

1989
ID
17

EMMANUELLE SCORLANNE

*La nature
Structures fondamentales
et
structures évoluées*

Travail réalisé pour Monsieur GOULESQUE

1989

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE BIBLIOTHECAIRES

D.E.S.S. D'INFORMATIQUE DOCUMENTAIRE
UNIVERSITE CLAUDE BERNARD DE LYON I

EMILIANE LECORLANNE

*La nature
Structures fondamentales
et
structures évoluées*

Travail réalisé pour Monsieur GOULESQUE

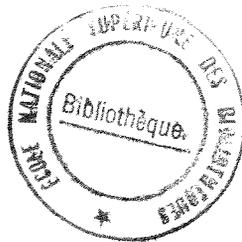
1989

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE BIBLIOTHECAIRES

D.E.S.S. D'INFORMATIQUE DOCUMENTAIRE
UNIVERSITE CLAUDE BERNARD DE LYON I

*"... Et la nature doit se plier
à la nécessité."*

SHAKESPEARE
Jules César : acte IV - Scène 3



INTRODUCTION

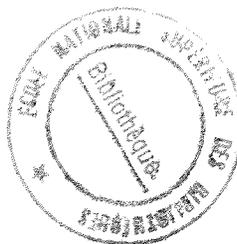
"Pour qu'un documentaliste soit vraiment profitable, il doit diminuer le temps de lecture de son interlocuteur et doit cependant lui fournir toutes les informations nécessaires : il doit nécessairement réaliser une synthèse écrite des documents primaires repérés et acquis, synthèse adaptée très exactement aux problèmes actuels du demandeur. Le produit documentaire constitue un point d'accès à l'information : la synthèse correspondant à un besoin précis d'information, constitue un document de substitution et d'orientation" (M. WAGNER "Dossier de bibliographie spécialisée : Sciences et techniques" Mars 1984 éd. ENSB).

Il y a deux ans, après avoir aperçu des photos en microscopie électronique (à balayage et à transmission), Monsieur Goulesque, architecte à Bordeaux, m'avait demandé ce qu'elles représentaient. Il s'agissait de types cellulaires à différents stades de prolifération. Monsieur Goulesque était intéressé par le rapprochement possible de ces structures avec certaines typologies urbanistiques, à la fois dans leurs formes extérieures, dans les vides ménagés entre elles et dans leurs compositions. Il m'avait donc demandé de lui en procurer d'autres exemplaires.

Parallèlement à cela, Monsieur Goulesque travaille essentiellement dans le cadre de sa profession à étudier les rapports existants entre des formes et leurs structures et, inversement, à trouver quelle structure correspond le mieux à telle forme. Autrement dit, il se demandait comment ressentir intellectuellement la structure d'une forme, ses composantes ou ses matériaux.

Désireux d'acquérir plus d'informations, il m'a demandé de réaliser ce travail.

1989
ID
17



RECHERCHE DOCUMENTAIRE

RECHERCHE DOCUMENTAIRE

INTRODUCTION

Selon Jean Louis TAFFARELLI, "la bibliographie est le secteur de la Science de l'Information qui constitue les stocks ordonnés de références aux documents et les rend accessibles aux demandeurs, employant indifféremment pour ce faire, des procédés manuels ou automatiques".

La recherche documentaire est une démarche qui demande une grande méthodologie de la part du documentaliste. Il faut tout d'abord bien cerner la demande de son interlocuteur. Cette étape est primordiale car elle est la condition sine-qua-non d'une bonne réponse. Ce n'est qu'après le problème bien situé avec le demandeur, que l'étape suivante peut être "attaquée" : la définition de la politique de recherche.

I. DEFINITION DU SUJET

A. L'ORIGINE DE LA DEMANDE

Avant de commencer, il m'était indispensable de mieux cerner le sujet, l'état de ses recherches, dans quelle optique il pensait utiliser ce travail.

