais de Palenque	47
6. Voûte concave du Palais du Gouverneur à Uxmal	47
(d'après Morley). Dans H. STIERLIN "HAYA"	47
aff. du Livre, 1964	47
Figure 2.212 : Figure 129 : Voûte sphérique sans cintrage, en briques où chaque assise surplombe légèrement la précédente. Profil en ogive. Abydos - Egypte (CHOISY I, p 22)	47
Figure 2.213 : Figure 130 : Berceau appareillé (Abydos) par encorbellement sans cintrage. Empilage équilibré prend l'aspect d'une voûte clavée.	47
Ce n'est pas le cas. C'est une construction à contrepoids (chaque bloc en surplomb à une partie qui lui permet de se tenir en équilibre) (CHOISY I, p 31)	47
Figure 2.214 : Figure 131 : Le début, le germe de la voûte à poussées il faut le trouver dans la voûte réduite à deux voussoirs.	47
A. Deir-el-Bahasi	47
B. Entrée grande pyramide (voûte double)	47
C. Tombe à Gizeh à 3 voussoirs :	47
début de la voûte clavée (CHOISY I, p. 31)	47
Figure 2.215 : Figure 132	47
Figure 2.216 :	47
Figure 2.217 : Figure 133	47

au moins dans le détail. Deux solutions adoptées _____	47
(J.L. de CENIVAL, "L'Egypte", p.4 du Livre, 1964). Moyen Empire pour l'établissement de voûtes en V renversé _____	47
Figure 2.218 : _____	47
Figure 2.219 : L'ancêtre de l'arc est donc le triangle de décharge, Figure 135 _____	48
Figure 2.220 : L'ancêtre de la voûte, la chambre de décharge (2 plaques en V renversé) _____	48
Figure 134. La porte des Lionnes à Mycène, Figure 136 _____	48
Figure 2.221 : Figure 137 : Portique à 3 articulations _____	48
Figure 2.222 : Figure 138 _____	48
Figure 2.223 : Dans un portique : Figure 139 _____	48
donc : poutre horizontale assez haute, piliers : élancés _____	48
Figure 2.224 : _____	48
Figure 2.225 : Figure 140 _____	48
Figure 2.226 : Figure 141 : Courbe funiculaire et parabole _____	48
Figure 2.227 : Figure 142 : Loge des Lanzi à Florence _____	49
Figure 2.228 : Figure 143 : Cathédrale Saint-Just à Narbonne, Dessin de Viollet le Duc in Dictionnaire. op.cit. _____	49
Batterie d'arcs-boutants _____	49
A. Arcs superposés _____	49
B. Arcs successifs _____	49
C. Culée _____	49
D. Culée intermédiaire _____	49
E. Etrésillonnement _____	49
a. Tête d'arc-boutant _____	49
Figure 2.229 : Figure 144 : Relation flèche-poussée : P. Charge, f. Flèche, L. Portée, H. Poussée _____	49
Figure 2.230 : Mais on cherche surtout à réduire la poussée : "la poussée est proportionnelle à la charge totale et à la portée et inversement proportionnelle à la hauteur de l'arc " (fig. 144) _____	49
Figure 2.231 : 1. Arcade, 2. Arceau, 3. Centre, 4. Reins, 5. Contre-clés, 6. Claveau ou voussoir, 7. Clé de voûte ou d'arc, 8. Imposte, 9. Piedroit, 10. Naissance, 11. Sommier, 12. Rouleau ou archivolte, 13. Flèche _____	49
Figure 2.232 : Figure 146 : Claveau-voussoir, a. Donelle d'intrados, b. Donelle d'extrados, c. tête, d. Lit en coupe _____	49
Figure 2.233 : Figure 147 : Les "voussoirs" d'un arc en plein cintre. _____	50
Figure 2.234 : _____	50
Figure 2.235 : Figure 148 : Le cintre, Dessin de Viollet le Duc in Dictionnaire op. cit. 1868. A. Cintre (146), B. Couchis (146), C. Blocage chargeant les reins (151) _____	51
Figure 2.236 : _____	51
Figure 2.237 : Figure 149 : Arc en plein cintre Arc en segment égal ou semblablement égal au dem-cercle. Voûte en berceau plein-cintre. Dans l'arc en plein-cintre, la flèche ¹⁴⁷ est égale à la moitié de la portée ¹⁴⁷ . On nomme ARC SURBAISSE tout arc dont la flèche est inférieure à la moitié de la portée et ARC SURHAUSSE tout arc dont la flèche est supérieure à la moitié de la portée. Ne pas confondre l'arc surhaussé et l'arc surélevé ¹³³ . Voûte surbaissée à lunettes.. _____	51
Figure 2.238 : Brisé. Arc à deux branches concaves se rejoignant en pointe au faîte; VOUTE EN BERCEAU BRISÉ. <u>Ne pas appeler ogive l'arc brisé.</u> En général, l'arc brisé et la voûte en berceau brisé n'ont pas de clef mais un joint de faîte. Préciser éventuellement arc brisé à clef. _____	51
Figure 2.239 : Figure 150 : Arc brisé en tiers-point. Arc brisé à deux segments, dans lequel peut s'inscrire un triangle quilatéral : le centre de chaque segment est placé à la naissance de l'autre; leur rayons est égal à la portée. VOUTE EN BERCEAU TIERS-POINT. _____	51
Figure 2.240 : Figure 151 : Arc brisé en lancette. Arc brisé à deux segments, plus aigu que l'arc en tiers point : les autres sont placés à l'extérieur de l'arc et les rayons sont plus grands que la portée. Ne pas confondre l'arc lancette avec un quelconque arc brisé surélevé. VOUTE EN BERCEAU LANCETTE. _____	51
Figure 2.241 : Figure 152 : Arc brisé surbaissé Arc brisé à deux segments, moins aigu que l'arc en tiers-point : les centres sont placés à l'intérieur de l'arc et les rayons sont plus petits que la portée. VOUTE EN BERCEAU BRISÉ SURBAISSE. _____	51
Figure 2.242 : Figure 153 : Arc en chaînette Arc dont le tracé est une chaînette renversée, la chaînette étant la courbe que dessine naturellement une chaîne suspendue à ses extrémités et abandonnée à la pesanteur. VOUTE EN BERCEAU CHAINETTE _____	51
Figure 2.243 : Figure 154 : Arc en anse de panier Arc surbaissé en demi-ovale, la portée étant le plus grand diamètre de l'ovale. On distingue théoriquement des arcs en anse de panier à trois, cinq, sept, etc, centres. VOUTE EN BERCEAU ANSE DE PANIER. _____	51
