

Les lignes et les surfaces courbes en architecture

« Analyse et réflexion, mathématique et constructive de la ligne et de la surface courbe »

Patrick Meyer - Jan RESZKA

2005-2006

Table des matières

INTRODUCTION

CHAPITRE 1 : L'architecture

A) Section 1 - Architecture sans architecte	1
a. Les igloos	2
b. Yourtes mongoles	3
c. Maison des Pouilles (Puglia ; Italie)	4
B) Section 2 – Le berceau de plusieurs traditions architecturales	6
a. Grèce	6
b. Rome antique	7
C) Section 3 – Constructions des dômes	9
a. Byzance	10
b. Architecture romane	11
c. Architecture gothique	13
d. Renaissance	15
D) Section 4 – Développement de l'architecture à base d'ellipse	16
a. Baroque	16
b. L'art nouveau	18
E) Section 5 – Recherche de nouvelles formes architecturales	20
Le 20 ème siècle	
F) Conclusions	22

CHAPITRE 2 : Les courbes mathématiques

A) Section 6 – les courbes deux dimensionnelles	22
a. Le cercle	25
b. Les spirales	26

c. L'ellipse	28
d. La parabole	30
e. L'hyperbole	31
f. La sinusoïde.....	32
B) Section 7 – Les courbes tridimensionnelles	33
a. L'hélice	33
C) Section 8 – Les surfaces (volumes) courbes.....	34
a. La sphère.....	35
b. Le cylindre	37
c. Le cône.....	38
d. Le tore.....	38
e. L'ellipsoïde	39
f. L'hyperboloïde d'une nappe	40
g. Les surfaces de translation	41
h. Les surfaces développables	42
i. L'hélicoïde	42
j. La conoïde.....	43
k. La caténoïde.....	43

CHAPITRE 3 : L'adaptation de la courbe avec le temps

a. Les avantages des courbes définies mathématiquement.....	44
b. Liège et Santiago Calatrava.....	45
c. L'homme et ses besoins–du point de vue philosophique et esthétique.....	46

CHAPITRE 4 : Conclusions

a. Conclusions et expériences personnelles	47
b. Résumé.....	48

Bibliographie

Introduction¹

Celui qui aime examiner les différents types de construction, doit examiner l'évolution de l'architecture. L'influence du passé sur l'avenir est significative et immense. Si on allait rechercher à n'importe quelle époque, soit le Moyen-Âge, soit la Renaissance pour analyser l'architecture, on ne trouverait jamais l'essentiel de l'art de bâtir.

L'étude de l'évolution architecturale se réduit en général à l'étude de ses plus récentes phases. L'analyse sélective des différents aspects que chaque époque apporte ou met en valeur et en les comparant dans l'art de la construction, nous fait comprendre l'évolution architecturale.

L'intention de ce travail est de disperser notre conception de l'art de bâtir, en explorant le domaine de l'architecture courbée. Dans le temps on considérait que le cercle et la sphère étaient des figures géométriques parfaites. Les Grecs symbolisaient la parfaite symétrie divine, par contre la nature nous présente une multitude de formes et n'engendre pas seulement des formes parfaites.

Ce travail a pour but d'éclaircir la philosophie et les possibilités de la construction courbée. Il définit la place que cette architecture occupe, comment la valoriser, la faire évoluer, varier et avancer, ce qui est pour l'homme une riche source philosophique et d'inspiration technique.

Soit pour des raisons économiques, soit par manque de solutions techniques, l'homme s'est retranché dans des constructions carrées. Le cercle par contre, étant un ensemble infini de points, constitue une forme harmonieuse et parfaite. N'ayant ni début, ni fin, il reflète la nature en ses structures fluides. Ce cercle est un ensemble homogène et indéformable.

*Pourquoi la nature préfère-t-elle une forme à une autre ?
Pourquoi les astres ressemblent à des boules et non à des cubes ?*

¹ LE CORBUSIER, *Vers une architecture*, Paris, Flammarion, 1995.

FREI, O., *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt, 1982, pp.13-27.

WEINAND, Y., *New_modeling*, Lausanne, Presse polytechnique et universitaires romandes, 2004, pp.8-12.

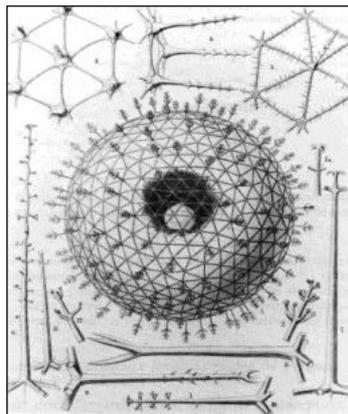
SERS, P., *Wassily Kandinsky, point et ligne sur plan*, France, Folio essais, 1991.

BACHELARD, G., *La poétique de l'espace*, Paris, Presse universitaires de

La nature même nous a donné l'exemple d'un procédé efficace et très simple.

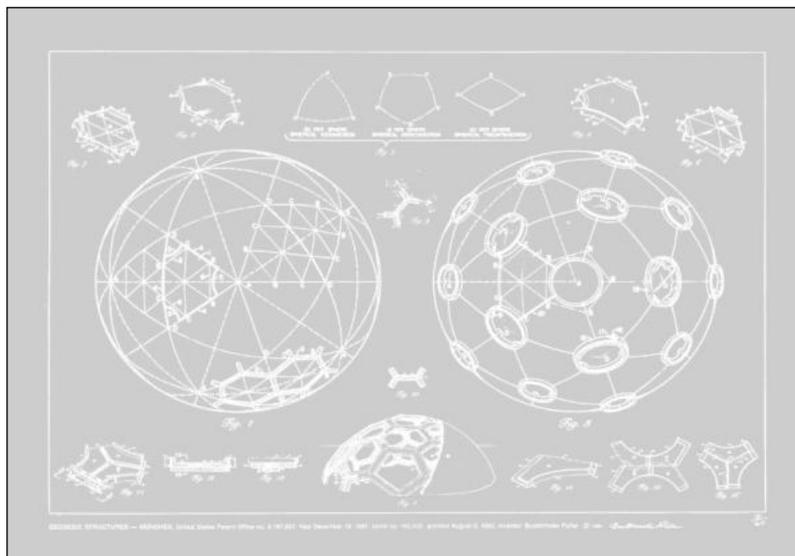
De telles réflexions ont occupés les savants, les artistes et les ingénieurs. Les hommes ont toujours été à la recherche de principes et d'explications et il est passionnant de constater les progrès ainsi réalisés dans le cycle de notre compréhension du monde.

C'est vers cet effort de la simplicité que la plupart des artistes et des constructeurs se tournent. Il s'agit d'expliquer le monde au moyen de systèmes simples, où les mathématiques ont joué un rôle prédominant.



2

Squelette de Radiolaire du Quaternaire



3

Buckminster Fuller; "Inventions: Twelve around One" an exhibit of patent documents at the Carl Solway Gallery 1981.

² HENRY ULP, M., (1999), *Radiolaires*, LCMES (2000), [on line, 05/04/2006], <http://semsci.u-strasbg.fr/radiolai.htm>

³ KRIEGER, R., LASCH, C., *Preliminary Research and Project Proposal: Geodetic Structural Technology*, CNC Milling Seminar ,[on line, 05/08/2005], <http://www.arch.columbia.edu/DDL/cad/CNC/fall98/students/krieger/research/index.html>

Les lignes et les surfaces courbes en architecture

« Analyse et réflexion, mathématique et constructive de la ligne et de la surface courbe »

Section 1 – Architecture sans architecte¹

Les premières formes d'architecture trouvent leur origine dès que les humains existent. Il s'agit de concrétisations des forces de la nature tels que le vent, l'érosion de l'eau..., dont la civilisation existante prend connaissance. Cette intelligence se manifeste au travers de conceptions vivables et fort primitives, autour desquelles évolue à fur et à mesure une vie déjà bien organisée.

Toutes les évolutions et influences naturelles provoquent alors de nouvelles manières de construction. L'homme se voit confronté à des formes plus complexes, à une architecture spontanée. L'homme construira ces premiers abris, des tentes, des cités, tout en profitant des circonstances naturelles.

Une certaine évolution technique prouve que ces idées et structures, pour nous extrêmement primitives, ont contribué au progrès technique que nous connaissons actuellement. Ainsi les nomades, au moyen de leur tente démontable ont créé une technique liée à leur propre destin, mais essentielle à leur survie.

Les origines primitives étaient néanmoins indispensables pour aboutir aux structures complexes. La technique des éléments composants, les structures flexibles et mobiles étaient déjà appréciées dans le temps. Il s'agissait d'une architecture ayant non seulement comme objectif le bien-être de l'habitant, mais aussi la beauté et l'apparence du logement. L'homme crée des espaces à son niveau.

Un remarquable progrès, par rapport au simple fait de creuser la terre ou le rocher, est d'utiliser les débris du rocher et d'empiler ces pierres les unes sur les autres. C'est le premier pas vers un important progrès pour la civilisation et son futur.



Architecture anonyme monumentale, existe sur le continent américain. Au Pérou, à mi chemin entre Cuzco et le Machupicchu, se trouve un ensemble théâtral antique. Édifié par la tribu inca des Maras, il comporte quatre théâtres circulaires et un en fer à cheval. Établi dans un cratère météorique qui devait contenir 60.000 spectateurs. Mesure de 24-40 mètres de diamètre.

¹ RUDOFISKY, B., *Architecture sans architectes*, Paris, Chêne, 1977, pp.5-15.

COUSIN, J., *L'espace vivant*, Paris, éditions du moniteur, 1980, pp.

GRUBE G-R. ; KUTSCHMAR, A., *Bauformen*, Berlin, Huss-Medien, 2004, pp.9-12.

Les igloos²

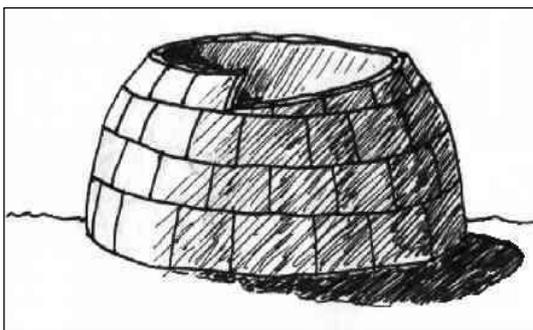
Le cercle, ou la sphère, constituait l'élément central de la culture et de la philosophie de nombreux peuples premiers. Toutes les idées ou pensées humanistes de l'époque passaient par cette vision unificatrice du cercle, lui donnant pouvoir et aspect divin. Pour l'homme, à l'époque, le cercle symbolisait un refuge « une matrice » où il se sentait en sécurité et bien protégé.

Toute chose essaie d'être ronde, le firmament, la terre, les astres. Le cercle n'étant pas une figure abstraite et parfaite est présent dans la nature environnante.

Les Inuits (Esquimaux) sont des peuples qui ont développé des formes architecturales simples pour se protéger contre les forces de la nature. Il s'agit d'une vision cosmologique essayant de répondre à un maximum de sécurité en utilisant la matière la plus courante : la neige.

Mais, confrontés à des températures glaciales, les Inuits et les Esquimaux sont obligés de calculer le volume de l'habitat pour minimaliser les pertes de chaleur.

Le cercle devenait la forme prédominante de la culture de nombreux peuples.



L'hémisphère, l'habitat en forme de cercle fournit une bonne résistance thermique et offre une excellente possibilité économique en matière d'espace, réalisé à l'aide de blocs de neige et stabilisé par leur propre masse.

² GIESE, P., (1993), *Igloo – The traditional arctic snow dome*, University of Chicago Press, 1996, [on line, 19/03/2006], <http://www.kstrom.net/isk/maps/houses/igloo.html>
RUDOLFSKY, B., *Architecture sans architectes*, Paris, Chêne, 1977.
FREI, O., *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt, 1982, pp.9-15.

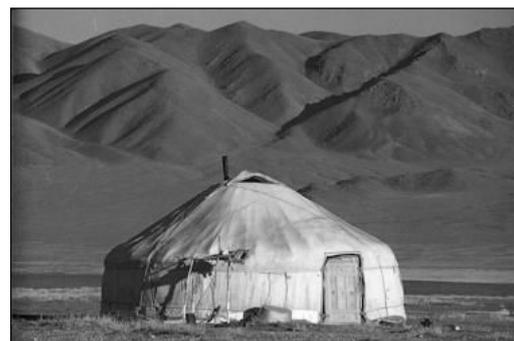
Yourtes mongoles³

Ils occupent des terrains pauvres et rocailleux, les Mongoles vivent souvent dispersés dans les montagnes avec leur famille et leur cheptel. Le pâturage maigre oblige ces nomades à se déplacer souvent. Obligatoirement ils inventent un type d'habitat adapté à leur mode de vie : la yourte. Il s'agit d'une tente en feutre mongole, d'origine turque.

Cette tente assez vaste et agréable présente l'avantage de pouvoir être montée et démontée assez rapidement. Puisque les nomades se déplacent régulièrement, cette maison mobile leur convient parfaitement. De surcroît très solide, elle résiste durant de nombreuses années aux intempéries et assure donc une longévité appréciable. Sans ancrage dans le sol, elle peut être implantée sur tout terrain.

On y trouve partout des structures identiques : murs arrondis à treillis, un toit fait de perches. Ce dernier est constitué de piquets de bois peints, soutenant un anneau central qui lui-même est parfois soutenu par deux poteaux. Tout tourne autour d'un axe central constitué par le feu.

Dans son art de construction, elle crée un lien entre l'esprit humain et les dimensions illimitées du système planétaire. Mais malgré sa beauté et sa maniabilité, elle n'a pas vraiment été considérée comme relevante de l'architecture, mais comme relevante d'un progrès technique.



4

Les yourtes sont placées soit sur le sol nu, soit sur un plancher. Ce modèle d'habitat au toit conique chez les peuples nomades représente un art primaire.

³LE GOUVELLO, J., *Mongolie vers la fin du nomadisme*, EKWO, [on line, 14/08/2005],

<http://www.ekwo.org/mongolie.php3>

RUDOFKY, B., *Architecture sans architectes*, Paris, Chêne, 1977.

⁴DEHAU, E., *Terre Mongole*, Amez, 1993.

Maison des Pouilles (Puglia, Italie)⁵

Les Pouilles, région de l'Italie méridionale qui s'étend sur les côtes en bordure de l'Adriatique et de la mer Ionienne, se caractérise par ses zones arides à l'aspect karstique, des villages pittoresques, des oliveraies et des vignobles.