J'ai donc fait part à Monsieur Goulesque de la façon dont je pensais qu'il fallait aborder ce travail. Afin d'avoir des confrontations d'idées fréquentes et connaître au mieux sa demande, il a semblé que plusieurs entrevues, à différents stades de la recherche documentaire, seraient nécessaires. Cette méthode de travail très proche de la sienne lors de réalisations pour un maître d'ouvrage l'a enthousiasmé. C'est ainsi que nous avons travaillé à un rythme de visites tous les quinze jours entrecoupés de conversations téléphoniques dès que le besoin s'en faisait ressentir.

Au travers de ces premières photographies, Monsieur Goulesque désirait approfondir les exigences auxquelles la nature doit s'adapter et la manière dont elle s'en accomode.

La structure de l'espace impose sa loi aux objets et personne ne s'y soustrait. Pour un architecte, cette notion d'espace est primordiale, une construction y étant soumise. Mais ce n'est pas le seul : la nature elle même ne peut l'éviter. Pour réaliser son innombrable diversité, elle est obligée de "jouer" avec ces contraintes associant un nombre restreint de formes fondamentales jusqu'aux limites autorisées. Une structure qui naturellement n'existe pas, est "spatialement" irréalisable.

Etant donné sa profession, sa démarche personnelle part bien évidemment de l'architecture, mais dans ce cas présent, c'est une vision "biologique" qu'il recherche. C'est la raison pour laquelle il m'a confié ce travail puisque initialement, j'ai une formation en biologie.

B. L'ENONCE DU SUJET

Un premier regard autour de soi montre l'extrême diversité de la nature (tant au niveau macroscopique que microscopique). Or, une étude plus poussée va à l'encontre de cette constatation : en réalité, formes et structures sont étrangement limitées. L'immense variété des différentes créations naturelles provient du remodelage d'un nombre restreint de structures fondamentales. Mais ces structures ne s'associent pas au hasard : elles obéissent à des lois mathématiques dont elles ne peuvent se déjouer.

Mon rôle a donc été d'établir une bibliographie mettant en évidence les limites auxquelles des formes naturelles, les astuces déployées par celle-ci pour éviter au maximum les problèmes.

II. METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

INTRODUCTION

Ces premières entrevues m'ont permis de mieux cerner la demande. Elle a également eu le mérite de permettre à Monsieur Goulesque de bien définir lui-même ce qu'il désirait. Ainsi, je risquais moins d'être confrontée à des problèmes similaires à ceux rencontrés lors de mon travail précédent. J'ai eu la chance de bénéficier d'une véritable coopération de sa part : non seulement par la fréquence de nos entrevues mais également par une démarche commune. En effet, le propre du documentaliste est de s'adapter à chaque interlocuteur pour répondre de la manière la plus adéquate. Or, la profession d'architecte est particulière : habituée à traiter avec les maîtres d'ouvrages, elle doit quotidiennement écouter les demandes et ajuster ses propositions. C'est donc une profession nécessairement à l'écoute dont le résultat final provient de cette démarche commune : le client émet des désirs et l'architecte propose une solution qu'il pense la meilleure.

Dans cette optique, Monsieur Goulesque m'indiquait les orientations qu'il désirait approfondir.

Etant donné la méthode de travail adoptée, Monsieur Goulesque m'a conseillé de rédiger la synthèse au fur et à mesure de la recherche. Selon lui, ces deux étapes sont trop liées pour être dissociées : il pense qu'une telle méthode est plus profitable pour l'un et pour l'autre.

A. POINT DE DEPART

Dès la première entrevue, Monsieur Goulesque m'a cité deux ouvrages :

- Tout d'abord, le tome 3 de l'histoire mondiale de l'architecture et de l'urbanisme moderne par Michel Ragon. Cet ouvrage m'a été d'une aide précieuse à plusieurs titres. Il m'a permis de bien m'imprégner du sujet. De plus, il est très riche en exemples concrets et en références : aussi m'y suis-je référé tout au long de la rédaction de cette synthèse.

- Le numéro d'Architecture d'Aujourd'hui sur les projets prospectifs des années 70 fut la seconde référence.

Ces deux ouvrages m'ont non seulement aidée à "me lancer" dans le sujet mais également à définir ma politique de recherche.

B. DEFINIR UNE POLITIQUE DE RECHERCHE

Définir une politique de recherche consiste à se fixer une méthodologie de travail en fonction du but désigné. Il faut effectuer des choix bibliographiques pertinents : pour cela, il faut déterminer des points d'accès, analyser la nature des recherches et faire une liste des moyens.