Figure 2.244 : Figure 155 Arc infléchi. Arc à deux branches convexes se rejoignant en pointe au faîte. _____	51
Figure 2.245 : Arc déprimé. Arc surbaissé dont le tracé est une droite raccordée à la naissance par deux segments de cercle : le rayon de ces segments est égal ou supérieur au cinquième de la portée de l'arc, ce qui distingue l'arc	

déprimé de certaines plates-bandes ou de certains linteaux à soffite surélevé. LA VOUTE DEPRIMEE présente un plafond.	51
Figure 2.246 : Arc outrepassé. Arc de tracé quelconque se prolongeant en petits segments en-dessous de la plus grande ouverture. Arc plein cintre outrepassé. Lambris en berceau outrepassé.	51
Figure 2.247 :	52
Figure 2.248 : Arc en mitre. Sorte d'arc tracé suivant deux droites rampantes formant un angle au faite. L'ARC EN MITRE EMOUSSE est un arc en mitre dont l'angle est remplacé par un petit segment de cercle.	52
Figure 2.249 : Voûtes pleines : la voûte naît du développement d'un ou de plusieurs arcs selon leurs génératrices (architecture romane).	52
Figure 2.250 :	52
Figure 2.251 :	52
Figure 2.252 :	52
Figure 2.253 : Fig. 162 : Structure en voûte à remplissage Résultant de l'emploi d'arcs disposés parallèlement ou en convergence et réunis par des remplissages. Sources : H/HOFSTATTER op.cit.	53
Figure 2.254 : Fig. 163 La sainte Chapelle, Paris : plan et coupe 1:250 : A : Eglise inférieure, B :Eglise supérieure	53
Figure 2.255 : Figure 164. Voûte en berceau	53
Figure 2.256 : Figure 165. : Voûte en berceau, en brique, sans cintrage (Egypte). Pour éviter les cintres on procédait par tranches verticales et non par assises convergentes. La première tranche (a) est maçonnée sur M, le mur de tête et ainsi de suite presque N. Il faut seulement un cintre par l'arceau de tête (choisy, I, p.23).	53
Figure 2.257 : Voûte en berceau (fig. 167) Voûte dont l'intrados est engendré par la translation d'un arc suivant un axe. La voûte en berceau se distingue de l'arc par le fait qu'elle présente au moins quatre voussoirs en profondeur ou (quand elle est appareillée en rouleaux) plusieurs rouleaux d'intrados. Le mot berceau ne désigne qu'une forme qui peut être aussi bien celle d'un lambris que celle d'une voûte ; employé seul, il n'implique donc pas nécessairement l'idée de voûtement. Lambris en berceau (IV, fig.). Les berceaux prennent le nom des arcs de même tracé. Voûte en berceau continu (fig.167) voûte en berceau sans doubleau. Voûte en berceau continu sur trois travées. La voûte en berceau fractionné a un doubleau sur chaque travée. Ne pas confondre la voûte en berceau fractionné avec un suite de voûtes barlongues en pendentif.	53
Figure 2.258 :	53
Figure 2.259 :	54
Figure 2.260 :	54
Figure 2.261 : Voûte en berceau transversal (fig.166 A) Voûte en berceau dont l'axe est perpendiculaire à l'axe longitudinal d'un vaisseau, d'une galerie. Lambris en berceau transversal.	54
Figure 2.262 : Voûte en berceau tournant (fig. 169) Voûte en berceau dont l'axe est une courbe dans un plan horizontal. Déambulatoire couvert d'une voûte en berceau plein-cintre tournant. Voûte en berceau tournant sur le noyau, le pilier,...L'axe est un cercle ou un ovale complet : la retombée centrale repose sur un noyau d'escalier, sur un pilier,...	54
Figure 2.263 : Voûte en berceau hélicoïdal (fig.172) Voûte en berceau dont l'axe est une hélice. L'escalier en vis-de-Saint-Gilles est couvert par une telle voûte.	54
Figure 2.264 :	54
Figure 2.265 : Arc diaphragme (fig.166 B) Ensemble formé d'un arc et d'un diaphragme porté par cet arc. Le diaphragme est un pan de mur intérieur, plus ou moins développé, dont les deux faces sont dégagées. L'arc diaphragme peut être utilisé sous une voûte, un plafond, un toit,... Cf. ogive diaphragme, doubleau diaphragme. (Vocabulaire de l'architecture ()).	54
Figure 2.266 : Doubleau (fig.173) renforcement, redoublement en ab de l'épaisseur du mur à l'intérieur d'un berceau, destiné à lui donner une résistance plus grande à cet endroit. (Gromort ()). L'éclairage des salles couvertes en berceau est difficile. En dehors de la zone des tympans, il faut recourir à des pénétrations voûtées (vestibule de Saint Pierre à Rome. Le berceau transversal permet de surmonter ce problème.	54
Figure 2.267 :	54
Figure 2.268 : Exemple : figure 174, Palais de Tag-Eivan, Perse : la voûte est partagée en une ossature active et des voûtains de remplissage : au lieu d'un berceau longitudinal, on a une série de berceaux B transversaux et posés sur des arcs doubleau ; les poussées se localisent non plus uniformément mais en des zones localisées (A). Ingénieuses décomposition des efforts qui influenceront les architectes de la Perse musulmane et l'occident chrétien. (Choisy I p.106)	54
Figure 2.269 :	54
Figure 2.270 :	54
Figure 2.271 :	54
Figure 2.272 :	54
Figure 2.273 :	54
Figure 2.274 :	54

Figure 2.275 : Fig.175 Voûte en arc de cloître (fig.175,176) Voûte constituée de quatre voûtains sur plan carré ou rectangulaire et de même hauteur, dont les rencontres forment des arêtes rentrantes : la voûte en arc de cloître est théoriquement le résultat de la compénétration de deux berceaux de même hauteur en croix dont les naissances rectilignes restent entières. La coupole polygonale n'est qu'un cas particulier de voûte en arc de cloître à plus de quatre voûtains. 55	55