L'origine du nom trulli vient du latin "turris" et du grec "torulos- trulla" ce qui nous rappelle les tours des anciens châteaux. Un ensemble de ces trulli constitue un petit village d'une blancheur éclatante, perché dans les hauteurs.

Dans leur charmante architecture on retrouve une richesse historique des anciennes traditions de construction. Ce type d'habitat subsiste depuis le deuxième millénaire avant J.C. et servait de logis à des paysans et artisans. Il s'agit d'une construction circulaire en briques d'argile dont la toiture autoportante est constituée par un polyèdre hexagonal qui se termine en forme conique.



On dispose des rangées de pierres successives ; chaque rangée débord légèrement par rapport à la rangée inférieure, si bien que les deux parois se rapprochent. On ferme l'ensemble avec un simple rangée de dalles.

Ce genre de revêtement est le plus fréquent dans la plupart des zones où prédominent les baraques. Il s'utilise aussi bien pour les cimes de plan circulaire comme quadrangulaire. D'origine antique, ce genre de structure présente de grands avantages comme l'absence de poussées latérales ou de flexions.

⁵ RUDOFISKY, B., *Architecture sans architectes*, Paris, Chêne, 1977.

Voûte conique, Observatori Euromed de la Interculturalitat i Drets Humans, [on line, 16/08/2006],

<http://www.humanrights-observatory.net/pierre-seche/voltaconicafran2.html>

ARECCHI, A., (1994), *Toitures en corbeille pour le développement*, Articoli, [on line, 16/08/2005],

<http://www.liutprand.it/trulfr.htm>

Au fur et à mesure que l'espace se ferme, les rangées de blocs se rapprochent. Pour cette raison on les appelle également voûtes par rapprochement ou avancement de rangées. On utilise pour cet aménagement des pierres planes dont l'arrangement présente une certaine dénivellation vers l'extérieur.

La fausse coupole peut atteindre une circonférence allant jusqu'à 18 mètres. Elle s'érige vers le haut au départ d'une base ronde, puis devient de plus en plus étroite et permet de couvrir un espace rond et même carré ou rectangulaire, sans devoir utiliser des composants supplémentaires. Le sommet de la coupole est fermé par une pierre plate en forme de cône, sur laquelle on placera le pinacle terminal, laissant juste une ouverture minimale qui sera finalement fermée par une pierre taillée.



⁶La fausse coupole est construite selon une technique, ou en cercles superposés de blocs disposés en rangées

L'espace de ces habitats offre une multitude de possibilités d'aménagement et d'organisation. Leurs habitants faisaient preuve d'une richesse d'imagination et d'intelligence en laissant libre cours à leur fantaisie dans l'agencement des lieux.



7



Il s'agit d'une architecture sculptée et réalisée par l'homme, qui puise ses origines dans l'antiquité. Le matériel ainsi qu'une diversité et abondance de pierres, sont présentes partout et parfaitement adapté au milieu naturel, aux circonstances de vie et aux conditions climatiques.

⁶ HERMANDEZ, A-C., *Archéologie Classique*, Université de Genève, [on line, 3/09/2005], http://www.unige.ch/lettres/archeo/introduction_seminaire/protohistoire/lipari1.html

⁷ *Les Pouilles 2004*, (1996), Ecole athenaeum, Architecture & Design, [on line, 3/09/2005], <http://www.athenaeum.ch/putrulli.htm>

Section 2 - Le berceau de plusieurs traditions architecturales

La géométrie ainsi que l'arithmétique se retrouvent dans la construction des temples grecs. Ces sciences sont fondées sur un système réglé par des rapports logiques mais aussi dimensionnels entre les parties dont ils se composent.

Les progrès de l'architecture mettent en crise le principe d'unité structurelle du classicisme grec. Ces progrès sont indissociables au point de vue scientifique et technique. La dissociation entre forme et structure sera accentuée par cette façon innovatrice de construction.

Les Grecs⁸

La période où l'architecture éclate en Grèce date du XII e. jusqu'au VII e. siècle av. J.-C. On ne trouve presque pas de sources écrites au sujet de l'architecture antique ou de la description de bâtiments. Les connaissances proviennent des restants des époques hellénistiques ou romaines dont les temples sont les seules constructions qui ont survécu.

Les Grecs se sont distingués par un esprit logique et rationnel, inspiré par la mathématique. D'après eux, tout se définit par la géométrie et, fascinés par cette idée, ils décrivaient même la nature par la géométrie des formes idéales.

C'est avec Thalès (VII-VI s. av. J.-C.), Pythagore (VI s. av. J.-C.) et Euclide (III s. av. J.-C.), nommé les pères de la première géométrie grecque, qu'ils franchirent une étape essentielle. Par de multiples expériences des génies mathématiques développaient l'idée des structures simples pour arriver à des structures complexes.

Etant à la recherche de symétrie et d'harmonie et profitant de la solidité des nouveaux matériaux, les architectes faisaient reposer le toit des temples sur des colonnes.

⁸ HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, Pour la science diffusion Berlin, 1986, pp.27-69.

RACHET G., *Chefs-D'œuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

GRUBE G-R. ; KUTSCHMAR, A., *Bauformen*, Berlin, Huss-Medien, 2004, pp.10-17.

Les trois styles connus dorique, ionique, corinthien, se différencient seulement dans la proportion et les détails, comme dans les chapiteaux des colonnes. Délaissant la voûte, les architectes se concentraient plutôt sur les éléments de construction au point de vue climat, matériau et vie sociale. Il s'agissait d'une architecture harmonieuse, parfaite en proportions, mais basée sur le rectangle. La colonne était cylindrique et les valûtes des chapiteaux ioniens et corinthiens se manifestaient en forme de spirale dans des bâtiments parfaitement rectangulaires.



Le théâtre d'Épidaure figure parmi les mieux préservés de Grèce. Sous l'Antiquité, il était déjà célèbre par l'harmonie de ses proportions]]. Il a été conçu par l'architecte et sculpteur Polyclète le Jeune au milieu du IV^e siècle av. J.-C., également responsable du tholos, remarquable pour ses colonnes corinthiennes ornées de très beaux chapiteaux.

9

Rome antique¹⁰

A cette époque la mathématique s'imposait également à l'architecture. Comme base de cette géométrie les constructeurs prenaient la droite et le cercle en considération en attachant aux formes simples une valeur symbolique.

Dans l'art architectural de cette époque la voûte réapparaissait sous forme d'anse de panier sur les portes et les fenêtres des constructions en briques ainsi que sur des ponts. Une voûte maçonnée faisait preuve d'une construction géométrique précise.

Comme reliquat de la grande Rome antique, le temps nous a laissé le Panthéon, la meilleure conservation d'un monument d'époque avec le Colisée. La construction de cet édifice a pris 10 années.

⁹ CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981, pp.172-190.

¹⁰ HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, pour la science diffusion Berlin, 1986, pp.15-131.

RACHET, G., *Chefs-D'œuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

Principalement l'architecture de ce monument est très intéressante. Le Panthéon est un ensemble de formes géométriques, coupole, rectangle, sphère jusqu'à son décor intérieur. Sa plateforme est un ensemble de dalles carrées comprenant un cercle. Des colonnes servent à soutenir le poids d'une coupole, terminée par une ouverture de huit mètres laissant entrer la lumière et donnant ainsi un éclairage particulier, soit mystérieux.



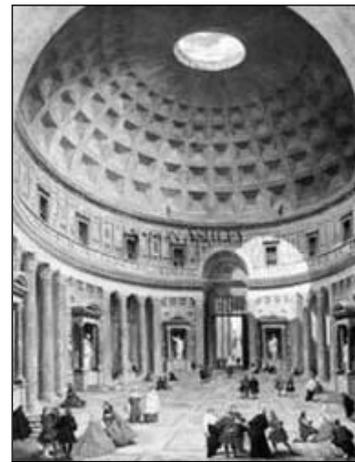
L'Amphithéâtre flavien (construit entre 70 et 80) connu aussi sous le nom de Colisée (en latin Colosseum), est un amphithéâtre de Rome qui pouvait accueillir de 45 000 à 50 000 spectateurs (87 000 selon le Petit Robert). Il forme une ellipse de 527 m de circonférence, de 188 m de long pour 156 m de large.

11

Le Panthéon (construit entre 118 et 128) s'inspire des temples grecs adoptant la même disposition. Ses huit colonnes de façade en font à elles seules un édifice particulier. Sa coupole le rend unique. D'un diamètre interne de 43 mètres, le Panthéon de Rome est une réussite architecturale dans la répartition du poids de cette gigantesque coupole qui symbolise le ciel et qui adopte une forme parfaitement hémisphérique.



12



13

¹¹ Colisée, (2006), Wikipédia, [on line, 25/11/2005], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Colis%C3%A9e>

¹² Dolce Roma, (2005), Dolce Rome Apartments, [on line, 08/04/2006],

<http://www.dolceroma.it/campo-fiori-map.htm>

¹³ CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981, pp. 172-190.

Section 3 - Construction de dômes¹⁴

L'architecture gréco-romaine présente des voûtes en berceau, des calottes et des coupoles en pierre. Ceci entraîne les architectes à résoudre un grand problème de stabilité, surtout dans les églises romanes d'Occident. Les constructions s'élevaient en hauteur, les murs présentaient une multitude de percements pour faire entrer la lumière.

Les bâtisseurs gothiques se servaient de la géométrie, contrairement à la conception de l'antiquité qui reposait sur des rapports dimensionnels entre l'ensemble et les parties. Il s'agit d'une géométrie du compas et de la règle qui deviennent des outils indispensables à la réalisation des projets. C'est avec la Renaissance et la coupole de St Maria del Fiore (Brunelleschi) que débute l'ère des nouvelles idées humanistes.

Les dômes sont souvent construits d'un seul matériau, offrant un grand volume pour une faible surface, volume proche d'une sphère. Ils permettent de réaliser des grands espaces autoportants sans piliers internes.

Etant d'une grande rigidité, ils répartissent les forces en tension et compression le long de la surface, ce qui entraîne une économie de matériaux. Ces coupoles sont faciles à chauffer et, ne possédant pas de coins, la chaleur peut se répartir facilement, mais malgré ces avantages, la construction des dômes n'est ni facile, ni rapide.



15

Dôme du Capitole, Washington DC, 1815-1830, style néoclassique. Le plan d'ensemble fut imaginé par le Français Pierre Charles L'Enfant.

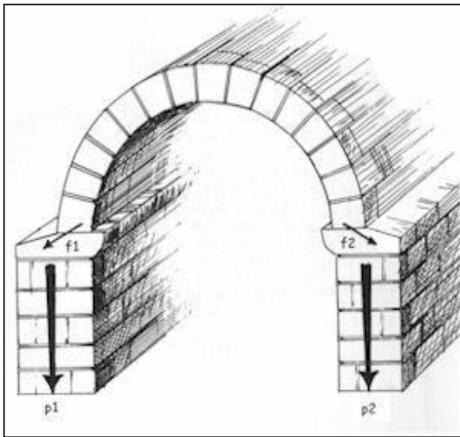
¹⁴ *Eglises entre maine et bretagne*, [on line, 22/01/2006],

<http://kosmos.chezalice.fr/eglises/lexique.htm>

CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981, pp.172-190.

¹⁵ *Dôme*, (2006), Wikipédia, [on line, 10/11/2005],

<http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%B4me>



Pour que l'arc reste stable, les pierres sont taillées en forme de coin. Chaque pierre constitue un voussoir. Une fois assemblées, elles ne peuvent pas tomber parce que leur partie supérieure est plus large que leur partie inférieure et qu'elles se serrent, par leur poids, les unes contre les autres. Néanmoins les forces mises en jeu sont importantes : la pierre centrale tend à s'enfoncer comme un coin entre ses deux voisines en exerçant des poussées latérales. Les pierres soumises à ces forces tendent à leur tour à pousser leurs voisines. De proche en proche, les poussées s'additionnent pour résulter en deux formidables poussées à la base de la voûte. Les piliers s'écartent, la voûte s'effondre.

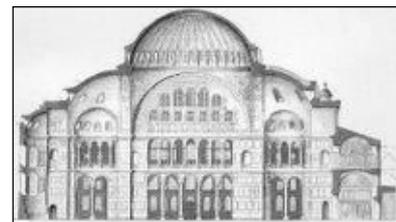
Byzance ¹⁶

L'architecture de Byzance a commencé principalement à Constantinople, la ville grecque antique de Byzantium. Elle constitue une réponse aux besoins de l'orient, c'est-à-dire l'orthodoxie et ses églises.

Ce sont des détails architecturaux qui caractérisent une architecture très diverse et riche. Elle présente une grande sobriété des lignes, devant son caractère essentiel. On y trouve des travées reposant sur des piliers surmontés d'une ou plusieurs successions de coupoles. Selon un schéma très simple, la coupole repose sur quatre piliers. Par une finalisation en stuc ou plâtre à l'intérieur, elle offre une multitude d'idées de décoration.



17



Lors de sa construction (532-537), Hagia Sophia était le plus grand édifice chrétien au monde. La hauteur sous la grande coupole est de 56 mètres. Elle est construite en briques légères et son diamètre initial est de 38 mètres. Prouesse technique, les dimensions de cette coupole restèrent insurpassées pendant près de 1000 ans.

¹⁶ CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981. *Hagia Sophia*, (2006), Wikipédia, [on line, 10/11/2005],

http://de.wikipedia.org/wiki/Hagia_Sophia

¹⁷ *Architecture romane*, (2006), Wikipédia, [on line, 10/11/2005],

http://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_romane

La voûte est réalisée en briques brutes. On la retrouve sur des portes, des ponts, des fenêtres de châteaux ou d'églises.

Architecture romane¹⁸

Les constructeurs romans ne s'inspiraient plus de la géométrie grecque pure. Ils trouvèrent une combinaison de formes simples, les carrés, les rectangles, les cercles, les triangles, auxquelles ils attachaient des valeurs symboliques.

L'architecture romane remplaçait la charpente en bois par la maçonnerie pour des grands édifices et ce pour lutter contre les risques d'incendies multiples et destructions rapides opérées par les envahisseurs.

En comparant la pierre et le bois, la pierre était plus favorable, elle était inflammable et offrait une résistance à la compression supérieure au bois, mais elle pesait bien plus. Par conséquent la construction d'une voûte devenait plus lourde et son poids réparti sur les murs qui la soutiennent posait une grande problématique. On préfère désormais des points d'appui solides et résistants et des espacements moins considérables.

On créait des édifices monumentaux qui produisaient une série d'arcs posés en diagonale et sur lesquels reposaient quatre triangles de remplissage indépendants les uns les autres.