1) Les orientations

Monsieur Goulesque est architecte, je suis biologiste : dès le départ, cette vision "biologique" l'a conduit vers moi. Cependant, s'il recherche une information à ce sujet, c'est pour en profiter professionnellement ; son désir est, en fait, une synthèse complémentaire de sa formation personnelle. Pour que ce travail lui soit utile, il faut donc non seulement des références de biologie mais également d'architecture.

Ceci met en valeur ce qui a précédemment été entrevu : un travail de recherche résulte d'une collaboration réelle, même si la rédaction finale de la synthèse ne dépend que de moi.

Cette démarche explique les orientations choisies : l'architecture et la biologie.

2) Les points d'accès

Dès cet instant l'ouvrage de Michel Ragon m'a été utile. J'ai alors voulu connaître d'autres références sur ce sujet. Pour cela, je suis allée à la Bibliothèque Nationale qui est indexée par le système Rameau. Comme c'est un langage contrôlé, il permet une indexation univoque. Le système Geac autorise une interrogation par titre ou par auteur. Ainsi, grâce à l'entrée par auteur j'ai récupéré la fiche descriptive de l'ouvrage : j'ai alors pu identifier les mots-clefs.

Or ce système Geac rend possible l'interrogation par mots-clés ; en utilisant ceux obtenus lors de la demande par Michel Ragon, j'ai découvert une dizaine de références. Tous avaient été indexés sur le terme : Architecture -- Composition proportion

Ce mode d'accès dans B.N. Opale m'a permis de trouver d'autres références grâce à d'autres descripteurs et en choisissant MT (Mot du titre) = Formes et nature, ou en combinant Architecture et Nature. Puis par répercution, j'ai avancé dans mes recherches : si un ouvrage m'intéressait, j'en recherchais l'auteur. J'ai parfois découvert d'autres ouvrages, indexés de façon différente, mais d'un grand intérêt quant à cette étude.

A l'école d'architecture, le mots-clé est : Architecture biologique. Mais ce terme est dangereux car trop peu précis. A cause de lui, j'ai eu un bruit important au cours de mes recherches. Cependant, la bibliothèque de l'unité pédagogique de Paris 7 m'a appris un élément intéressant. Actuellement, ils ont, à l'essai, une banque de données interrogeable sur Minitel : Archires. Cette base aura un thésaurus : ils viennent donc de mettre au point un thésaurus national en collaboration avec d'autres écoles d'architecture.

Du côté de la biologie, le problème se pose différemment car il y a peu de littérature consacrée à ce sujet : beaucoup décrivent l'esthétique de la nature, mais peu l'expliquent de façon rationnelle. En réalité, ce genre de renseignements se glanent dans des ouvrages traitant d'animaux ou de végétaux en général. Aussi mes points d'accès sont choisis selon une optique différente. Ayant parlé de ce problème avec Monsieur Goulesque, il m'a conseillé de sélectionner les éléments naturels à étudier. C'est ainsi qu'il m'a dit être intrigué par les virus, les escargots (ou tout ce qui se rapprochait de la forme en spirale), la notion de réseaux (arborescence, réseaux fluvial...).

3) Nature des recherches

Monsieur Goulesque m'avait informé que ce type de problèmes avait été abordé de nombreuses fois sous des formes très différentes (décorative, structurelle, formelle...). Soulevé dans les années 70-75, il a donné naissance aux projets prospectifs. Aussi, ma recherche doit être à la fois rétrospective et actuelle. Ce point ne devra pas être négligé lors de la recherche automatisée car sinon je risque de perdre nombre d'informations importantes.

De plus, cette étude est très générale quant à l'origine des documents : il ne s'agit pas d'une bibliographie nationale mais, au contraire, internationale. C'est la raison pour laquelle, bien que fort utile au départ car elle m'a permis de "dégrossir" le travail de fond, la Bibliothèque Nationale s'est vite révélée insuffisante. D'où la consultation d'autres organismes tels la bibliothèque de l'école d'architecture, celle de l'Institut de Biochimie de Bordeaux ou de la Faculté de Sciences.