Voûte en arc de cloître rectangulaire peut être barlongue ou oblongue : ses arêtes se réunissent toutes les quatre au faite ou deux par deux sur une ligne de faite. La voûte en arc de cloître peut avoir théoriquement tous les tracés et tous les appareils de voûte en berceau. _____	55
Voûte en arc de cloître déprimée (fig.) formée de berceaux déprimés présente un plafond à son sommet. _____	55
Voûte en demi arc de cloître (fig.) ne présente que trois voûtains. _____	55
Figure 2.276 : Fig.176 Voûte en arc de cloître Arêtes extérieures sortantes Dans la voûte en arc de cloître à calotte , les arêtes ne sont marquées que dans le bas et disparaissent progressivement en tendant vers le faite qui est une calotte de coupole. (Vocabulaire de l'architecture, ()). _____	55
Figure 2.277 : Fig. 177 Expression géométrique des voûtes d'arêtes et en arc de cloître. (Gromort,). _____	55
Figure 2.278 : _____	55
Figure 2.279 : Fig. 178 d'après Gromort. _____	56
Figure 2.280 : Fig. 179 d'après J. François. D'après J.François : prétoire de Mousmiyeh (vers 160) converti en église vers 400 1. Voûte en dalles posées sur axes 2. Voûte en arc de cloître 3. cul de four _____	56
Figure 2.281 : Figure 179. D'après J.François : prétoire de Mousmiyeh (vers 160) converti en église vers 400 _____	56
1. Voûte en dalles posées sur axes _____	56
2. Voûte en arc de cloître _____	56
3. cul de four _____	56
Figure 2.282 : Voûte dont le plan est un segment de cercle et l'intrados une concavité de révolution. _____	56
Le plan de la voûte en cul-de-four est théoriquement un demi-cercle; par extension, on parle de cul-de-four polygonal. Le plan du demi cul-de-four (fig.). Est un segment voisin du quart de cercle. Suivant l'arc générateur, on distingue les culs-de-four en plein cintre, segmentaire, en anse de panier, déprimé, etc. Cul-de-four en quart de sphère. Lambris en cul-de-four. Le cul-de-four est habituellement assisé, c'est-à-dire qu'il est formé d' assises de voussoirs ou d'assises en tas de charge. Il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer le cul-de-four assisé (fig.) avec cul-de-four appareillé en limaçon avec la coquille. Cul-de-four en tas de charge. Trompe en cul-de-four. _____	56
Cul-de-four appareillé en limaçon. Cul-de-four formé de rangs de voussoirs hélicoïdaux. _____	56
Figure 2.283 : Fig 180 Voûte en arc de cloître _____	57
Figure 2.284 : Fig 181 Loge de farnésine, à Rome, d'après Letarouilly. _____	57
Figure 2.285 : Fig.182 Coupole hémisphérique assisée. _____	58
Figure 2.286 : Fig.183 Coupole hexagonale en plein-cintre assisée. _____	58
Figure 2.287 : Fig.184 Coupole hémisphérique appareillée sur le plan d'une voûte en arc-de-cloître. _____	58
Figure 2.288 : Fig.185 Coupole en coquilles .A.Trompillon. _____	58
Figure 2.289 : Fig.186 Coupole appareillée sur le plan d'une voûte d'arêtes. _____	58
Figure 2.290 : _____	58
Figure 2.291 : Fig.188 : Coupole _____	58
Figure 2.292 : Fig.189 : Le Panthéon à Rome. _____	58
Figure 2.293 : Fig.190 : Panthéon romain (détails) _____	59
Figure 2.294 : _____	59
Figure 2.295 : Fig.191 : San Giorgio Maggiore à Venise. Architecte A.PALLADIO _____	59
Figure 2.296 : Fig.192 : Le dôme en maçonnerie creuse - La figure montre le dôme persan réalisé à l'aide mon point de maçonnerie pleine, mais des deux coquers de briques reliées (détail M) par des éperons et des arceaux d'entassement : on obtient ainsi une voûte tant aussi rigide qu'une pleine, mais plus légère et de moindre poussée. L'exemple vient de la mosquée de Sultaniel. (Choisy, II, p.82). _____	59
Figure 2.297 : Voûte d'arête _____	61
Figure 2.298 : Voûte d'arêtes perspective _____	61
Figure 2.299 : Voûte d'arêtes à grands et petits quartiers alternés / A: Petits quartiers/ B: Grands quartiers _____	61
Figure 2.300 : Voûte d'arêtes fourrée / A: arête à voussoirs en v. / B: Fourrure. _____	61
Figure 2.301 : Voûte d'arête appareillée (période romaine), tombe de Pergame, sans doute la voûte d'arêtes la plus ancienne.(Choisy,I.,p.410) _____	61
Figure 2.302 : Salle voûtée de la Basilique de Maxence(achevée sous Constantin). La partie centrale est couverte en voûtes d'arêtes. Celles-ci sont maintenues par des éperons E reliés deux à deux par des voûtes en berceaux V. Le mur de clôture R englobe les contreforts (Choisy,I,p.419) _____	61
Figure 2.303 : Voûtes d'arêtes. Doubleaux _____	62
Figure 2.304 : Voûte d'arêtes avec doubleaux. D'après Gromort p.34 _____	62

Figure 2.305 : Voûte d'arêtes bombée à six quartiers, A: quartier plein-cintre incliné	62
Figure 2.306 : Fig.218:Voûte d'arêtes plate, A: quartier plein-cintre droit et horizontale.	62
Figure 2.307 : Fig.219: Voûte à arêtes doubles déprimées. A B: Lunette droite en plein-cintre / A: Lunette longitudinale / B: Lunette transversale / C: Voûtain / D: Plafond / E:Arrière voussure / a: Doubleau	62
Figure 2.308 : Fig.220:Voûte à arêtes triples de huit cantons. A:canton formé d'une lunette et de deux voûtains / B:Trombe / a:Lunette brisée / b:Voûtain	62
Figure 2.309 : Voûte barlongue	62
Figure 2.310 :	62
Figure 2.311 : couvrir » Les plans verticaux qui prolongent les quatre murs de la salle ont des arcs qui reportent les charges dans les angles.	63
Figure 2.312 : Pendentif, n.m. Trompe dont l'intrados est un triangle sphérique concave. Les angles de ce triangle se nomment cornes.	63
Figure 2.313 :	63
Figure 2.314 :	63