19

Le rez-de-chaussée du farinier de l'abbaye ; Le problème majeur que les bâtisseurs de cette époque ont dû résoudre consiste dans le poids formidable de la voûte en pierre qui couvre la grande nef centrale.

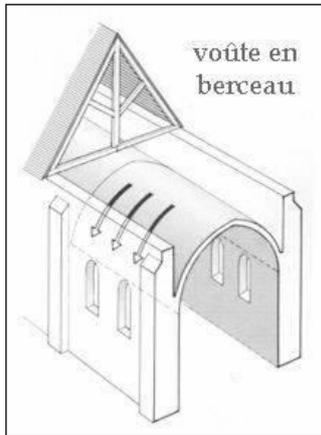
¹⁸ CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopaedia universalis, Mondiale, 1981. *Architecture romane*, (2006), Wikipédia, [on line, 15/11/2005],

http://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_romane

RACHET G., *Chefs-D'œuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

¹⁹ *Architecture romane*, (2006), Wikipédia, [on line, 10/11/2005],

http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Cluny_farinier_interieur_rdc.jpg



La voûte la plus simple a la forme d'un demi cylindre et s'appelle "voûte en berceau". Elle est posée sur le haut des murs et ressemble à un long volume perdu dans l'ombre, les fenêtres étant situées bien en dessous. Ces fenêtres sont étroites car la voûte pèse sur toute la longueur des murs, ce qui interdit de les éviter.

20

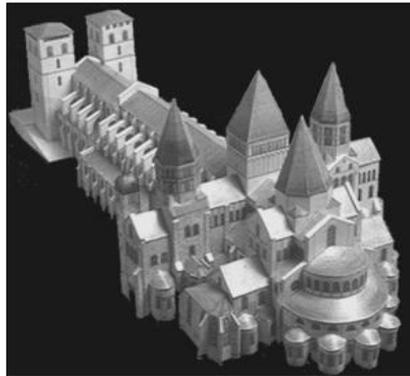
Les maîtres bâtisseurs romans vont trouver divers moyens pour contrebalancer la poussée exercée par la voûte, de telle sorte que les édifices pourront gagner en hauteur.

L'un de ces moyens consiste à opposer une force de contrebutement à la poussée latérale. Cette force sera transmise par les tribunes aménagées au-dessus des nefs collatérales. Les demi berceaux (petits arcs de cercle qui rejoignent la base de la tribune avec la base de l'arc plein cintre) exercent une force dynamique qui s'oppose à la force d'écartement des murs. Les murs de la tribune seront percés d'ouvertures qui permettront d'éclairer l'intérieur. Le triforium désigne la galerie ajourée qui donne sur la nef.

Un autre moyen : la voûte en berceau est consolidée par l'adjonction, à intervalles réguliers, d'arcs transversaux ou doubleaux. Les bâtisseurs romans utiliseront également la voûte d'arêtes : deux berceaux qui se croisent à angle droit. Cette technique permet d'orienter les charges sur les 4 piliers qui soutiennent les arcs, permettant ainsi de soulager les murs qui peuvent s'ouvrir davantage pour laisser entrer la lumière.

Un arc est une structure de maçonnerie de forme courbe. Il est dit en plein-cintre, si la courbe est en forme de demi-cercle ; il est dit brisé si le sommet de la courbe forme un angle aigu : il peut aussi être surhaussé, en ogive.

Les voûtes sont des ouvrages de maçonnerie qui recouvrent un édifice. La voûte exerce une charge sur les murs qui la supportent. La force de la charge s'exerce selon une poussée latérale qui tend à les écarter. À la fin de l'époque romane, on enrichit le procédé par des nervures qui répartissent mieux encore les charges vers les piliers ou les colonnes.



21

L'abbaye de Cluny : Au début du XIIe siècle, c'est la plus grande église de la chrétienté. Ce symbole de l'art roman, fut malheureusement détruit en grande partie au début du XIXe siècle.

Architecture gothique²²

Cette architecture se répandait en Europe au milieu du XVI e s. L'architecture gothique s'identifiait très fort autant qu'à la philosophie qu'à la technique. D'une part on rêvait de l'unité et de l'ordre, d'autre part dominait l'idée de la raison et de la volonté divine. Le style gothique était marqué d'un esprit religieux, comme le témoignent les cathédrales gothiques manifestant le pouvoir et la grandeur de Dieu.

C'est en effet la recherche de la lumière qui exige la légèreté des structures gothiques. C'est une évolution des techniques. Alléger le bâtiment ou l'utilisation nouveau du verre joue un rôle prédominant. Utilisé dans des surfaces très grandes, le verre permet de diminuer le poids de l'édifice. Les bâtisseurs arrivent à atteindre des nouvelles dimensions dans leur architecture.

En ce qui concerne la technique, il fallait réfléchir sur la robustesse des arcs en plein cintre. D'une part, aptes à la construction d'une nef simple munie d'une voûte en berceau, les arcs ne convenaient pas à la croisée du transept et de la nef. Aux diagonales de l'intersection, il en résultait des arcs elliptiques fragiles.

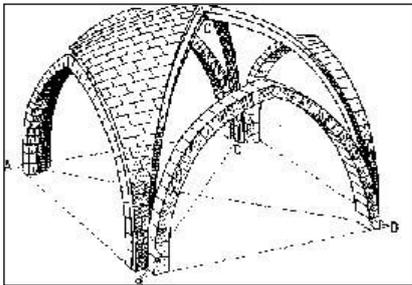
En solution, il fallait réserver la robustesse des arcs en plein cintre aux diagonales de la croisée, appelée croisée d'ogives.

²¹ DE BUSSAC, L., *Abbaye de cluny*, Editions *l'instant durable*, [on line, 10/04/2006], http://www.instantdurable.com/ID_Maquettes/religieux/cluny.htm

²² HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, Pour la science diffusion Berlin, 1986, pp.15-131.
RACHET G., *Chefs-D'œuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

La projection orthogonale de cette croisée selon l'axe de chacune des nefs donnait une demi ellipse posée dans la hauteur et étant très résistante en son sommet.

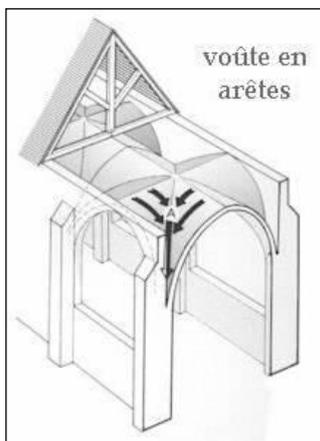
L'arc brisé et la croisée d'ogives permettaient de canaliser les forces et de les concentrer sur des piliers. Ainsi le poids de la structure ne posait donc plus sur des murs, il était concentré sur un chevalet ogive- pilier - arc-boutant. Ce système de construction étant perfectionné de plus en plus permettait de porter encore à plus grandes hauteurs des voûtes sur croisée d'ogives.



24

Voûtes sur croisée d'ogive²³

Pour soutenir le poids des voûtes sur croisée d'ogive, on a utilisé la technique des arcs-boutants. Un arc-boutant est l'élément d'appui en forme de demi-arc situé à l'extérieur de l'édifice; il repose sur un contrefort et soutient le mur là où s'exercent les plus fortes poussées des voûtes sur croisées d'ogive.



25

La "voûte d'arêtes" permet de résoudre ce problème. Pour comprendre sa forme, il faut imaginer deux demi cylindres se pénétrant à angle droit. Dès lors, la voûte s'appuie seulement sur quatre points qu'il suffit de renforcer .L'ouverture de grande fenêtres est possible sans mettre en péril la stabilité.

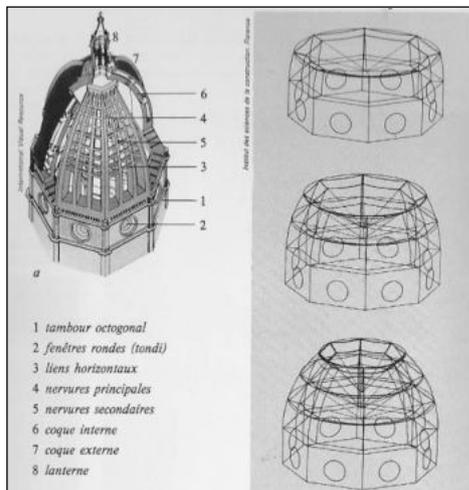
²³ *Deux architectures différentes*, (2001), International School of the Peninsula, [on line, 19/08/2005], http://www2.istp.org/StudentsCorner/StudentCorner2000_2001/College/8th/SiteWebTechno4/SWMarine/PageWeb/page-agII.html

²⁴ *Eglise entre maine et Bretagne*, [on line, 20/03/2006], <http://kosmos.chez-alice.fr/eglises/lexique.htm>

Renaissance²⁶

Pendant les derniers siècles du Moyen-Age le style gothique avait été la règle. En Italie le style de la Renaissance a remplacé le style gothique, qui lui puisait à la source de l'Antiquité.

L'apparition des grands architectes, Brunelleschi, Palladio, Alberti ..., favorisait le développement de ces nouvelles règles. Non seulement, la mathématique et les règles de proportions définissaient l'équilibre architectural, la géométrie et la science des nombres en créaient l'harmonie.



27

Voulant édifier la coupole, il s'est inspiré du Panthéon, mais il faut souligner que la réalisation présente des différences: en effet il y a deux coupoles, l'une à l'intérieur de l'autre qui forment un extrados et un intrados. La coupole de cette cathédrale n'est pas hémisphérique. Par sa forme elle est proche d'une caténoïde, d'où sa résistance.

La construction de la coupole de la cathédrale « Santa Maria del fiore » (1423-1434) a été une des plus grandes entreprises de la Renaissance, et enfin elle est devenue le symbole de Florence grâce au génie de Brunelleschi.

D'abord, on doit dire que Brunelleschi a été le premier qui a appliqué la perspective scientifique, la technique qui a permis de représenter les trois dimensions. Après avoir passé quelques années à Rome pour étudier l'architecture du Panthéon, il donne naissance au projet de son chef d'oeuvre, la coupole de la cathédrale.

²⁶ Renaissance, (2006), Wikipédia, [on line, 19/08/2005],

http://fr.wikipedia.org/wiki/Renaissance_%28p%C3%A9riode_historique%29

JJEANDROZ, P., Renaissance italienne, (2005), edelo, [on line, 21/10/2005],

<http://www.edelo.net/italie/art.htm>

²⁷ CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopaedia universalis, Mondiale, 1981, pp.172-190.

Brunelleschi avait observé que la couverture du Panthéon était très grande, mais au même temps très légère, parce qu'on avait utilisé la technique des caissons et un châssis de tuyaux vides pour rendre la structure plus souple. Brunelleschi reprend le style gothique plutôt que le style roman, qui était caractérisé par l'arc en plein cintre.

Ce style de la Renaissance se soumettait à des principes esthétiques supérieurs, à des concepts abstraits comme la symétrie, les proportions et la régularité. On y constatait un système d'ordres qui devait présider à toute création architecturale.

Quelques artisans de cette époque, Brunelleschi par exemple, puisaient leurs idées des formes antiques. La colonne, l'élément caractéristique de l'architecture antique était remise à l'honneur. La coupole sur pendentifs et la voûte en pendentifs constituaient des nouveautés.



28

Section 4 - Développement de l'architecture à base d'ellipse

Baroque²⁹

La nouvelle architecture utilise les éléments anciens : les colonnes, les tours, les coupoles et les nouveautés, soit les fenêtres elliptiques, œil de bœuf, frontons brisés....

²⁸ *Florence Churches-World guide to Florence*, (2000-2005), Copyscap, [on line, 20/08/2005], <http://www.florence.world-guides.com/churches.html>

RACHET G., *Chefs-D'œuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

²⁹ *Baroque*, (2006), Wikipédia, [on line, 19/08/2005], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Baroque>

CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981.

Elle se défait des règles classiques étant à la recherche de variété et d'originalité. Les nouvelles églises sont construites sur un plan central, parfois elliptique, avec des chapelles et une croisée couverte d'une coupole, ainsi que des tours de niveaux divers.

Borromini et Berenini, célèbres bâtisseurs de l'époque associent les formes du temple grec avec des coupoles. Ils se servent de tours qui changent de forme, des façades courbes, convexes et concaves.



30

Le Bernin conçoit ensuite la place Saint-Pierre de Rome. La coupole de Michel-Ange n'est pas hémisphérique.



31

L'église San Ivo della Sapienza, construit 1642 and 1650, architecte Francesco Borromini.

RACHET G., *Chefs-D'œuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

GRUBE G-R. ; KUTSCHMAR A., *Bauformen*, Berlin, Huss-Medien, 2004, pp.40-140.

³⁰ CAMPION, M-D., *Saint pierre et le vatican*, [on line, 19/08/2005], Académie amiens,

<http://www.ac-amiens.fr/etablissements/0601408e/Voyages/Italie/vatican.htm>

³¹ CLEARY, R., *S. Ivo della Sapienza*, (2001), University of texas at Austin, [on line, 10/09/2005],

<http://arch.utexas.edu/AV/ARC318L/glossary/building/ivo.html>

Les éléments qui illustrent le mieux son style sont la coupole et la façade, la coupole étant ovale et lambrissée, décorée par des dessins géométriques. Dans l'architecture baroque, l'accent est mis sur l'aspect massif et chargé (dômes, colonnes, effets de peinture.....).

En architecture, en ce qui concerne les intérieurs, le mouvement baroque se manifestait sans précédent.



32

La construction de l'église baroque St Nicolas à Prague commence en 1673 dans le style baroque, sur les dessins du célèbre architecte Christophe Dientzenhofer.

L'Art Nouveau³³

L'Art Nouveau est un mouvement artistique de la fin du XIX^{ème} et du début du XX^{ème} siècle. Quand on parle de cet art, on pense à des lignes, spécialement aux lignes courbes.

Comme le nom "Art Nouveau" fait pressentir, il s'agit d'un style recherchant du nouveau, contraire aux idées du style classique. Pour la première fois les architectes ont choisi le fer comme métal très malléable pour réaliser leurs constructions. L'utilisation de l'acier a également permis l'évolution architecturale d'immeubles de plus en plus hauts allant jusqu'aux gratte-ciel.

La tour Eiffel par exemple fait preuve d'une certaine légèreté malgré sa masse et son poids, grâce à des lignes à dentelles ou des lignes courbes.

³² SCRIVAT, M., *L'église Baroque St Nicolas à Prague*, (2006), Les pages culturelles d'EnkiEa, [on line, 10/09/2005], http://www.asso-chc.net/article.php3?id_article=116

³³ HUSTACHE A., *Victor Horta, Maisons de campagne*, Bruxelles, Editions du Musée Horta, 1994
GRUBE G-R. ; KUTSCHMAR A., *Bauformen*, Berlin, Huss-Medien, 2004, pp.10-17.
SEMBACH, K-J., *Jugendstil*, Cologne, Taschen, 2000, pp.40-140.
CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981, pp.264-334.