Quant à la nature physique de ces références, elles peuvent se trouver tout autant dans des monographies que dans des périodiques pour des études spécifiques.

4) Liste des moyens

Ces moyens peuvent être séparés en trois genres : la recherche manuelle, la recherche automatique et les contacts personnels.

a) La recherche manuelle

J'ai précédemment cité les deux ouvrages ayant facilité le démarrage de ce travail. J'ai en outre spécifié que le livre de Michel Ragon m'a en particulier beaucoup aidé dans la définition de mes points d'accès. Je m'en suis servi car c'est un livre extrêmement bien documenté.

Cette recherche manuelle s'est faite de façon classique en allant dans le répertoire des différents organismes intéressants. Je commençais toujours par les mots-clés puis quand une référence

retenais mon attention, je notais l'auteur. Je vérifiais ensuite, dans le catalogue auteur, s'il n'avait pas écrit d'autres ouvrages de thèmes similaires. De plus, une fois une "bonne référence" trouvée, je me servais de sa bibliographie. C'est ainsi que de fil en aiguille, j'ai eu connaissance d'ouvrages susceptibles d'intéresser le demandeur. Par ailleurs, au fur et à mesure de l'avancement de mes recherches, certains auteurs devenaient familiers : cela m'a également aidé dans les choix à retenir.

b) La recherche automatique

Je n'ai fait cette recherche que tardivement : aussi, comme je viens de le dire, j'avais acquis une certaine habitude quant aux choix des descripteurs et des auteurs ayant fréquemment écrit à ce sujet. Ceci m'a beaucoup servi lors de l'interrogation en ligne.

Pour la biologie, il m'était difficile de choisir une base de données pour les raisons expliquées lors de la recherche manuelle.

Par contre, pour la recherche au niveau de l'architecture, j'ai interrogé Urbamet :

1 - Architecture et environnement	412
2 - Formes architecturales	620
3 - 1 et 2	7

c) Les contacts personnels

Au cours de mes études, un professeur de biologie moléculaire passionné par la virologie, non seulement par leur reproduction et leur mécanisme d'action mais également par leur structure, nous avaient donné un dossier fort bien documenté dont la bibliographie était très complète. Me souvenant de l'intérêt de ses interventions, j'ai consulté ces cours, qui m'ont donc été très utiles.

Désirant de plus amples renseignements sur ce thème, je lui ai demandé une entrevue qui m'a permis de compléter les informations déjà recueillies.

CONCLUSION

D'un commun accord, nous avons préféré nous limiter à quelques structures plus spécifiques : les polyèdres (plus spécialement les icosaèdres à cause des virus), les spirales (l'architecture et la nature possèdent de nombreuses formes en spirale) et les arborécences (c'est une structure se retrouvant fréquemment dans les éléments naturels).

Le travail proposé est donc le suivant : après une étude générale sur l'espace et ses structures dans un premier chapitre, les trois parties suivantes seront consacrées respectivement aux trois thèmes définis précédemment.

- I L'ESPACE : SA NATURE ET SES STRUCTURES*
- II LES POLYEDRES*
- III LES SPIRALES*
- IV LES ARBORESCENCES*

Avant de passer à la synthèse proprement dite, je voudrais signaler que cette bibliographie m'a servi à m'imprégner du sujet et m'a inspiré tout au long du travail. J'ai glané des informations dans toutes les références à plusieurs reprises : aussi, il m'est difficile de citer les ouvrages au fur et à mesure de la rédaction. C'est la raison pour laquelle j'ai choisi une présentation de la bibliographie par chapitre malgré l'aspect un peu trop cloisonné que cela induit.

SYNTHESE

SYNTHESE

Pour parvenir à une si grande variété, la Nature doit jouer "au mécano" avec un nombre restreint de formes : icosaèdres, spirales et arborescences sont ses préférées. Chacune a un rôle bien précis.