Figure 2.315 : Le pendentif, remplaçant la trompe, permet de construire une coupole sur une base circulaire. Cette base est soutenue par des portions de sphère appelées pendentifs et remplaçant les trompes. Cette forme sphéroc-triangulaire permet de transférer la poussée sur la pile, plus bas, et non plus sur l'arc lui-même comme le faisait la trompe.	63
Figure 2.316 :	63
Figure 2.317 :	63
Figure 2.318 :	63
Figure 2.319 :	64
Figure 2.320 :	64
Figure 2.321 : FIGURE 231 : Le pendentif à Rome est à peine connu. Un essai timide pourtant aux thermes de Caracalla: ça n'est pas un triangle sphérique mais une amorce d'arc de cloître coupée par une arête rentrante.	64
Figure 2.322 : FIGURE 232 ; Voûte sphérique de type oriental romain. Coupole appareillée sur plan carré. Le raccord entre le plan carré et la calotte sphérique est obtenu par des pendentifs mais dont les lits sont plans. Un peu exceptionnel dans l'architecture romaine qui est plutôt artificiellement monolithe(concrétion). (Choisy 1 p. 411)	64
Figure 2.323 :	64
Figure 2.324 :	64
Figure 2.325 : Fig.239. Sainte Sophie de Salonique / 4 pendentifs en triangle sphérique. Aux 4 angles, 4 massifs forment éparons(?) contre l'effort diagonal de poussées que transmettent les pendentifs. Des voûtes en berceaux relie ces massifs 2 à 2 et couvrent les 4 branches du plan en croix. Tout le système d'équilibre est intérieur. Tout est subordonné à la coupole, motif central. (CHOISY)	64
Figure 2.326 : Fig.240. (FLEICHER,()).	64
Figure 2.327 : Fig.241. Eglise athénienne (CHOISY)	64
Figure 2.328 : Fig.242. Vatopedi (Athos) / 1 coupole centrale les 4 branches de la croix sont des tronçons de berceaux. / Aux 4 angles des pendentifs : butée enserrement de 2 berceaux. (CHOISY)	64
Figure 2.329 : Fig.243./ Dans la voûte romane et gothique on se sert d'armatures de pierre, les nervures, entre lesquelles on maçonna, suivant l'arc voulu, les panneaux ou VOUTAINS. Ces armatures sont les doubleaux et les ogives, puis les liernes et les tiercerons.	65
Figure 2.330 : Fig.244. OGIVE . A ne pas confondre avec l'ARC BRISE comme le font Victor Hugo et le Petit Larousse illustré. L'ogive n'est donc pas l'arc brisé du doubleau (b) mais la nervure soulignant l'arête de l'arc diagonal dont la clef est en (a), cet arc pouvant être aussi bien plein cintre que brisé. L'ogive définit la voûte ogivale improprement dite gothique, elle existe déjà dans l'architecture romane. Son origine est obscure, on parle d'influences arabes, perses ou arméniennes antérieures au IXème siècle. Armature de pierre, elle permet d'élever les très grandes et très hautes voûtes des cathédrales d'Ile-de-france du XII et XIIIème siècles, tout en ouvrant de larges verrières.	65
Figure 2.331 :	65
Figure 2.332 : Fig.245.	65
Figure 2.333 : Fig.247.	65
Figure 2.334 : Fig.248.	65
Figure 2.335 : Fig.249, Fig.250.	65
Figure 2.336 : Fig.251.	65
Figure 2.337 : Fig.252 / Concept de base : triangulation. Un cadre à 4 coins n'est qu'en équilibre théorique. Sous charge asymétrique, le système se déforme tant que les coins restent faibles. Une barre diagonale empêche la déformation. Le cadre devient un treillis. Une deuxième diagonale augmente la rigidité, mais n'est pas nécessaire.	66
Figure 2.338 : Fig.253	66
Figure 2.339 Fig.254.: Dans la construction traditionnelle de l'habitat à murs porteurs assez rapprochés (3 à 3.5m), comme la plupart des habitations rurales anciennes de l'Ardenne, la charpente consistait souvent en poutres posées	

sur les pignons et murs intermédiaires. Elles recevaient les chevrons et le lattage. Ce système à squelette combiné au système massif de murs à la fois porteurs et séparateurs, ne constitue pas un treillis.	66
Figure 2.340 : Fig.255. Le véritable treillis plan a commencé avec la ferme simple, destiné à remplacer un ou plusieurs murs intermédiaires, afin d'obtenir un espace plus vaste (granges).	66
Figure 2.341 :	66
Figure 2.342 :	66
Figure 2.343 : Fig.256. <i>Cette ferme se compose de :</i>	67
- Entrait de fermette	67
- Chevron de terrasson	67
- Panne faitière ou loup	67
- Poinçon	67
- Panne ou verne	67
- contre - fiche	67
- Arbalétrier	67
- Panne de brisis	67
- Aisselier	67
- Chevron de brisis	67
- Jambe de force	67
- Panne sablière	67
- Coyau	67
- Entait pouvant former une poutre du plancher	67
Figure 2.344 :	67
Figure 2.346 :	68
Figure 2.347 :	69
Figure 2.348 :	69
Figure 2.349 :	69
Figure 2.350 :	69
Figure 2.351 :	69
Figure 2.352 :	69
Figure 2.353 :	69
Figure 2.354 : figure 271. /	70
Figure 2.355	70
Figure 2.356 : 272 / Portiques à 2 articulations	70
Figure 2.357 : 273 / Portiques à 3 articulations	70
Figure 2.358 : .274.arcs à 3 articulations	71
Figure 2.359 : ferme plane	72
Figure 2.360 : fermes jointes au sommet	72
Figure 2.361 : treillis à profil polygonal	72
Figure 2.362 : profil polygonal	72
Figure 2.363 : profil quasi cylindrique	72
Figure 2.364 :	72
Figure 2.365 : dislocation latérale des points de base	72
Figure 2.366 : écrasement du sommet	72
Figure 2.367 : changement des angles	72
Figure 2.368 : flexion des barres sup.	72
Figure 2.369 : diaphragme en treillis sur supports	72
Figure 2.370 : treillis en arc à 2 articulations	72
Figure 2.371 : treillis à 3 articulations avec câble de traction (tirant)	72
Figure 2.372 :	72
Figure 2.373 : figure 278. Carapace d'un tatou .	73
Figure 2.374 :	73