De toutes les expressions de l'Art Nouveau, la forme « naturaliste », caractérisée par ses lignes courbes, l'asymétrie de ses compositions et son iconographie empruntant à la faune et à la flore, fut la plus marquée. Ces propositions esthétiques s'affichent dans les rues et sur les façades des bâtiments publics et privés qui présentent des baies aux lignes adoucies et souples ainsi que l'emploi de matériaux comme le fer forgé et la céramique.

L'idée principale qui définit ce mouvement architectural est le résultat d'une pensée rationnelle dont fait preuve surtout E. Viollet-le-Duc. Il évoque deux principes : la liberté du choix des matériaux et la forme du bâtiment qui sera adéquate à la technique et à sa fonction. On parle donc d'une architecture plutôt harmonieuse. 1900 marque le sommet de cet art aux formes inspirées par la nature et aux courbes. On parle d'une architecture colorée et richement décorée. Ce style meurt vers 1910.



Victor Horta (1861-1947) ; Maison Tassel

Dans chacune de ses compositions, Horta jouait avec les lignes droites et courbes, les mariant sans jamais perdre de vue les impératifs de la construction. Il avait parfaitement compris que la courbe pouvait apporter attrait, féminité, personnalité et dynamique. Elle offrait une infinie diversité d'expressions, de nuances et de finesses. Mais il avait aussi bien compris qu'il fallait en user avec une retenue et une modération extrême.

34



Antoni Gaudí (1852-1926) ; Parc Guell.

Sept biens construits par l'architecte Antoni Gaudí à Barcelone ou à proximité, témoignent de la contribution créative exceptionnelle de Gaudí au développement de l'architecture et des techniques de construction à la fin du XIXe et au début du XXe siècles.

35



Hector Guimard (1867- 1942) ; Castel Béranger

Son vocabulaire stylistique inimitable procède d'un organicisme végétal particulièrement suggestif, tout en restant résolument sur le versant de l'abstraction.

36

³⁴ SEMBACH, K-J., *Jugendstil*, Cologne, Taschen, 2000, pp.40-140

³⁵ *Ceuvres d'Antoni Gaudí*, Patrimoine mondial, [on line, 11/04/2006], <http://whc.unesco.org/fr/list/320/>



Henry van de Velde (1863-1957) ; Ensemble de salon, vers 1897-1898.
 Ces lignes fluides et ondulantes prévalent; elles font penser à des motifs de plantes.

37

Autres célèbres architectes :

-Gustave Serrurier-Bovy (1858-1910)

-Louis Majorelle (1859-1926)

-Henri Sauvage (1873-1932)

Section 5 – Recherche de nouvelles formes architecturales

Le 20^{ème} siècle³⁸

Après la première guerre mondiale, sous l'influence de grands architectes comme le Corbusier, l'aspect des constructions se simplifie, rejette toute ornementation et se diversifie.

Les projets sont démonstratifs, ils proposent des modèles précis, constructibles.

Ils font appel à une sorte d'éclatement de l'unité formelle du mouvement donnant accès à des voies multiples. On parle d'objets parfaits, qui se conjuguent avec l'espace et avec le temps, tandis qu'on reste d'accord sur un principe, qui est celui du dépouillement.

³⁶ Hector Guimard, (2006), Wikipédia, [on line, 11/04/2006],

http://fr.wikipedia.org/wiki/Hector_Guimard

³⁷ WOLFERS, P., (2001), *Art Nouveau & Design, La tribune de l'art*, [on line, 11/04/2006],

http://www.latribunedelart.com/Expositions_2005/Art_Nouveau_363.htm

³⁸ FREI, O., *Zugbeanspruchte Konstruktionen*, Berlin, Ullstein Fachverlag, 1966.

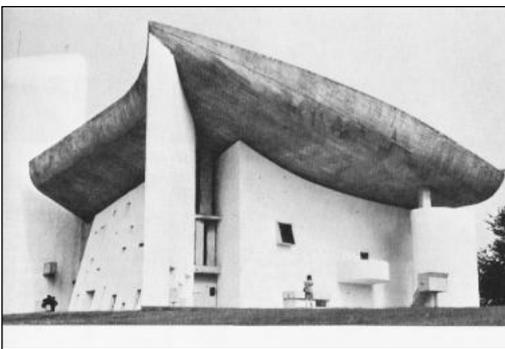
JODIDIO, P., *Formes nouvelles*, Köln, Taschen, 2001, pp.7-51

CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981, pp.8-11.

La forme vise à la création d'un espace signifiant. Par ces recherches les artistes parviennent à modifier la manière de voir les formes et leurs fonctions. Il s'agit de créer une autre architecture, de donner aux formes la plus grande liberté possible.

Les données de l'architecture se sont transformées radicalement. Cela tient en premier lieu au changement des conditions objectives : réduction du marché, abandon des grands programmes à l'échelle industrielle.

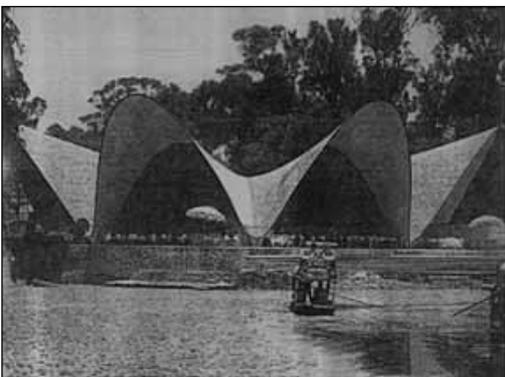
Aujourd'hui, une nouvelle vague de projets utopiques est apparue.



Le Corbusier avait cru apporter au mouvement moderne une correction pour lui assurer un nouvel avenir.

Ronchamp, Le Corbusier, 1986

39



Felix Candela ; Los Manantiales Restaurant, Xochimilco, Mexico 1958

Structure en voiles minces , parabolöide hyperbolique

40



Jeux Olympiques de 1972, Munich ; Frei Otto

Animés par l'idéologie du progrès, Frei Otto imagine les couvertures des espaces sportifs ; elles sont réalisées en structures tendues de câbles d'acier, habillées de polyester transparent.

41

³⁹ WAGNER, (1997), *L'Art Sacré au XXe siècle en France*, Micromégas, [on line, 09/04/2006],

<http://www.en-lorraine.com/micromegas/sommaire.htm>

⁴⁰ School of Architecture, Mc Gill university, [on line, 09/04/2006],

http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkes/D+C-winter-2005/pavillions_concrete/Page.html



42



La maison ronde a été réalisée en 1981 dans le Tessin, canton de Sud de la Suisse proche de la frontière italienne. Mario Botta inscrit un programme d'habitat unifamilial dans une forme géométrique simple et élémentaire, le cylindre. La construction a un diamètre de 12m environ pour une hauteur totale de 9m. La façade principale est orientée vers le Sud.

Les espaces intérieurs sont organisés autour d'un axe nord-ouest où prend place l'escalier reliant les différents niveaux et sur lequel converge un éclairage zénithal.

Conclusions

L'architecture romane trouva son propre style (simplicité des formes et petites ouvertures). À l'époque gothique, petit à petit, les formes devinrent plus élancées et la décoration plus abondante. On construisit des cathédrales immenses, avec des fenêtres de plus en plus hautes, des arcs pointus au-dessus des portes et des ouvertures. Les plafonds étaient généralement faits d'une série d'arcs croisés.

Au fil du temps, les architectes changèrent le style des bâtiments pour l'adapter à l'époque à laquelle ils vivent. Aujourd'hui, à côté des briques et des pierres, les constructeurs utilisent de nouveaux matériaux qui ont changé la façon dont les bâtiments sont construits : il s'agit du béton, de l'acier, du verre et du plastique. Les architectes dessinent des bureaux, des usines, et des terrains de sports en utilisant au mieux ces nouveaux matériaux. Les bâtiments sont plus grands, leurs formes plus simples et, surtout, ils sont construits beaucoup plus vite.

⁴¹ CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981, pp.336-390.

⁴² *La Maison Ronde de Mario Botta*, Audience, [on line, 12/04/2006], <http://audience.cerma.archi.fr/cerma/pageweb/reference/botta/botta1.html>

L'architecture montre la fonction essentielle que l'architecte a attribuée au bâtiment, ce qui définit l'usage ou le symbole de son oeuvre. L'architecte contemporain tend à valoriser la statique et l'usage tandis que l'architecte de l'époque classique valorisait plutôt les fonctions symboliques.

Les courbes mathématiques

Section 6 - Les courbes deux- dimensionnelles⁴³

Pendant de nombreux siècles il a plu aux philosophes de considérer les mathématiques d'une part comme une vérité par excellence et d'autre part comme une certitude inébranlable. C'est par Euclide que la géométrie a été formalisée. Les géométries non euclidiennes ont joué un rôle très important dans l'histoire de la géométrie et son élaboration.

L'histoire des géométries non-euclidiennes commence avec l'antiquité et les travaux d'Euclide sur la formalisation de la géométrie. C'est au 3ème siècle av. J-C qu'Euclide pose les premiers fondements de cette branche des mathématiques. Dans son oeuvre il fonde la géométrie en posant des définitions, des principes qu'il nomme demandes et des théories qu'il nomme notions communes.

L'intension de ce chapitre est de répertorier par démonstrations quelques propriétés mathématiques remarquables des formes et corps géométriques.

Célèbres mathématiciens :

⁴⁴Premier savant, philosophe mathématicien et physicien connu. **Thalès** naquit à Milet (située sur la côte méditerranéenne de l'actuelle Turquie) vers 625 avant J.C. Il est considéré comme l'un des " Sept Sages de la Grèce".

⁴³ LOMBRY, T., *La théorie de la relativité, Mensa*, [on line, 17/01/2006], <http://www.astrosurf.com/lombry/relativite-geometrie-noneuclidienne.htm>

HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, Pour la science diffusion Berlin, 1986.

⁴⁴ VERSPEETEN, A., *Thales updated : on hearing lang lang*, (2002), Texas Chapbook Press, [on line, 15/08/2005], <http://www.texaschapbookpress.com/magellanslog49/onhearinglanglang.htm>

⁴⁵**Pythagore** (-582 à -490) est un grand philosophe et mathématicien de la Grèce Antique. Il croyait que la terre était sphérique, que le soleil, la lune et les planètes avaient chacun leur propre mouvement.

⁴⁶La géométrie telle qu'elle est définie par **Euclide** (-365 à -300) fut considérée pendant des siècles comme la géométrie et il fut difficile de lui ôter cette prééminence. Le postulat d'Euclide révèle que par un point pris hors d'une droite il passe une et une seule parallèle à cette droite.

⁴⁷**Archimède** est né à Syracuse (-287 à -212) en Sicile. Fameux travaux sur la mesure du cercle (π). Les plus grandes contributions d'Archimède se retrouvent en géométrie dans lesquelles il anticipe le calcul intégral, 2000 ans avant Newton et Leibniz. Il travaille également sur le centre de gravité des figures planes et des solides.

⁴⁸**Apollonius De Perga** (-262 à -190), mathématicien et astronome grec, a réalisé un traité complet et des très beaux résultats sur les sections coniques (intersection d'un plan et d'un cône). Apollonius le premier, obtient toutes les coniques avec un unique cône, en faisant varier la direction du plan, et, comme il considère des cônes doubles, il obtient deux branches pour les hyperboles. Il remarque une relation simple entre la projection d'un point sur un axe de symétrie et la distance à un sommet, ce qui revient à donner une équation cartésienne de la conique.

49

Pappus d'Alexandrie (290 à 350), étudie la théorie des proportions et classe les constructions géométriques en trois groupes : celles qui se font avec des droites et des cercles; celles qui utilisent en plus des sections coniques; celles qui font appel à des courbes. Pappus s'intéresse aux coniques. Il étudie les propriétés du foyer et des directrices. Il semble qu'Apollonius connaissait déjà ceux-ci pour les coniques à centre, mais il est certain que Pappus innove pour la parabole.

Comme :

Blaise Pascal (1623 à 1662) : écrit un remarquable essai sur les coniques.

Leonard Euler (1707 à 1783) : Dans un polyèdre, la somme du nombre de sommets S et de faces F est toujours égale au nombre de côtés

Carl Friedrich Gauss (1777 à 1855) : Il conçoit une géométrie particulière, la géométrie des surfaces courbes qui devance les géométries non euclidiennes.

Qui vont marquer l'histoire de la science et des mathématiques, en particulier par leur grande rigueur d'analyse et leur sens de l'expérience.

⁴⁵ Rub, Y., *Pythagore*, (2006), Atrium, [on line, 15/08/2005], <http://www.yrub.com/phil/pythagore.htm>

⁴⁶ ARMANO, T., (2006), *Seminario Nazionale di Ricerca in Didattica della Matematica*, [on line, 17/01/2006], <http://www.dm.unito.it/semdidattica/index.php>
 Euclide, (2006), Wikipédia, [on line, 19/08/2005], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Euclide>

⁴⁷ DUFRESNEY, D., *Qu'est-ce qu'un nombre ?*, Enigma, [on line, 12/04/2006], http://www.cerimes.fr/e_doc/nombre/archime.htm

⁴⁸ GENARD, S., (2000), *Apollonius De Perga*, IREM, [on line, 12/04/2006], http://www.reunion.iufm.fr/Recherche/IREM/histoire/appolonius_de_perga.htm

⁴⁹ GENARD, S., (2000), *Pappus d'Alexandrie*, IREM, [on line, 12/04/2006], http://www.reunion.iufm.fr/recherche/irem/histoire/pappus_d_alexandrie.htm

Le cercle⁵⁰

A chaque époque de l'histoire universelle on a considéré que le cercle est la figure géométrique parfaite. On lui attribue la particularité d'être « rond » et ceci surtout dans un espace euclidien. Pour la plupart des gens, de nombreuses formes plus ou moins régulières sont représentées par la forme d'un cercle : le soleil, une roue, ...

On parle d'un cercle étant une ellipse dont les foyers sont confondus à son centre. Le cercle est un cas particulier d'un polyèdre avec une infinité de côtés. Il est une courbe plane dont tous les points sont à égale distance d'un point fixe appelé «centre ». Cette distance commune est nommée «rayon».