Les pentagones se réservent le pouvoir de réaliser des fleurs mais sont incapables de créer des cristaux ; les hexagones, eux, se chargent des structures répétitives à deux dimensions. Quant aux spirales, elles interviennent dans la réplication des virus comme dans la répartition de la matière au sein de l'univers. Cette dernière remarque n'est pas anodine : elle signifie que ce phénomène intervient non seulement au stade du visible, mais également au stade microscopique et macroscopique (8). Le monde viral se montre particulièrement riche et c'est la raison pour laquelle de nombreux exemples seront pris dans ce milieu pour illustrer les thèses avancées.

I. L'ESPACE : SA NATURE ET SES STRUCTURES

A. LA NATURE DE L'ESPACE

L'univers est uniforme ; ce caractère affecte les formes.

Prenons, par exemple, un disque d'argile. Selon la façon dont il est modelé, il prendra des formes très différentes. Si on l'écrase avec un rouleau, ce disque se répandra dans toutes les directions avec la même facilité. Par contre, le fait d'amincir le centre conduit à un bol, alors que le fait d'amincir la périphérie amène au contraire à une selle.

De la même façon, six triangles équilatéraux autour d'un point central conduisent à une structure plane : cinq de ces triangles aboutissent à un bol retourné et sept à une selle (3, 4).

Ces deux exemples permettent une première constatation : les transformations sont figées et résident uniquement

dans la nature de l'espace. Jamais cinq ou sept triangles ne donneront une structure plane.

La nature subit les mêmes contraintes que le disque d'argile. Une huître permet de le démontrer : une de ses coquilles est aussi plane qu'après le passage d'un rouleau ; l'autre est concave. Or, le périmètre de cette deuxième coquille a une vitesse de croissance supérieure à celle du centre. Elle se retrouve donc physiquement dans une situation comparable à celle du disque d'argile dont on étire la périphérie. Dans son patrimoine génétique, l'huître ne possède pas de gène responsable de la forme de sa coquille ; par contre un de ses gènes détermine son mode de croissance plus rapide à l'extérieur qu'à l'intérieur : c'est cela qui lui donne sa forme (5, 7).

B. L'EFFET D'ECHELLE

L'effet de taille absolue en tant que déterminant de la forme montre comment l'espace modèle les choses qui nous entourent (14). Dans l'étude des polyèdres, nous ne tenons pas compte de la magnitude. Cependant, les relations qui naissent d'une différence de taille ont un effet sur le comportement structural. Pour comprendre les effets de la dimension et la façon dont ils découlent de l'uniformité de l'espace, considérons des polyèdres réguliers et comparons la surface externe de chaque solide au volume : la surface est proportionnelle au cube de la dimension linéaire. Cette loi est généralisable à tous les espaces à courbure constante. Elle donne une mesure de la manière dont s'étend l'espace et par extension, elle décrit l'étalement de tout ce qui se distribue dans l'espace : la matière mais aussi l'énergie par exemple.

De nombreux phénomènes varient avec la surface, nombreux d'autres avec le volume. Le plus explicite est le poids. Un gros objet a plus de volume par rapport à sa surface qu'un petit objet. Ainsi, pour les êtres-vivants, un gros organisme produit plus de chaleur qu'un petit. Proportionnellement, il est plus faible et a plus de difficultés à assimiler la nourriture et l'oxygène. Pourquoi ? Parceque ce sont des fonctions qui dépendent de la surface externe. La nature a contourné la difficulté : les gros organismes compensent leurs avantages en volume par une augmentation sélective des

surfaces critiques. Ils introduisent des complications : amincir, pousser des poils, brancher, plisser, étirer... Ainsi, dans le monde végétal, les réseaux des branches et des racines (9, 13), et, dans le monde animal, les ramifications des systèmes circulatoires augmentent beaucoup la surface. Les fonctions liées à la surface sont en harmonie avec celles qui dépendent du volume (2). C'est la raison pour laquelle, petits et gros ont chacun leurs avantages et coexistent dans la nature.

Deux astuces sont employées par la nature et par l'homme pour compenser l'effet de taille : soit utiliser un matériau plus résistant, soit l'alléger (3, 1).

La première solution est restreinte car tout matériau est limité par un chiffre maximum et un chiffre minimum au delà desquels il ne peut supporter son propre poids.