Figure 2.375 : figure 279 Treillis à simple courbure Deux cylindres se joignant au centre en montant	73
Quatre surfaces cylindriques formant un dôme (voûte en arc de cloître.)	73
Pénétration de deux cylindres (voûte d'arêtes)	73
Figure 2.376 : figure 280 Treillis à double courbure trois ph sur plan triangulaire	73
Quatre ph sur plan carré.	73
six ph sur plan hexagonal	73
Figure 2.377 : 1. Anneaux sphériques en treillis avec diagonale gauche.	73
Figure 2.378 : 2. Anneaux sphériques en treillis avec diagonale à 2 directions	73

Figure 2.379 : 3. Segments sphériques avec barres parallèles.	73
Figure 2.380 : 4. Bandes sphériques, treillis hexagonal	73
Figure 2.381 : 1. Triangulaire.	73
Figure 2.382 : 2. Demi-losange.	73
Figure 2.383 : 3. Losange	73
Figure 2.384 : 4. Hexagone	73
Figure 2.385 : Figure 283. Icosaèdre sphérique avec treillis triangulaire.	73
Figure 2.386 :	73
Figure 2.387 : Figure 284 Dans une structure osseuse par exemple, il n'y a pas deux fibres semblables. Chaque fibre correspond entièrement dans sa forme à la sollicitation qui lui est assignée. (exemple : un fémur)	74
Figure 2.388 :	74
Figure 2.389 : Il s'agit de la généralisation à l'espace de treillis bidimensionnels dont la ferme de charpente ou la poutre treillis sont les exemples connus (projet pour le théâtre de Mannheim, fig. 285)	74
Figure 2.390 : Deux poutres treillis disposées perpendiculairement se renforcent mutuellement du fait de leur intersection (1). Ce renforcement s'accroît si on dispose de la même manière deux séries de poutres treillis parallèles (2). On peut également imaginer de réaliser une intersection entre deux poutres non plus planes mais spatiales dont l'organisation structurelle est calquée sur l'arrangement des directrices du système réticulé de base. Il s'ensuit un nouveau renforcement (3). Cf. fig.286.	74
Figure 2.391 :	74
Figure 2.392 :	74
Figure 2.393 : Fig.287 type 1 : treillis spatiaux composés de prismes rectangulaires.	75
Figure 2.394 : Fig.288 type 2 : treillis spatiaux composés de prismes triangulaires.	75
Figure 2.395 : Fig.289 type 3 : treillis spatiaux composés de pyramides hexagonales.	75
Figure 2.396 : Fig.290 type 4 : treillis spatiaux composés de tétraèdres et semi-octaèdres.	75
Figure 2.397 : Fig.291 type 5 : treillis spatiaux composés de tétraèdres et octaèdres.	75
Figure 2.398 :	75
Figure 2.399 :	77
Figure 2.400 :	77
Figure 2.401 :	77
Figure 2.402 :	77
Figure 2.403 :	78
Figure 2.404 :	78
Figure 2.405 :	78
Figure 2.406 :	78
Figure 2.407 :	78
Figure 2.408 :	78
Figure 2.409 :	79
Figure 2.410 :	79
Figure 2.411 :	79
Figure 2.412 :	79
Figure 2.413 :	81
Figure 2.414 :	81
Figure 2.415 :	82
Figure 2.416 :	82
Figure 2.417 :	82
Figure 2.418 :	82
Figure 2.419 :	82
Figure 2.420 :	82
Figure 2.421 : Fig. 363 : les réactions horizontales aux bases du portique empêchent la rotation des angles et réduit la déformation du cadre exactement de la même façon que si on avait une charge ponctuelle à chaque extrémité de la poutre en porte à faux.	83
Figure 2.422 :	83
Figure 2.423 : Fig. 364 : contrairement à la simple poutre qui à besoin de supports rigides renforcés à la base pour répondre au moment de rotation dans le portique rigide la déformation due à une force latérale engendre des réactions verticales qui produisent une rotation inverse.	83
Figure 2.424 :	83
Figure 2.425 : Fig. 365 Grâce à la continuité des angles, les déformations du portique peuvent être différentes selon les raideurs relatives données aux montants et à la traverse. La distribution des contraintes se fait également en fonction de la forme donnée aux éléments du portique.	84
Figure 2.426 :	84

Figure 2.427 : Fig.366 : 2 articulations. _____	84
Figure 2.428 : Fig. 367 : 3 articulations. _____	84
Figure 2.429 : Combinées avec cadres en T _____	84
Figure 2.430 : _____	84
Figure 2.431 : Fig. 368 : système à 2 articulations. _____	84
Figure 2.432 : Fig. 369 : système à 2 articulations et porte à faux double. _____	84
Figure 2.433 : Fig. 370 : système à 3 articulations et porte à faux double. _____	84
Figure 2.434 : 2 articulations, 1 porte à faux et demi-cadre. _____	84
Figure 2.435 : Système à 2 articulations et porte à faux simple. _____	84
Figure 2.436 : Système 3 articulations et porte à faux double. _____	84
Figure 2.437 : Fig. 371 : (Engel, ()).Portique à 2 articulations sur un portique à porte à faux double à 2 articulations. _____	84
Figure 2.438 : Portique à 2 articulations sur un portique renversé à 2 articulations et supports. _____	84
Figure 2.439 : Portique à 2 articulation sur un portique à porte à faux double à 3 articulations. _____	84
Figure 2.440 : _____	84
Figure 2.441 : Fig.375, Dans le système de poutres parallèles, seule la poutre chargée se déformera. Les autres poutres ne participent pas au mécanisme de résistance à la simple charge. _____	86
Figure 2.442 : Fig.376, Par l'insertion d'une poutre transversale, perpendiculaire aux poutres parallèles, une part de la charge est transmise aux poutres non directement chargées. Donc, le système participe dans son entièreté au mécanisme de résistance à la simple charge. On dira qu'il y a dispersion biaxiale de la charge. _____	86
Figure 2.443 : Fig.377, 2 poutres perpendiculaires, de même longueur reçoivent chacune une moitié de la charge totale. Donc, la réaction à chaque support sera $\frac{1}{4}$ de la charge. _____	86