51

Stonehenge (3050-1500 av. J.-C.) se compose de 4 ensembles concentriques de pierres. L'ensemble externe est constitué de grands blocs de grès rectangulaires qui forment un cercle de 30 mètres de diamètre. Ces blocs étaient à l'origine surmontés d'un linteau en pierre qui les joignait en un cercle continu. A l'intérieur se trouve un deuxième mégalithe constitué de blocs de grès plus petits.

⁵⁰Cercle, (2006), Wikipédia, [on line, 25/02/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle>

HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris,

Pour la science diffusion Berlin, 1986, pp.15-131.

FERRÉOL, R., (2001), *Cercle, Anneau des Mathématiques Francophones*, [on line, 20/03/2006],

<http://www.mathcurve.com/courbes2d/cercle/cercle.shtml>

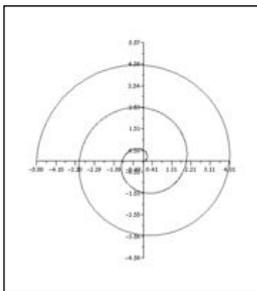
⁵¹ ROSCHER, W-E., (1999), *Stonehenge*, National geographic Society, [on line, 26/02/2006],

<http://www.nationalgeographic.com/xpeditions/activities/04/popup/stonehenge.html>

Les spirales⁵²

En sciences mathématiques la spirale se définit comme courbe plane tournant autour d'un point ou d'un axe central en s'éloignant et en se rapprochant selon la manière dont on suit la courbe.

Il existe plusieurs types de spirales à deux dimensions :



La spirale d'Archimède est la trajectoire d'un point se déplaçant uniformément sur une droite d'un plan. Cette droite tourne elle-même uniformément autour d'un de ses points. On parle alors d'un centre de rotation.

La spirale hyperbolique ainsi que la spirale logarithmique possèdent une branche en spirale, dont la longueur, contrairement à celle de la spirale logarithmique est infinie.

Il s'agit d'une projection conique plane d'une hélice circulaire. Elle est à comparer avec la perspective plongeante d'un escalier en colimaçon.



La structure de la spirale d'or représente deux formes connues de la géométrie :

- La spirale du nombre d'or (ϕ)
- La spirale de Fibonacci (qui est composé des arcs de cercles)

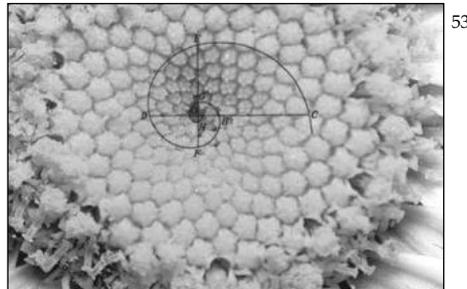
⁵² Spirale, (2006), Wikipédia, [on line, 25/02/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Spirale>
 FERRÉOL, R., (2001), *Spirale*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 20/03/2006], <http://www.mathcurve.com/courbes2d/spirale/spirale.shtml>
 HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, Pour la science diffusion Berlin, 1986, pp.15-27.
 RACHET G., *Chefs-D'œuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

«Phi» est une valeur constante, un nombre irrationnel qui n'a pas de solution arithmétique : les décimales se poursuivent à l'infini sans se répéter.

$$\Phi = 0,6180333887... \quad \text{la formule : } \Phi/1 = 1/1 + \Phi$$

On retrouve ce nombre incorporé dans toutes les structures organiques connues : la disposition des graines du tournesol, la spirale d'un coquillage, la structure osseuse de l'être humain...

La proportion « phi » semble être un modèle géométrique de la vie elle-même. Platon l'a même appelée « la clé de la physique du cosmos. » Les grecs trouvaient que le rectangle d'or avait les plus belles proportions.



Le mathématicien italien Fibonacci, qui faisait de la recherche sur la reproduction de lapins, a découvert une séquence de nombres, appelés les nombres de Fibonacci et caractérisés par le fait que chacun d'entre eux représente la somme des deux nombres qui le précèdent.

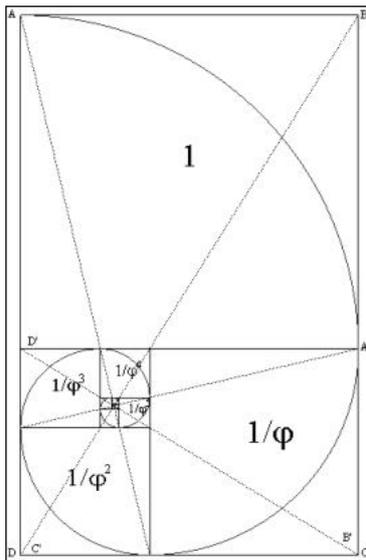
$$0,1,1,2,3,5,8,13,21,34,55,89,144,233,377...$$

$$(0+1=1 ; 1+1=2 ; 1+2=3 ; 2+3=5 ; 3+5=8 ; \text{etc.})$$

Les nombres des spirales au fond d'une fleur, sur une pomme de pin, sur l'ananas etc. peuvent être exprimés **uniquement** par des nombres de Fibonacci.

Exemple : Si le nombre des spirales du fond d'une fleur est 34 dans un sens, le nombre des spirales dans l'autre sens **doit être** 21 ou 55.

⁵³ Spirale, (2006), Wikipédia, [on line, 25/02/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Spirale>
 FERRÉOL, R., (2001), Spirale, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 20/03/2006], <http://www.mathcurve.com/courbes2d/spirale/spirale.shtml>



Les nombres de Fibonacci ont une propriété très intéressante. Lorsqu'on divise en séquence un nombre par le nombre qui le précède, on obtient deux nombres qui sont très proches l'un de l'autre. C'est ce qu'on appelle « la proportion dorée » ou « le nombre d'or ». Il s'agit d'un nombre irrationnel, on ne l'atteint jamais avec exactitude.

$$233/377 = 0,6180371\dots$$

$$377/610 = 0,6180327\dots$$

La spirale a toujours été d'un grand intérêt pour les mathématiciens, d'une part parce que le nombre d'or et la spirale sont indissociables et que d'autre part cette spirale est devenue un emblème universel de la vie. Les courbes de la spirale sont toujours les mêmes et la forme principale ne varie jamais. En mathématiques aucune autre forme ne possède une telle propriété.

L'ellipse⁵⁴

Cette forme géométrique est souvent confondue avec l'ovale. L'ovale, qu'on a inventé au XIX s., se dit de toute courbe plane fermée imitant l'ellipse, composée de quatre arcs de cercle qui se raccordent et dont la forme rappelle un peu celle d'un oeuf. On le trouve souvent dans les décors de l'art nouveau.

Contrairement à l'ellipse, les formes ovales ou ovoïdes ont un centre de symétrie, mais pas d'équation mathématique. Il faut les définir par des segments. Quant à l'ellipse, il s'agit d'une courbe plane convexe fermée, possédant deux axes de symétrie, et dont chaque point est tel que la somme de ses distances à deux points fixes, appelés « foyers » est constante. Cette courbe fait partie de la famille des coniques.

⁵⁴Ellipse, (2006), Wikipédia, [on line, 25/02/2006], <http://de.wikipedia.org/wiki/Ellipse>

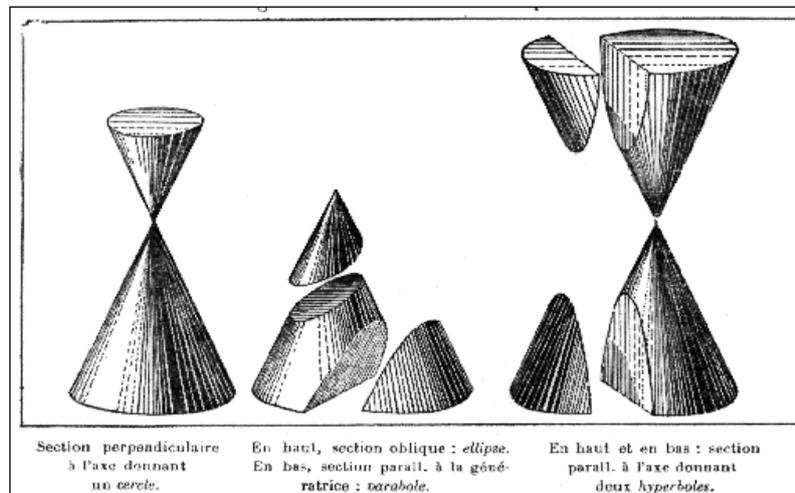
FERRÉOL, R., (2001), *Ellipse*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 20/03/2006], <http://www.mathcurve.com/courbes2d/ellipse/ellipse.shtml>

Conique, (2006), Wikipédia, [on line, 25/02/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Conique>

Apollonius de Perge étudie et nomme tous les trois types des coniques :

L'ellipse, la parabole, l'hyperbole.

Il décrit leur construction à partir d'un cône de révolution coupé par un plan.

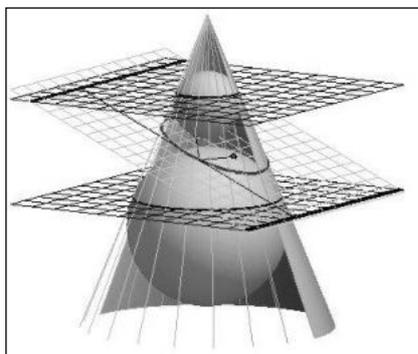


55

Elle est obtenue par l'intersection d'un plan avec un cône de révolution. Si on regarde un cercle en perspective on aperçoit une ellipse, le cercle lui-même étant un cas particulier d'ellipse.

En observant les planètes et les astres, on remarque que les trajectoires de ces corps tournent en forme d'ellipse autour d'une autre planète ou d'une étoile.

On retrouve cette propriété dans l'optique illusionniste, moyennant des miroirs elliptiques ou dans certains instruments optiques. Dans ce cas un rayon lumineux passant par un des foyers, étant réfléchi, passe par un autre foyer.



56

Les 2 sphères inscrites dans le cône et tangentes au plan de l'ellipse le sont aux foyers de celle-ci, et les plans des cercles de contact coupent le plan de l'ellipse en deux directrices.

⁵⁵ *Présentation classique des coniques*, Collège de Maisonneuve, [on line, 09/04/2006], http://math.cmaisonneuve.qc.ca/plantagne/Maple/Coniques_Web/Les_sections_coniques2.html

⁵⁶ *Ellipse*, (2006), Wikipédia, [on line, 25/02/2006], <http://de.wikipedia.org/wiki/Ellipse>
 FERRÉOL, R., (2001), *Ellipse*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 20/03/2006], <http://www.mathcurve.com/courbes2d/ellipse/ellipse.shtml>

Une des propriétés de l'ellipse est aussi nommée « propriété de réflexivité ». Elle s'explique en se servant de la tangente en un point de l'ellipse. Un son ou un rayon lumineux sont émis d'un des foyers et seront réfléchis sur un autre foyer.

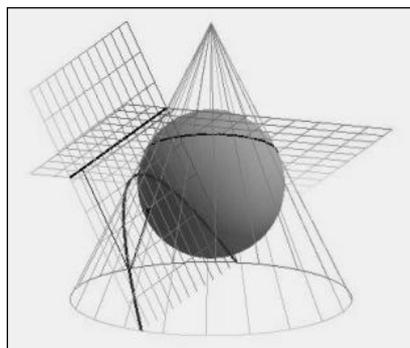


Dans le métro, deux personnes situées aux deux foyers de la voûte elliptique peuvent converser d'un quai à l'autre sans déranger les autres.

Les stations de métro, où les sons se propagent d'un quai à l'autre sont d'une forme elliptique, de même dans des galeries à échos dont le plafond des pièces est en forme d'une ellipse.

La parabole⁵⁷

La parabole est un type de courbe dont les nombreuses propriétés géométriques ont intéressé les mathématiciens dès l'Antiquité.



La sphère inscrite dans le cône et tangente au plan de la parabole l'est au foyer de la parabole, et le plan du cercle de contact coupe le plan de la parabole en la directrice.

Conique, (2006), Wikipédia, [on line, 25/02/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Conique>

⁵⁷ Parabole, (2006), Wikipédia, [on line, 15/01/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Parabole>

FERRÉOL, R., (2001), *Parabole*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 15/01/2006], <http://www.mathcurve.com/courbes2d/parabole/parabole.shtml>

Les paraboles font également partie de la famille des coniques. Il s'agit de courbes qui se forment par l'intersection d'un cône de révolution avec un plan.



58

Hans poelzig , Markthalle Breslau



59

Santiago Calatrava

La parabole est obtenue lorsque le plan est parallèle à une des génératrices du cône.

Une parabole peut être considérée comme une ellipse dont un des foyers est repoussé à l'infini. Tous les rayons lumineux provenant du foyer forment ainsi, après réflexion sur la parabole, un faisceau de rayons parallèles.

Inversement un faisceau de rayons parallèles provenant d'une source très éloignée (par exemple le soleil) arrivera sur le miroir selon un faisceau parallèle. Ainsi on obtient un miroir parabolique à trois dimensions qui concentre dans son foyer tous les rayons parallèles à son axe. La courbe de la parabole étant très proche du caténaire trouve énormément d'application aux constructions de tous genres.

L'hyperbole ⁶⁰

Elle est une figure géométrique de la famille des cônes. On l'obtient en prenant l'intersection d'un cône de révolution et d'un plan. Elle est constituée de deux branches disjointes.

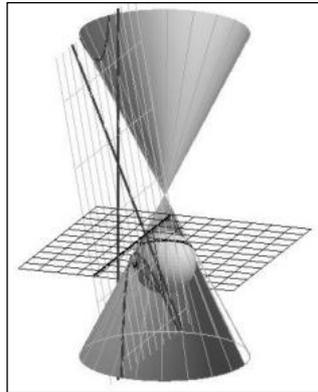
⁵⁸ *Tabibito's osteuropa-seiten*, Tabibito, [on line, 15/01/2006],

<http://www.tabibito.de/vostok/wroclaw.shtml>

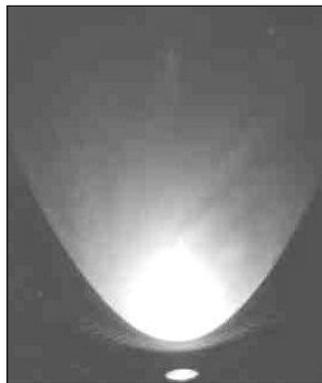
⁵⁹ TZONIS, A., Santiago Calatrava, la poétique du mouvement, Paris, Flammarion, 2005, p.p166-206.

⁶⁰ *Hyperbole*, (2006), Wikipédia, [on line, 15/01/2006], <http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperbole>
 FERRÉOL, R., (2001), *Hyperbole*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 15/01/2006], <http://www.mathcurve.com/courbes2d/hyperbole/hyperbole.shtml>

Les sphères inscrites dans le cône et tangentes au plan de l'hyperbole le sont aux foyers de celle-ci, et les plans des cercles de contact coupent le plan de l'hyperbole en les 2 directrices.

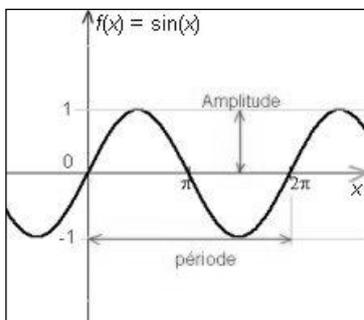


La trace d'un cône de lumière sur un mur a un contour hyperbolique, si elle est non limitée.



La sinusoïde⁶¹

La sinusoïde est la trajectoire d'un mouvement composé d'un mouvement sinusoïdal (c'est-à-dire le projeté sur une droite d'un mouvement circulaire uniforme) et d'un mouvement de translation uniforme :



⁶² Lorsqu'on associe à un nombre réel quelconque le sinus de l'angle dont la mesure, dans le système circulaire, est ce nombre, on définit ainsi une fonction circulaire appelée fonction sinus. Dans la nature la sinusoïde est la courbe des toutes les ondes : de la lumière, du son, etc.

⁶¹ Fonction trigonométrique, (2006), Wikipédia, [on line, 15/01/2006],

http://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_trigonom%C3%A9trique

FERRÉOL, R., (2001), *Sinusoïde*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 15/01/2006], <http://www.mathcurve.com/courbes2d/sinusoid/sinusoid.shtml>

⁶² Sinus d'un angle, [on line, 15/01/2006], <http://pages.infinet.net/ppat2000/lexique/S/sinus.htm>



Entrepôt Ernstring, Santiago Calatrava

La façade ondoyante ne sont pas de simples unités fonctionnelles : elles autorisent une métamorphose de l'enveloppe architecturale, la métaphore d'un corps habillé en mouvement. On peut voir la façade comme un rideau ou une robe, dissimule ou révèle les activités de l'édifice.

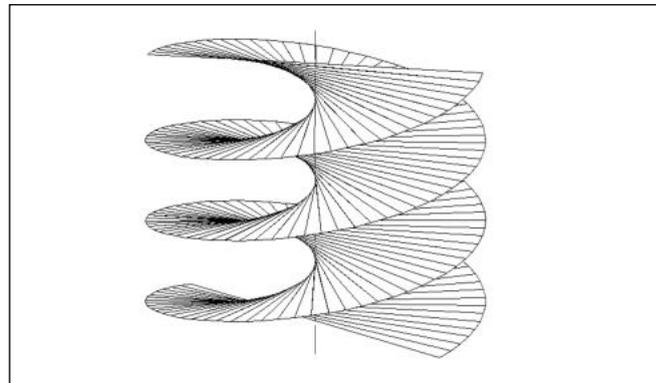
63

Les courbes tridimensionnelles⁶⁴

L'hélice⁶⁵



66



67

L'escalier dessiné par Leonardo da Vinci (1452-1519) à Chambord. L'escalier à double hélice permet d'organiser la circulation du château. Ses deux entrées permettent à deux personnes de monter et descendre sans jamais se croiser.

⁶³ TZONIS, A., *Santiago Calatrava, la poétique du mouvement*, Paris, Flammarion, 2005, pp.30-66.

⁶⁴ HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, Pour la science diffusion Berlin, 1986, pp.27-131.

⁶⁵ FERRÉOL, R., (2001), *Hélice conique*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 25/01/2006], <http://www.mathcurve.com/courbes3d/heliceconic/heliceconic.shtml>

⁶⁶ CHARBONNEAU, L., (2004), *La Renaissance*, Uqam, [on line, 25/01/2006], <http://www.math.uqam.ca/~charbonneau/GRMS04/RepresentRenaissance.htm>

⁶⁷ ALSINA, C., (2000), *Around the helice*, [on line, 05/02/2006], http://www.upc.es/ea-smi/personal/claudi/web3d/english/ehelix_eix.htm

L'hélice conique peut être définie comme une hélice tracée sur un cône de révolution. Il s'agit d'une courbe faisant un angle constant avec l'axe du cône, c'est-à-dire une courbe faisant un angle constant avec les méridiennes, ce qui n'est pas une géodésique du cône.



Les 4 dragons entrelacés de la bourse de Copenhague.

Les surfaces courbes⁶⁸

Etudiée particulièrement en France (Monge) et en Allemagne (Gauss) la théorie des surfaces relève de la géométrie différentielle dans l'étude des formes et des courbures.

Il n'est pas facile de définir une surface. On peut la concevoir en tant que bord d'un objet ou en tant que frontière entre l'intérieur et l'extérieur de cet objet. On parle d'une surface de révolution s'il y a une rotation d'une courbe appelée génératrice, autour d'une droite fixe, appelée axe de révolution.

Pour représenter une surface il faut un minimum de points, ceci étant très complexe. Si on désire modifier une surface, il faut pouvoir le faire en modifiant un minimum de points caractéristiques. En général on définit les surfaces par un réseau de courbes croisées.

L'exemple le plus simple de surface est le plan. Pour la construction d'une structure plane en fer, la conception ne paraît pas compliquée. Il suffit d'avoir deux réseaux de droites orthogonales.

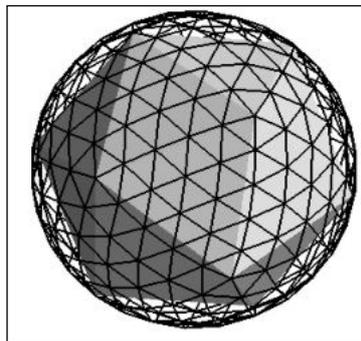
⁶⁸ HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, Pour la science diffusion Berlin, 1986, pp.53-79.

Mais il y a un manque de rigidité. Pour faire tenir dans une construction des poutrelles entre elles, il est nécessaire de se servir de ferrailage courbe. Pour cette raison on s'intéresse d'avantage aux surfaces admettant deux réseaux de droites génératrices.

La sphère⁶⁹

La forme sphérique a toujours été admirée. Elle est un volume apprécié par les ingénieurs et architectes. Une sphère est une surface à trois dimensions dont tous les points sont situés à une même distance d'un point appelé « centre ». La valeur de cette distance commune au centre est appelée « le rayon » .

Une sphère est aussi nommée surface formée par la rotation d'un cercle autour de son diamètre.



Premier dôme géodésique construit par Walter Bauersfeld en 1922 ; structures étudiées par l'architecte Richard Buckminster Fuller dans les années 1940 ainsi que par les biologistes M. Goldberg, D. Caspar, et A. Klug en 1962. La sphère se définit de deux façons:

- Une sphère est un solide constitué de points de l'espace tous à la même distance d'un point appelé centre de la sphère. Cette distance est le rayon de la sphère.
- Une sphère est un solide de révolution engendré par la rotation d'un demi-cercle de centre O et de diamètre $[AB]$ autour de (AB) . Si, au lieu d'un demi-cercle, nous utilisons un demi disque, le solide ainsi engendré est une boule. Le point O est le centre de la sphère (ou de la boule) et $[AB]$ en est un diamètre.

⁶⁹ HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, Pour la science diffusion Berlin, 1986, pp.53-79.

RACHET G., *Chefs-D'œuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

GRUBE G-R. ; KUTSCHMAR, A., *Bauformen*, Berlin, Huss-Medien, 2004, pp.18-76.

JODIDIO, P., *Formes nouvelles*, Köln, Taschen, 2001, pp.143-179.

FERRÉOL, R., (2001), *Dôme géodésique*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 25/01/2006], <http://www.mathcurve.com/polyedres/geode/geode.shtml>

FREI, O., *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt, 1982, pp.5-52 .

La sphère a la plus petite aire parmi les surfaces renfermant un volume donné. Elle renferme le volume le plus élevé parmi les surfaces d'une aire donnée. Dans la nature, les sphères sont présentes. Les gouttes d'eau par exemple sont des sphères car la tension superficielle essaie de minimiser l'aire.



70

Richard Buckminster Fuller (12 juillet, 1895 - 1er juillet, 1983) était un architecte, designer, américain, créateur entre autres du concept du dôme géodésique. On désigne par dômes géodésiques les polyèdres inscriptibles à faces triangulaires. Le dôme géodésique a été utilisé entre autres pour le pavillon des États-Unis à l'exposition internationale de 1967 à Montréal et y siège maintenant la Biosphère.

Une section plane d'une sphère est obtenue en coupant la sphère à l'aide d'un plan. La section d'une sphère par un plan passant par le centre de la sphère est un cercle de même centre et même rayon que la sphère. Ce cercle est appelé grand cercle. Il existe une infinité de plans passant par le centre de la sphère. Par conséquent il existe une infinité de grands cercles pour une sphère donnée.

Nous pouvons réaliser une sphère à l'aide de matériaux souples et déformables, ou en assemblant des petits morceaux de plan (facettes) comme pour un ballon de football.



Pier Luigi Nervi, est un architecte et ingénieur italien né en 1891 à Sondrio dont les créations, notamment dans le domaine du béton armé, lui ont permis de résoudre de manière esthétique des valeurs architectoniques. Palais des Sports, Rome.

71

⁷⁰ Richard Buckminster Fuller, (2006), Wikipédia, [on line, 23/02/2006],

http://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_trigonom%C3%A9trique

⁷¹ CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981, pp.264-334.



L'opéra de Sidney (1956-73), architecte danois Jørn Utzon.

Le projet était cependant ambitieux pour les moyens technologiques disponibles à l'époque, et l'architecte dut travailler deux années pour résoudre les difficultés techniques

72

Le cylindre⁷³

Il est une surface définie par une droite, appelée génératrice, passant par un point variable décrivant une courbe plane fermée (courbe directrice) et gardant une direction fixe. On parle aussi de surfaces cylindriques.

Le cylindre est comparable à un cône dont le sommet est rejeté à l'infini. Si on coupe un cylindre par deux plans parallèles et si ces plans sont perpendiculaires à la droite génératrice, on parle d'un cylindre droit.

La distance qui sépare les deux plans parallèles s'appelle « hauteur » et la surface limitée par la courbe directrice s'appelle la « base » du cylindre.



74

Voici la "pièce maîtresse" du Temple du Ciel (Pékin, 1421) : la Salle de la Prière. Il s'agit d'un bâtiment surmonté d'un triple toit et soutenu par 28 colonnes.

⁷² Australia, (2006), Icara, [on line, 08/02/2006], <http://www.gakei.com/aus/aus.htm>

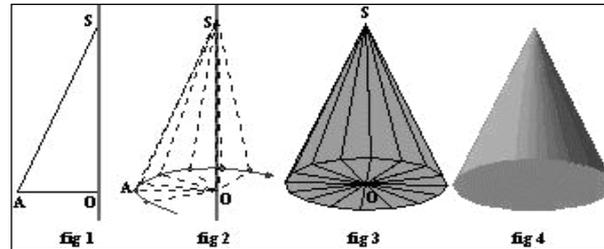
⁷³ CHASTEL, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981, pp.264-334.

FERRÉOL, R., (2001), *Cylindre*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 10/02/2006], <http://www.mathcurve.com/surfaces/cylindrederevolution/cylindrederevolution.shtml>

⁷⁴ *Le temple du Ciel Tiantan*, [on line, 25/02/2006], <http://chinatravels.free.fr/2000/beijing/fr/tiantan.html>

Le cône⁷⁵

Le cône droit (ou cône de révolution) est un solide de révolution.

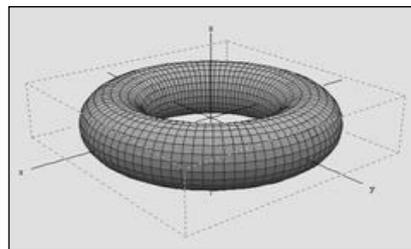


Une face de base : disque (ou cercle) dont le centre O est sur l'axe de révolution (axe autour duquel tourne le profil ou génératrice) et de rayon R . La section d'un cône droit par un plan passant par l'axe de symétrie (SO) du cône, est un triangle isocèle de sommet principal, le sommet S du cône et dont la base principale a pour longueur le diamètre de la base du cône.

La section d'un cône droit par un plan parallèle à l'axe de symétrie est une surface limitée par une corde du disque de base et un arc d'une courbe appelée hyperbole.

Le tore⁷⁶

Un tore est la surface engendrée par la rotation d'un cercle C de rayon r autour d'une droite située dans son plan, mais ne passant pas par son centre.



La forme du tore dépend de la distance R du centre du cercle à l'axe de la rotation.

⁷⁵ Cône, (2006), Wikipédia, [on line, 25/02/2006],

http://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%B4ne_%28g%C3%A9om%C3%A9trie%29

FERRÉOL, R., (2001), Cône, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 25/02/2006],

<http://www.mathcurve.com/surfaces/cone/cone.shtml>

⁷⁶ Tore, (2006), Wikipédia, [on line, 05/03/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Tore>

FERRÉOL, R., (2001), Tore, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 05/03/2006],

<http://www.mathcurve.com/surfaces/tore/tore.shtml>

Le tore est la surface engendrée par la révolution d'un cercle autour d'une droite de son plan. C'est donc un tube de diamètre constant à esprit d'un cercle.



L'Allianz Arena surnommée le "Schlauchboot" (canot pneumatique) en raison de son aspect, est le nom d'un stade de football au nord de Munich.

Architectes : Pierre de Meuron ; Jacques Herzog

L'ellipsoïde⁷⁸

L'ellipsoïde admet un centre et au moins trois plans de symétrie. L'intersection d'un ellipsoïde avec un plan est une ellipse, un point ou l'ensemble vide.

Dans le cas très particulier où $a = b = c$, la surface est une sphère de rayon a .

Dans le cas où seuls deux paramètres sont égaux, l'ellipsoïde peut être engendré par la rotation d'une ellipse autour d'un de ses axes. Il s'agit d'un ellipsoïde de révolution, qu'on retrouve sous forme de miroirs elliptiques dans les projecteurs de cinéma.