Figure 2.444 : Fig.378, Si les deux poutres de même section ont des longueurs différentes, la poutre raidisseuse (ainsi appelée pcq. la plus courte) recevra en fait le plus de charge. Si le rapport des côtés est de $\frac{1}{2}$, la raideur des poutres devra avoir le rapport $\frac{1}{8}$, sinon la plus courte reçoit les $\frac{8}{9}$ de la charge totale. _____	86
Figure 2.445 : Fig.379 :Poutre de bordure. Si les deux ensembles de poutres ont plus ou moins la même raideur, une charge continue est dispersée par mécanisme de flexion suivant les deux directions. En cas de charge concentrée, l'interpénétration mutuelle des poutres ne provoque pas une déformation directe. La résistance à la flexion est accrue. _____	86
Figure 2.446 : Fig.380, Dans le cas de plans où un côté est nettement plus long que l'autre, les poutres longitudinales montrent une perte d'efficacité, vu leur faible raideur. En vue de permettre une répartition équitable de la charge, suivant les deux directions, les poutres longues doivent être raidies en conséquence. Par exemple si le rapport des côtés est de $\frac{1}{2}$, les poutres longues devront être 8 fois plus raides. _____	86
Figure 2.447 : Fig.381, Le grillage en diagonale évite l'inconvénient des poutres de longueur différente. _____	86
Figure 2.448 : Fig.382, Poutres perpendiculaires (grille carrée). Poutres obliques (grille en diagonale). _____	86
Figure 2.449 : Fig.383, grille carrée et diagonale. _____	86
Figure 2.450 : _____	86
Figure 2.451 : Résistance à la flexion : Par l'action combinée de la traction, compression, cisaillement (mécanisme de flexion), la charge est transmise aux supports, comme pour une poutre. _____	87
Figure 2.452 : Résistance au cisaillement : Par cisaillement vertical, la charge est transmise d'une bande déformée à la bande voisine. Par ce mécanisme, la charge est répartie sur la dalle entière même dans le cas d'une charge concentrée. _____	87
Figure 2.453 : Résistance à la torsion : La déformation de flexion d'une bande suivant un axe entraîne la torsion d'une bande suivant l'autre axe. Dans une dalle sur appuis simple, 50% de la charge sera transmise aux supports par résistance à la torsion. _____	87
Figure 2.454 : Fig.385 Puisque dans les coins de la dalle, les deux supports se rencontrent à chaque angle droit, les zones angulaires montrent une rigidité plus grande. Par conséquent, les bandes diagonales de la dalle n'effectuent pas une rotation libre de leurs extrémités. C'est un peu comme si on avait deux poutres encastrées, avec changement de courbure aux extrémités. _____	87
Figure 2.455 : Fig.386 _____	89
Figure 2.456 : _____	89
Figure 2.457 : Ex :Fig.387 Plus la hauteur du pliage est grande, plus la portance est grande. (11) _____	90
Figure 2.458 : _____	90
Les supports étant constitués par l'action de raidissement du pli supérieur à l'arête et du pli inférieur au creux. _____	90
Figure 2.461 : Fig.389, Les plis interceptent comme des supports, les charges extérieures. Ils les détournent, réduites en composantes vers les surfaces obliques suivant leur inclinaison. Ces surfaces se comportent comme des poutres inclinées qui s'appuient l'une sur l'autre, et transmettent les charges aux véritables supports. _____	90
Figure 2.462 : Dans le cas d'une inclinaison trop faible, l'ouvrage plissé perd son efficacité. La capacité portante augmente avec la pente, càd avec l'inclinaison et la hauteur d'inclinaison. Fig.390, Par rapport à une dalle	

horizontale, la structure plissée n'a pas besoin de poutre d'appui puisque chaque surface agit comme une poutre dans la direction longitudinale.	90
Figure 2.463 : L'ouverture des plis a pour conséquence la perte de la hauteur et ainsi son effondrement. Le tympan maintient la cohésion de l'ouvrage, et agit contre les déformations critiques du profil, qui sont :	-
écartement des bases, -voilement de 2 surfaces, -voilement d'une surface	90
Figure 2.464 : Fig.391, Tympan en dessous	90
Figure 2.465 : Tympan au-dessus	90
Figure 2.466 :	90
Figure 2.467 : Fig.392, La proportion des plis, les tympan (ou diaphragmes) et le cas échéant, la rive frontale, sont les éléments qui expriment l'action portante de l'ouvrage plissé. La forme judicieuse qui lui sera donnée, conduira à une FORME STRUCTURALE.	91
Figure 2.468 :	91
Figure 2.469 : Fig.393, Une déformation peut survenir sur le bord laissé libre des surfaces extrêmes. (composante perpendiculaire au plan des efforts)	91
Figure 2.470 : Pour les fortes pentes : Fig.394, On prendra des rives frontales de la forme soit perpendiculaire aux plans, soit horizontales. Pour les faibles pentes : Perpendiculaire aux plans, verticales ou encore, la rive peut être intégrée à la surface. (fig.393)	91
Figure 2.471 : Fig.395, -Plis Parallèles	91
-Plis à contre sens	91
-Plis en éventail	91
-Pieds dans le plan des arêtes	91
-Formation d'angles rigides. Dans ce cas, l'ouvrage devient une construction en portique.	91
Pieds du portique dans le plans des creux.	91
Figure 2.472 :	91
Figure 2.473 : Fig.396 (ENGEL) Les plis supérieurs sont dans un même plan (arêtes).	91
Figure 2.474 : Chaque pli est à la fois arête et creux.	91
Figure 2.475 : Contre profil au centre.	91
Figure 2.476 :	91

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE de THEORIE