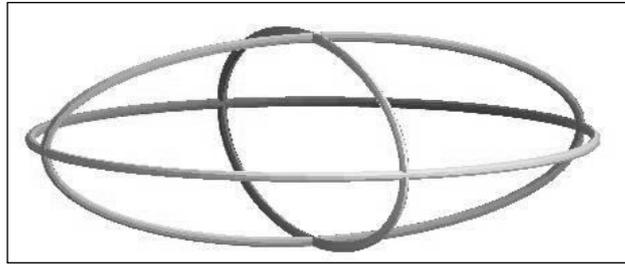
⁷⁷Allianz Arena secures itself with SimonsVoss, (2006), AMG, [on line, 05/03/2006], <http://www.ameinfo.com/64449.html>

⁷⁸Ellipsoïde, (2006), Wikipédia, [on line, 05/03/2006],

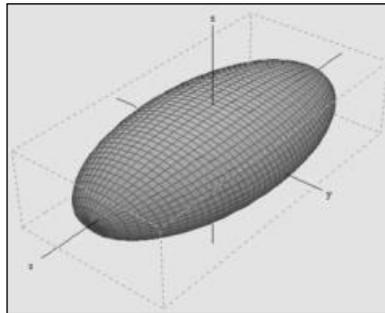
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Ellipso%C3%AFde>

FERRÉOL, R., (2001), *Tore*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 05/03/2006],

<http://www.mathcurve.com/surfaces/ellipsoid/ellipsoid.shtml>



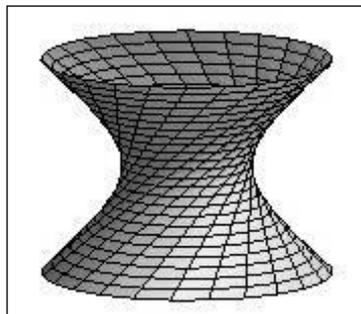
Les sections planes de l'ellipsoïde sont des ellipses, qui sont semblables quand les plans sont parallèles.



En mathématiques, un ellipsoïde est une surface du second degré de l'espace euclidien à trois dimensions. Il fait donc partie des quadriques, avec pour caractéristique principale de ne pas posséder de point à l'infini.

Hyperboloïde d'une nappe⁷⁹

Pour obtenir un hyperboloïde il suffit de tordre un cylindre en faisant tourner les deux cercles qui le limitent dans des sens opposés.



⁷⁹ Hyperboloïde, (2006), Wikipédia, [on line, 12/03/2006],

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Hyperbolo%C3%AFde>

FERRÉOL, R., (2001), *Hyperboloïde à une nappe*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 12/03/2006], <http://www.mathcurve.com/surfaces/hyperboloid/hyperboloid1.shtml>

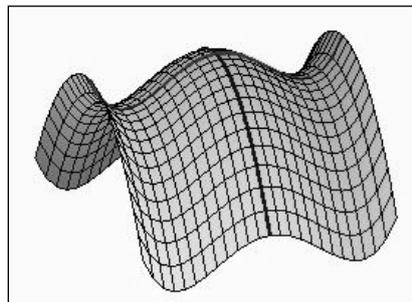
On réalise donc une portion d'hyperboloïde de révolution en tendant des élastiques entre deux tiges circulaires.

L'hyperboloïde à une nappe peut être engendrée par deux réseaux de droites différents. Ceci est le cas, si on fait tourner les cercles dans des sens inverses, obtenant la même surface, les droites du cylindre auraient été déplacées autrement. Ceci donne deux réseaux de génératrices. Cette surface est nommée hyperboloïde du fait qu'une hyperbole puisse tourner autour de son axe.



Pour l'hyperboloïde à une nappe, l'existence de ces génératrices assure en architecture la rigidité du solide permettant d'utiliser cette forme pour des châteaux d'eau ou des tours de refroidissement.

Les surfaces de translation⁸⁰



Une surface de translation est une surface qui est réunion de courbes translatées les unes des autres.

⁸⁰ FERRÉOL, R., (2001), *Surfaces de translation*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 12/03/2006], <http://www.mathcurve.com/surfaces/translation/translation.shtml>

Il s'agit d'une surface qui est le résultat de la translation d'une courbe le long d'une autre courbe. Cette définition est symétrique en ce sens que la translation de la deuxième génératrice le long de la première donne la même surface.

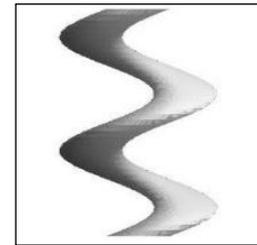
Les surfaces développables⁸¹

Une forme développable est par ex. un cylindre, résultant du cintrage d'une feuille de papier pour faire coïncider deux des bords parallèles. Si les bords ne sont pas parallèles on obtien un cône.

Les lignes droites se nomment les génératrices. Une surface développable est une surface que l'on peut rouler sur un plan, sans glisser. Le contact se fait le long d'une droite, comme pour un cylindre ou un cône.

L'hélicoïde⁸²

Colonne torse : cercle générateur horizontal (perpendiculaire à l'axe).



Une surface hélicoïde est une surface qui s'appuie sur une hélice et sur un axe. C'est la seule surface obtenue par le déplacement d'une droite dans l'espace autour d'un axe. Il existe une hélicoïde développable.



⁸³ *Basilic St-Pierre à Rome.
Colonnes de Bernini au centre.*



Musée Guggenheim (1951-1959) à New-York., Aarchitecte, Franck Lloyd Wight.

84

⁸¹ FERRÉOL, R., (2001), *Surface développable*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 12/03/2006], <http://www.mathcurve.com/surfaces/developpable/developpable.shtml>

⁸²FERRÉOL, R., (2001), *hélicoïde cerclé*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 12/03/2006], <http://www.mathcurve.com/surfaces/helicoidcercle/helicoidcercle.shtml>

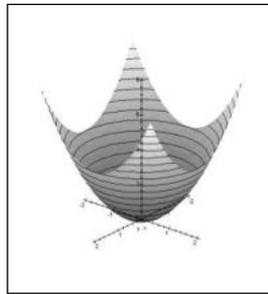
⁸³ *La Basilea di San Pietro*, (2006), Activitaly srl Roma, [on line, 12/03/2006], http://www.vic-bigorre.com/retable_vic/panneau_central.html

⁸³ STONE, B-E., (2006), U.S. History 1865 to present, [on line, 12/03/2006], http://www.activitaly.it/monument/san_pietro_roma.htm

Le conoïde⁸⁵

Un conoïde est une surface réglée dont les génératrices restent parallèles à un plan, appelé plan directeur du conoïde tout en rencontrant une droite, appelée axe du conoïde. Une courbe tracée sur le conoïde et rencontrant toutes les génératrices s'appelle une directrice du conoïde ; il existe un unique conoïde d'axe, de plan directeur et de directrice donnés.

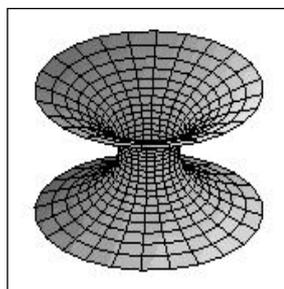
On désigne parfois par surface conoïdale une surface réglée ayant deux directrices rectilignes : le conoïde est alors le cas où l'une de ces directrices est à l'infini.



L'image par une homographie d'une surface conoïdale (donc en particulier d'un conoïde) est une surface conoïdale. Le berlingot est un exemple de telle surface.

Le caténoïde⁸⁶

Le caténoïde est la surface de révolution engendrée par la rotation d'une chaînette autour de sa base.



⁸⁵ FERRÉOL, R., (2001), *conoïde*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 12/03/2006], <http://www.mathcurve.com/surfaces/conoid/conoid.shtml>

conoïde, (2006), Wikipédia, [on line, 12/03/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cono%C3%AFde>

⁸⁶ *Caténoïde*, (2006), Wikipédia, [on line, 12/03/2006],

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Cat%C3%A9no%C3%AFde>

FERRÉOL, R., (2001), *caténoïde*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 12/03/2006],

<http://www.mathcurve.com/surfaces/catenoid/catenoid.shtml>

L'adaptation de la courbe avec le temps

Les avantages des courbes définies mathématiquement⁸⁷

Les connaissances techniques et l'observation de la nature mènent l'architecte à réfléchir en premier lieu sur l'utilité de la construction courbée, soulignant sa forme et une économie de moyens et de matériaux. Les oeuvres architecturales dégagent des espaces maximum.

Souvent on revient à la forme la plus simple au point de vue mathématique : la sphère. C'est ces la caténaire, la forme qui a comme propriété de répartir les forces et les tensions qui s'exercent sur la construction de manière très efficace et économique.

Les formes mathématiques sont faciles à calculer en étude de la statique, et sont depuis là imaginables dans une réalisation constructive.



88

L'édifice de Gehry (Musée Guggenheim, Bilbao : 1993-1997) se présente comme une grande sculpture, une silhouette singulière formée de matériaux surprenants. Sous une apparence chaotique suscitée par le contraste fragmenté de volumes aux formes régulières recouverts de pierre, de formes courbes revêtues de titane et de grands murs de verre, l'édifice s'articule autour d'un axe central, l'atrium, espace monumental vide couronné d'une coupole métallique vitrée à son zénith, laissant pénétrer, ainsi qu'à travers des murs vitrés, une lumière qui inonde l'ensemble. Tout autour de cet espace vide, un système de passerelles courbes, d'ascenseurs vitrés et de tours d'escalier mettent en relation 19 galeries où se combinent espaces classiques aux formes rectangulaires et espaces aux formes et proportions particulières. Cette variété et richesse des espaces octroie au musée une exceptionnelle versatilité.

⁸⁷ FREI, O., *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt, 1982., pp.29-97.

RACHET G., *Chefs-D'oeuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.

JODIDIO, P., *Formes nouvelles*, Köln, Taschen, 2001, pp.179-227.

⁸⁸ *Le musée Guggenheim Bilbao*, Metropoli, [on line, 09/04/2006], http://www.bm30.es/proyectos/gugge_fr.html

Comme déjà mentionné, l'architecture réunit des procédés ainsi que des connaissances scientifiques et techniques qui interviennent dans la conception et la réalisation des édifices. C'est par ces acquits que le terme « construction » prend racine et fait partie intégrante de l'architecture.

Toute construction affronte des problèmes de statique ainsi que l'emploi des matériaux bien choisis pour supporter pressions et tensions qui s'exercent dans chaque bâtiment. A l'époque les architectes tiraient leur savoir des expériences et de l'intuition. Les architectes actuels disposent d'importantes connaissances, grâce aux progrès scientifiques et techniques.

Santiago Calatrava⁸⁹

L'intuition et les expériences permettent, d'après les connaissances physiques et architecturales, d'examiner des structures en mouvement, de déceler les forces qui les soutiennent et de percevoir l'énergie qu'elles retiennent.

L'architecte sculpteur Santiago Calatrava précise ces idées surtout dans le choix de la matière de construction. Ses constructions associent mouvement et forme.

Etant à la recherche d'une forme optimale, Calatrava essaie de réduire les édifices tridimensionnels jusqu'à les réduire à deux dimensions voire même à une seule. Il défie les lois de la gravité en étirant les structures métalliques. Il relie les tiges au moyen de jointures flexibles permettant au polyèdre de bouger dans son ensemble en se pliant ou en se dépliant. Si les tiges changent de position, elles dessinent dans l'espace des courbes et des surfaces complexes.

En intégrant un mouvement multiforme dans une forme unique, Calatrava permet un rapprochement entre l'esthétique sculpturale et la considération pragmatique de l'être humain.

Il voit dans le mouvement un objectif prioritaire. Comprendre le monde, non comme un objet statique et clos, mais comme un univers d'infinies possibilités. Le mouvement lui permet de redéfinir et de raviver des formes statiques. Il impose ainsi des normes durables tant pour les composants structurels que

TZONIS, A., *Santiago Calatrava, la poésie du mouvement*, Paris, Flammarion, 2005.
JODIDIO, P., *Formes nouvelles*, Köln, Taschen, 2001, pp184-185.

pour les différentes catégories architecturales. Calatrava est obsédé par la forme et le mouvement.

Par son raisonnement il prétend que pour bâtir une communauté il faut instaurer un dialogue entre les auteurs de la conception et tous ceux qui apprécient leur environnement.



90

La nouvelle gare de Liège Guillemins est un monumental dôme de verre et d'acier de 200 m de long qui couvre les voies et la nouvelle infrastructure essentiellement réalisée en béton blanc. Elle accueille notamment les TGV sur la ligne Paris-Köln. Tous les bétons apparents sont en béton blanc. De très nombreuses surfaces sont courbes et/ou gauches. Ces contraintes constituent des défis d'étude, de dessin et de réalisation.

L'homme et ses besoins – du point de vue philosophique et esthétique⁹¹

Dans l'histoire des sciences les mathématiques se sont très rapidement tournés vers une science exacte. Soit par nombres ou par formes géométriques, elles définissent leurs propriétés à partir de règles de logique irréfutables, ainsi que le raisonnement qui s'en déduit.

La vérité mathématique est à la fois formelle et matérielle dans sa réalisation architecturale. Cette connaissance de vérité formelle et de vérité matérielle était valable pendant de nombreux siècles. L'assimilation entre « mathématiques » et « vérités » va leur accorder une place importante et un rôle privilégié dans l'évolution future.

Elle a ouvert de nouvelles voies de recherches et a donné de nouvelles perspectives à la pensée humaine. En Europe l'art s'est développé en fonction d'une structure historique dans laquelle l'homme agit en toute conscience.

⁹⁰ LOZE, P., (2005) *Gare ferroviaire de Liège-Guillemins*, [on line, 10/04/2006], http://www.greisch.com/projet/gare_ferroviaire_liege_guillemins-fr.html#

DERU, J-L., (2005) *Gare ferroviaire de Liège-Guillemins*, [on line, 10/04/2006], http://www.greisch.com/projet/gare_ferroviaire_liege_guillemins-fr.html#

⁹¹ COUSIN, J., *L'espace vivant*, Paris, éditions du moniteur, 1980.

BACHELARD, G., *La poétique de l'espace*, Paris, Presse universitaires de France, 1992.

L'art est considéré comme une action volontaire, comme un processus conscient.

Depuis les origines archaïques de l'architecture l'être humain a recherché la forme spatiale organique qui, avec les nouvelles possibilités techniques et technologiques, s'épanouit dans l'architecture.

Conclusions et expériences personnelles⁹²

En examinant les architectures contemporaines on constate de plus en plus l'absence de l'angle droit. Il est vrai que les nouveaux matériaux de construction se prêtent plus facilement à toutes les fantaisies du constructeur.

L'architecte Delhez étant l'auteur d'une idée qui n'est pas toujours facile à réaliser mais qui est appelé à répondre à un tout, arrive à assembler toute la problématique de l'architecture pour en tirer une solution unique, techniquement correcte, pratique et esthétique.

Etant créateur il travaille dans un concept à esprit organique qui est le résultat d'une réflexion personnelle et spirituelle. Il s'agit d'une démarche formelle qui puise son inspiration dans la nature.