1. ALEXANDER, Ch., CHERMAYEFF, S., «Community and Privacy», Cambridge, Harvard University Press, 1964.
2. ALEXANDER, Ch., «Notes on the Synthesis of Form», Cambridge, Harvard University Press, 1964.
3. ALEXANDER, Ch., «A City is not a tree», *Design*, N° 206, Feb. 1966, pp. 46-55.
4. «L'Aménagement intérieur», Éditions Test-Achats, Bruxelles, 1991.
5. ARNHEIM, R., «La pensée visuelle», Flammarion, Paris, 1976.
6. ARNHEIM, R., «Dynamique de la forme architecturale», Éd. Mardaga, Liège, 1989.
7. BLACHERE, G., «Les exigences humaines», CSTB, Paris, 1971.
8. BOUDON, Ph., «Sur l'espace architectural», Dunod, Paris, 1971.
9. BROADBENT, G., BUNT, R., JENCKS, Ch., «Signs, symbols and architecture», John Wiley & Sons, 1980.
10. CASTEX, J., PANERAI, Ph., «Notes sur la structure de l'espace urbain», *Architecture d'aujourd'hui*, N° 183, décembre 1970-janvier 1971, pp. 30-33.
11. CASTEX, J., PANERAI, Ph., «Analyse de l'espace architectural», *Technique et Architecture*, N° 97, mai 1971, pp. 63-65.
12. CHING, F., «Architecture : Form, Space and Order», Van Nostrand Reinhold Co., New-York, 1979.
13. CHOISY, A., «Histoire de l'architecture», 2 tomes, Vincent, Fréal et Cie, Paris, 1954.
14. COUSIN, J., «L'espace vivant», Editions du Moniteur, Paris, 1980.
15. CRUNELLE, M., «Psychologie de la perception de l'espace», Presses universitaires de Bruxelles, ULB, 1991.
16. CULLEN, G., «Townscape», Architectural Press, London, 1961.
17. DERIBERE, M., «La couleur dans les activités humaines», Dunod, Paris, 1968.
18. DOULLIEZ, J., «Caractérisation architecturale et Système de critères», Université de Liège, Collection de la Faculté des Sciences appliquées, Liège, 1983.
19. DUCOURANT, B., «L'art du dessin enseigné par les maîtres : de Dürer à Picasso», Bordas, 1989.
20. DUPLAY, Cl. et M., «Méthode illustrée de création architecturale», Editions du Moniteur, Paris, 1985.
21. DUTHOIT, S., «Beau ou laid ?», mémoire de fin d'études, non publié, Direction J. DOULLIEZ, Institut Supérieur d'Architecture Intercommunal (ISAIMons), 1992.
22. EKAMBI-SCHMIDT, J. «La perception de l'habitat», Encyclopédie universitaire, Éditions universitaires, Paris, 1972.
23. ELEB-VIDAL, M., CHATELET, A-M., MANDOUL, Th. «Penser l'habité; le logement en questions», Éditions P. Mardaga, Liège, 1988.
24. ENGEL, H., «Structure systems», Iliffe Books Ltd., London, 1968.
25. «Façades en ville», Atelier 4^e année, THOMAS, F., DEBASTE, J., ISAI, Mons, 1987.
26. FAYE, B., TOURNAIRE, M., GODARD, A., «Sites et sitologie», Éditions J-J. Pauvert, Paris, 1974.
27. FISCHER, G. N., «La psychosociologie de l'espace», PUF, Collection «Que sais-je ? », Paris, 1981.
28. FRAMPTON, K., «L'architecture moderne : une histoire critique», Éditions Ph. Sers, Paris, 1985.
29. FRANCES, R., «Les choix et les jugements esthétiques», *La Recherche*, N° 46, juin 1974, pp. 553-561.
30. FRANCES, R., «Psychologie de l'art et de l'esthétique», PUF, Paris, 1979.
31. GARRETT, L., «Visual Design : a problem-solving approach», Studio Vista, London, 1968.
32. GERRITSEN, F., «Présence de la couleur», Dessain et Tolra, Paris, 1974.

33. GHYKA, C., «Esthétique des proportions dans la nature et dans les arts», Gallimard, Paris, 1927.
34. GHYKA, C., «Essai sur le rythme», Gallimard, Paris, 1938.
35. GIBBERD, F., «Town Design», Architectural Press, London, 1964.
36. GIBSON, F., «The Perception of the visual World», Houghton Mifflin Co., Boston, 1950.
37. GOMBRICH, E. H., «L'art et l'illusion», Gallimard, Paris, 1971.
38. GOUVION, F., VANDEMERT, F., «Le symbolisme des rues et des cités», Berg international, 1973.
39. GREGORY, S.A., «L'oeil et le cerveau. La psychologie de la vision», Hachette, Collection «Univers des connaissances», Paris, 1966.
40. GROMORT, G., «Choix d'éléments empruntés à l'architecture classique», Editions Vincent Fréal et Cie., Paris, 1960.
41. GROMORT, G., «Choix de plans de grandes compositions exécutées», Editions Vincent Fréal et Cie., Paris, 1944.
42. GROMORT, G., «Essai sur la théorie de l'architecture», Editions Ch. Massin, Paris.
43. GUADET, Ch., «Éléments et théorie de l'architecture»
44. HALL, E., «La dimension cachée», Éditions du Seuil, Points, 1971.
45. HAMBURGER, B., «Série industrielle et variété architecturale», *IF Forum*, Vol. 4, 1973, N° 1, pp. 11-16.
46. «Histoire contemporaine de la maison isolée», Atelier 1^è et 2^è candidatures, DOULLIEZ, J., DEBASTE, J., ISAI, Mons, 1985.
47. HUYGHE, R., «Formes et forces», Flammarion, Paris, 1985.
48. ITTEN, J., «L'art de la couleur», Dessain et Tolra, Paris, 1967.
49. JOLY, L., «La structure», Éditions IDEA, Suisse, 1973.
50. KENNES, J., VANDERPERREN, J., «L'espace systématisé de Guarino Guarini», A+, N° 31, septembre 1976, pp. 67-98.
51. KRIER, R., «L'espace de la ville; théorie et pratique», Éditions AAM, 1980.
52. LAUGIER, «Essai + observations sur l'architecture», 1765, Éditions Mardaga, 1979.
53. LÉONARD, M., «Humanizing Space», *Progressive Architecture*, April 1969, pp. 128-133.
54. LUIGI, G., «Coques contre boîtes», *Neuf*, N° 78, janvier-février 1979, pp. 26-32.
55. «La lumière du jour dans les espaces intérieurs», AFE, Paris, Nov. 1983.
56. LURÇAT, A., «Formes, composition et lois d'harmonie», 5 volumes, Vincent Fréal, Paris, 1954.
57. LYNCH, K., «L'image de la Cité», Dunod, Paris, 1971.
58. MICHELIS, P. A., «L'esthétique de l'architecture», Éditions Klincksiek, Paris, 1974.
59. MINGUET, Ph., «L'art dans l'histoire», Éditions Labor, Bruxelles, 1987.
60. MOORE, CH., ALLEN, G., «L'architecture sensible : espace, échelle, forme», Dunod, Paris, 1981.
61. MORETTI, L., «Strutture e Sequenze di Spazi», *Spazio*, N° 7, 1952, pp. 3-14.
62. NEUFERT, E., «Les éléments de projets de construction», Dunod, Paris, 1983.
63. NOIRHOMME, M., «La couleur en Architecture», mémoire de fin d'études, non publié, Direction J. DOULLIEZ, Université de Liège, 1982.
64. PANERAI, Ph., DEPAULE, J-Ch., DEMORGON, M., VEYRENCHÉ, M., «Éléments d'analyse urbaine», Éditions AAM, Bruxelles, 1980.
65. PERRAULT, C., «Vitruve - Les dix livres d'architecture», Éditions P. Mardaga, Bruxelles-Liège, 1979.
66. PIERRARD, A., «Art et Architecture : rapports nuancés», mémoire de fin d'études, Direction J. DOULLIEZ, non publié, Institut Supérieur d'Architecture Intercommunal (ISAI), Site de Mons, 1992.
67. PIRSON, J-F., «La structure et l'objet : essais, expériences et rapprochements», Éditions P. Mardaga, 1984.
68. PRAK, N. L., «The Language of Architecture», Mouton, Paris, The Hague, 1968.

69. «Questions : Chemins d'économie; architecture et économie», ISA St Luc, Bruxelles, 1982.
70. «Questions 8 : L'architecture comme langage ? », ISA St Luc, Bruxelles, 1986.
71. RAPOPORT, A., «Pour une anthropologie de la maison», Dunod, Paris, 1972.
72. RASMUSSEN, S. E., «Experiencing architecture», MIT Press, Boston, Cambridge, 1968.
73. «(La) Recherche en architecture : un bilan international», Actes du colloque «Rencontres, Recherches, Architecture», Juin 1984, Éditions Parenthèses, Paris, 1986.
74. SCHULZ, Ch.-N., «Système logique de l'architecture», Éd. P. Mardaga, Liège, 1974.
75. SCHULZ, Ch.-N., «Genius loci : paysage, ambiance, architecture», Éditions P. Mardaga, Liège, 1985.
76. SCZOT, F., «Éléments analytiques de l'espace urbain», Editions Vincent Fréal et Cie., Paris, 1974.
77. SIEGEL, C., «Formes structurales de l'architecture moderne», Eyrolles, Paris, 1965.
78. SOMMER, R., «Personal Space», Prentice Hall, New Jersey, 1969.
79. SOURIAU, E., «Vocabulaire de l'esthétique», PUF, Paris, 1990.
80. SPREIREGEN, P. D., «Urban Design : The Architecture of Towns and Cities», Mc Graw Hill, New York, 1965.
81. STILLEMANS, J., «L'ornement de l'architecture», notes de séminaire, Louvain-la-Neuve.
82. TANIZAKI, J., «Éloge de l'ombre», Publications orientalistes de France, 1977.
83. THIEL, Ph., «Recherche d'un nouveau vocabulaire», *Architecture d'Aujourd'hui*, N° 195.
84. THIEL, Ph., «An Experiment in space notation», *Architecture Review*, May 1962.
85. TOURNUS, «La maison sur mesure», Editions du Moniteur, Paris, 1978.
86. VANDEVEN, C., «Space in Architecture», Van Gorcum Assen, The Netherlands, 1980.
87. VAN LIER, H., «L'espace architectural», Encyclopaedia Universalis, article «Architecture».
88. VAN LIER, H., «Perception», Encyclopaedia Universalis, 1968.
89. VAN LIER, H., «Les arts de l'Espace», Casterman, Tournai, 1971.
90. VENTURI, R., «De l'Ambiguïté en architecture», Dunod, Paris, 1971.
91. VICKERY, R., «Antrophysical Form : two families and their neighborhood environments», University Press of Virginia, Charlottesville, 1972.
92. VON MEISS, P., «De la forme au lieu», Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1986.
93. VON MEISS, P., «De la cave au toit, témoignage d'un enseignement d'architecture», Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1991.
94. WORSKETT, R., «The character of Towns», The Architectural Press, London, 1969.
95. ZEVI, B., «Apprendre à voir l'architecture», Editions de Minuit, Paris, 1959.
96. ZEVI, B., «Langage de l'architecture moderne», Dunod, Paris, 1980.