Les formes utilisées sont donc fluides, arrondies, enveloppantes. Le bâtiment vit en relation avec son milieu. Cet organisme est réel, vital et naturel.

Les constructions de l'architecte Yves Delhez se différencient très fort de la normalisation. Son désir est d'être très proche de la nature et de la reproduire dans son oeuvre. Il s'agit d'une sorte d'architecture universelle, spontanée où l'osmose consiste dans la dualité terre-ciel et où la métamorphose rend ces deux éléments opposés parfaitement complémentaires. Pour lui, l'architecture est utilitaire.

Une maison doit être avant tout fonctionnelle et complètement individuelle pour offrir une qualité de vie conforme aux goûts de ses occupants.

⁹²JODIDIO, P., *Formes nouvelles*, Köln, Taschen, 2001, pp.7-51.

SEMBACH, K-J., *Jugendstil*, Cologne, Taschen, 2000, pp.72-80.

L'architecture d'Yves Delhez n'est pas toujours bien acceptée et loin d'être comprise car notre regard et notre pensée attendent de l'homme qu'il bâtit d'une manière usuelle et fiable. Selon Yves Delhez l'organisation des espaces intérieurs est le résultat de multiples réflexions procédant une logique fonctionnelle rigoureuse et où le dialogue entre utilisateur et architecte joue un rôle très important

Résumé⁹³

On peut se demander :

« *Vers quelle direction l'architecture d'aujourd'hui tend – elle ?* »

Il semble exister une certaine corrélation entre un environnement physique donné et les réactions et le comportement d'un individu ou d'un groupe de personnages. Cette relation, étant fluide et relativement variable est contraire au bâtiment qui lui, par nature est plutôt rigide.

Pour l'être humain il existe une structure qui lui permet de se représenter : son propre corps. Il est essentiel pour l'homme de prendre possession de l'espace, de le maîtriser. Notre corps nous enseigne à inclure l'espace dans notre existence.

Comment faire pour ne pas l'entraver ?

Dans un endroit calme, notre espace personnel devient celui de l'endroit. Il existe une identification entre notre espace personnel et l'espace géométrique de la chambre qui nous entoure. Nous sommes amenés à penser que l'espace est contenu en nous et fait partie de notre univers psychique.

⁹³WEINAND, Y., *New_modeling*, Lausanne, Presse polytechnique et universitaires romandes, 2004, pp.8-12.

JODIDIO, P., *Formes nouvelles*, Köln, Taschen, 2001, pp.179-227.

FREL, O., *Zugbeanspruchte Konstruktionen*, Berlin, Ullstein Fachverlag, 1966.

MIMRAM, M., *Structures et formes*, Nancy, Dunod, 1983, pp.5-7.

*HANSEL, A., (2002), the blue blog, archives, Vocation2005, [on line, 17/04/2006], http://alison.knitsmiths.us/cat_vacation_2005.html

Cette réflexion sur les lignes courbes devient de plus en plus intéressante. L'évolution architecturale tend vers une complexité où la courbe joue un rôle prédominant. L'esthétique de la courbe joue un rôle très important concernant beaucoup de constructions anciennes et récentes. Cette complexité fait interaction des fonctions d'une autre manière.

Nous sommes obligés de corriger notre vue et nos idées et de découvrir de nouvelles aptitudes, permettant à l'homme de trouver son bien – être.

L'approche sera différente pour un architecte d'intérieur. Il devra s'adapter à des nouvelles tendances et il sera à la recherche des avantages concernant ces nouvelles apparitions pour l'espace intérieur.

Pour que nous percevions les choses, il faut que nous les vivions !

Il est clair et certain que l'art contemporain fait éclater les formes. Les nouvelles technologies permettent à l'architecte de s'approcher à des formes originales, mathématiquement définies. Les facteurs qui influencent l'art de construire sont nombreux. Certains, comme l'informatique sont si puissants et vont continuer à transformer les formes et les fonctions de l'architecture à un rythme accéléré au cours des années à venir.

Les tendances récentes déterminent une approche prenant compte des influences et des contraintes économiques. Elles permettent de mieux comprendre la situation contemporaine et celle de l'avenir.

L'accent s'est déplacé du produit vers son processus. Il est passé des formes aux relations entre formes et leurs utilisateurs. Ce déplacement modifiera notre interprétation de l'architecture du passé et il va changer la façon dont nous contemplerons la nouvelle.

** Reichstag, Norman Foster, Berlin.*



Bibliographie

-Ouvrages-

- BACHELARD, G., *La poétique de l'espace*, Paris, Presse universitaires de France, 1992.
- CHASTEI, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981.
- COUSIN, J., *L'espace vivant*, Paris, éditions du moniteur, 1980.
- DEHAU, E., *Terre Mongole*, Amez, 1993.
- FREI, O., *Zugbeanspruchte Konstruktionen*, Berlin, Ullstein Fachverlag, 1966.
- FREI, O., *Natürliche Konstruktionen*, Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt, 1982.
- GRUBE G-R. ; KUTSCHMAR A., *Bauformen*, Berlin, Huss-Medien, 2004.
- HANSEL, A., (2002), the blue blog, archives,Vocation2005, [on line, 17/04/2006], http://alison.knitsmiths.us/cat_vacation_2005.html
- HILDEBRANDT, S. ; TROMBA, A., *Mathématiques et formes optimales*, Paris, Pour la science diffusion Berlin, 1986.
- JODIDIO, P., *Formes nouvelles*, Köln, Taschen, 2001.
- LE CORBUSIER, *Vers une architecture*, Paris, Flammarion, 1995.
- MIMRAM, M., *Structures et formes*, Nancy, Dunod, 1983.
- RACHET G., *Chefs- D'oeuvre du génie humain*, Paris, Readers Digest, 1986.
- RUDOFISKY, B., *Architecture sans architectes*, Paris, Chêne, 1977.
- SEMBACH, K-J., *Jugendstil*, Cologne, Taschen, 2000.
- SERS, P., *Wassily Kandinsky, point et ligne sur plan*, France, Folio essais, 1991.
- TZONIS, A., *Santiago Calatrava, la poétique du mouvement*, Paris, Flammarion, 2005.
- WEINAND, Y., *New_modeling*, Lausanne, Presse polytechnique et universitaires romandes, 2004.

-Sources électroniques-

- *Allianz Arena secures itself with SimonsVoss*, (2006), AMG, [on line, 05/03/2006], <http://www.ameinfo.com/64449.html>
- ALSINA, C., (2000), *Around the helice*, [on line, 05/02/2006], http://www.upc.es/ea-smi/personal/claudi/web3d/english/ehelix_eix.htm
- *Architecture romane*, (2006), Wikipédia, [on line, 15/11/2005], http://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_romane
- ARECCHI, A., (1994), *Toitures en corbeille pour le développement*, *Articoli*, [on line, 16/08/2005], <http://www.liutprand.it/trulfr.htm>
- ARMANO, T., (2006), *Seminario Nazionale di Ricerca in Didattica della Matematica*, [on line, 17/01/2006], <http://www.dm.unito.it/semdidattica/index.php>
- *Australia*, (2006), Iera, [on line, 08/02/2006], <http://www.gakei.com/aus/aus.htm>
- CAMPION, M-D., *Saint pierre et le vatican*, [on line, 19/08/2005], Académie amiens, <http://www.ac-amiens.fr/etablissements/0601408e/Voyages/Italie/vatican.htm>
- CHARBONNEAU, L., (2004), *La Renaissance*, Uqam, [on line, 25/01/2006], <http://www.math.uqam.ca/charbonneau/GRMS04/RepresentRenaissance.htm>
- CHASTEI, A., *Le grand atlas de l'architecture*, France, Encyclopedia universalis, Mondiale, 1981.
- CLEARY, R., *S. Ivo della Sapienza*, (2001), University of texas at Austin, [on line, 10/09/2005], <http://arch.utexas.edu/AV/ARC318L/glossary/building/ivo.html>
- *Colisée*, (2006), Wikipédia, [on line, 25/11/2005], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Colis%C3%A9e>
- DE BUSSAC, L., *Abbaye de cluny*, *Editions l'instant durable*, [on line, 10/04/2006], http://www.instantdurable.com/ID_Maquettes/religieux/cluny.htm
- DERU, J-L., (2005) *Gare ferroviaire de Liège-Guillemins*, [on line, 10/04/2006], http://www.greisch.com/projet/gare_ferroviaire_liege_guillemins-fr.html#
- *Deux architectures différentes*, (2001), International School of the Peninsula, [on line, 19/08/2005], http://www2.istp.org/StudentsCorner/StudentCorner2000_2001/College/8th/SiteWebTechno4/SWMarine/PageWeb/page-agII.html
- *Dolce Roma*, (2005), *Dolce Rome Apartments*, [on line, 08/04/2006], <http://www.dolceroma.it/campo-fiori-map.htm>
- DUFRESNEY, D., *Qu'est-ce-qu'un nombre ?*, *Enigma*, [on line, 12/04/2006], http://www.cerimes.fr/e_doc/nombre/archime.htm

- *Eglise entre Maine et Bretagne*, [on line, 20/03/2006], <http://kosmos.chez-alice.fr/eglises/lexique.htm>
- FERRÉOL, R., (2001), *Encyclopédie des formes mathématiques remarquables*, Anneau des Mathématiques Francophones, [on line, 20/07/2005], <http://www.mathcurve.com/>
- *Florence Churches-World guide to Florence*, (2000-2005), Copyscap, [on line, 20/08/2005], <http://www.florence.world-guides.com/churches.html>
- GENARD, S., (2000), *Pappus d'Alexandrie*, IREM, [on line, 12/04/2006], http://www.reunion.iufm.fr/recherche/irem/histoire/pappus_d'alexandrie.htm
- GIESE, P., (1993), *Igloo – The traditional arctic snow dome*, University of Chicago Press, 1996, [on line, 19/03/2006], <http://www.kstrom.net/isk/maps/houses/igloo.html>
- *Hagia Sophia*, (2006), Wikipédia, [on line, 10/11/2005], http://de.wikipedia.org/wiki/Hagia_Sophia
- HENRY ULP, M., (1999), *Radiolaires*, LCMES (2000), [on line, 05/04/2006], <http://semsci.u-strasbg.fr/radiolai.htm>
- HERMANDEZ, A-C., *Archéologie Classique*, Université de Genève, [on line, 3/09/2005], http://www.unige.ch/lettres/arqueo/introduction_seminaire/protohistoire/lipari1.html
- JJEANDROZ, P., *Renaissance italienne*, (2005), edelo, [on line, 21/10/2005], <http://www.edelo.net/italie/art.htm>
- KRIEGER, R., LASCH C., *Preliminary Research and Project Proposal: Geodetic Structural Technology*, CNC Milling Seminar, [on line, 05/08/2005], <http://www.arch.columbia.edu/DDL/cad/CNC/fall98/students/krieger/research/index.html>
- *La Basilica di San Pietro*, (2006), Activitaly srl Roma, [on line, 12/03/2006], http://www.vic-bigorre.com/retable_vic/panneau_central.html
- *La Maison Ronde de Mario Botta*, Audience, [on line, 12/04/2006], <http://audience.cerma.archi.fr/cerma/pageweb/reference/botta/botta1.html>
- LE GOUVELLO, J., *Mongolie vers la fin du nomadisme*, EKWO, [on line, 14/08/2005], <http://www.ekwo.org/mongolie.php3>
- *Le musée Guggenheim Bilbao*, Metropoli, [on line, 09/04/2006], http://www.bm30.es/proyectos/gugge_fr.html
- *Le temple du Ciel Tiantan*, [on line, 25/02/2006], <http://chinatravels.free.fr/2000/beijing/fr/tiantan.html>
- *Les Pouilles 2004*, (1996), Ecole athenaeum, Architecture & Design, [on line, 3/09/2005], <http://www.athenaeum.ch/putrulli.htm>
- LOMBRY, T., *La théorie de la relativité, Mensa*, [on line, 17/01/2006], <http://www.astrosurf.com/lombry/relativite-geometrie-noneuclidienne.htm>

- LOZE, P., (2005) *Gare ferroviaire de Liège-Guillemins*, [on line, 10/04/2006], http://www.greisch.com/projet/gare_ferroviaire_liege_guillemins-fr.html#
- *Œuvres d'Antoni Gaudi*, Patrimoine mondial, [on line, 11/04/2006], <http://whc.unesco.org/fr/list/320/>
- *Présentation classique des coniques*, Collège de Maisonneuve, [on line, 09/04/2006], http://math.cmaisonneuve.qc.ca/plantagne/Maple/Coniques_Web/Les_sections_coniques2.html
- ROSCHER, W-E., (1999), *Stonehenge*, National geographic Society, [on line, 26/02/2006], <http://www.nationalgeographic.com/xpeditions/activities/04/popup/stonehenge.html>
- RUB, Y., *Pythagore*, (2006), Atrium, [on line, 15/08/2005], <http://www.yrub.com/philo/pythagore.htm>
- *Sinus d'un angle*, [on line, 15/01/2006], <http://pages.infinet.net/ppat2000/lexique/S/sinus.htm>
- *School of Architecture*, Mc Gill university, [on line, 09/04/2006], http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkles/D+C-winter-2005/pavillions_concrete/Page.html
- SCRIVAT, M., *L'église Baroque St Nicolas à Prague*, (2006), Les pages culturelles d'EnkiEa, [on line, 10/09/2005], http://www.asso-chc.net/article.php3?id_article=116
- STONE, B-E., (2006), U.S. History 1865 to present, [on line, 12/03/2006], http://www.activitaly.it/monument/san_pietro_roma.htm
- *Tabibito's osteuropa-seiten*, Tabibito, [on line, 15/01/2006], <http://www.tabibito.de/vostok/wroclaw.shtml>
- VERSPEETEN, A., *Thales updated : on hearing lang lang*, (2002), Texas Chapbook Press, [on line, 15/08/2005], <http://www.texaschapbookpress.com/magellanslog49/onhearinglanglang.htm>
- *Voûte conique*, Observatori Euromed de la Interculturalitat i Drets Humans, [on line, 16/08/2006], <http://www.humanrights-observatory.net/pierre-seche/voltaconicafran2.html>
- WAGNER, (1997), *L'Art Sacré au XXe siècle en France*, Micromégas, [on line, 09/04/2006], <http://www.en-lorraine.com/micromegas/sommaire.htm>
- Wikipédia, (2006), Wikipédia, [on line, 12/08/2006], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia>
- WOLFERS, P., (2001), *Art Nouveau & Design*, *La tribune de l'art*, [on line, 11/04/2006], http://www.latribunedelart.com/Expositions_2005/Art_Nouveau_363.htm