La seconde solution est plus courante ; c'est par ailleurs celle fréquemment adoptée par les architectes. Une cavité intérieure et une triangulation des membrures bien adaptées permettent au poivron une résistance égale (mais de poids inférieur) que s'il était plein (12). La comparaison entre la section agrandie de l'os d'un tibia humain et l'étude structurale de Frei Otto (en collaboration avec Koch et Minke) (5) décrit bien la similitude entre l'architecture et la nature. Dans les deux cas, le souci majeur a été la réduction de la masse en vue d'augmenter la solidité.

Cet effet d'échelle est donc très important pour la nature : il est indissociable des formes elles-mêmes car chaque forme possède ses propres dimensions avec une limite supérieure et une limite inférieure qu'elle ne peut dépasser (15).

C. LES STRUCTURES DE L'ESPACE

La théorie de l'évolution préconise la sélection naturelle c'est à dire la sélection des formes les mieux adaptées (16). Ceci signifie que la nature n'est constituée que de formes "idéales". Si ces formes obéissent à certaines lois, est-il possible de les prédire ?

Peut-on les prévoir en fonction de nos connaissances des propriétés géométriques de la distribution de la matière dans l'espace?

Par exemple, nous connaissons deux lois fondamentales : le plus court chemin entre deux points est la ligne droite ; la circonférence d'un cercle est l'ensemble des points équidistants d'un point fixe. Ces deux principes permettent d'affirmer "le choix" que fera l'eau dans une rivière ou dans un lac. Mais le problème dans la nature est la réunion de plusieurs conditions et l'interaction des unes sur les autres, modifiant les propriétés de chacune. Aussi, la nature n'est jamais conforme aux modèles simples mais obéit à une multitude de contraintes.

A partir de points disposés de façon bien déterminé, il est possible de matérialiser plusieurs modèles (17). Chacun de ces modèles correspond à des propriétés géométriques différentes (l'uniformité, le remplissage de l'espace, la longueur totale, la diversité) et a des avantages spatiaux : la nature les choisit donc en fonction des circonstances. Tous présentent le même aspect : il y a toujours un segment de moins que de points. Il se fait automatiquement un équilibre d'échange : les points où plusieurs lignes se coupent compensent ceux où une ligne se termine. Ceci peut se résumer "mathématiquement" par la formule suivante :

$$1J1 + - 0J2 - 1J3 - 2J4 \dots = 2$$

*J1 = Nombre de points simples (point d'où part
1 ligne)*

*J2 = Nombre de points doubles (point d'où
partent 2 lignes)*

En conclusion, nous pouvons dire que chaque forme a ses propres contraintes mais collabore avec d'autres pour réaliser des structures diversifiées, plus grandes et plus adaptées.

Nous allons maintenant étudier plus spécialement quelques formes naturelles.

II. LES POLYEDRES

A. GENERALITES

Si l'on reprend le bol à cinq triangles de tout-à-l'heure, une question intéressante se pose : si l'on continue à rajouter des triangles, arrivera-t-on finalement à obtenir un volume clos ? Il faut attendre le quinzième triangle supplémentaire pour y parvenir. Le volume final est un polyèdre régulier à vingt faces : toutes les sous-unités constitutives s'emboîtent parfaitement les unes les autres tel les éléments d'un puzzle. De plus, chaque face et chaque angle est régulier. En réalité, il n'y a pas plusieurs alternatives : soit il se construit parfaitement, soit il ne se construit pas du tout (21). Ceci est un exemple des limites de la nature. Jamais, elle ne parviendra à d'autres constructions volumétriques que les cinq suivantes : 3 triangles (l'un avec des sommets à 3 arêtes, l'autre à 4 arêtes et le troisième à 5 arêtes), 1 carré au sommet à 3 arêtes et enfin un pentagone au sommet à 3 arêtes.

Cette première constatation n'est exacte que si l'on part de structures planes de même type. Un assemblage fait à partir de structures de type différent permet un nombre de possibilités supérieur mais irrémédiablement exhaustif. En effet, à condition de ne pas tenir compte des prismes, il faut alors rajouter 14 polyèdres qualifiés de "semi-régulier" (33).

Une autre expérience enrichissante consiste à remplir un espace sans laisser de vide : en tenant compte cette fois-ci des prismes, seuls 32 assemblages sont réalisables (33).

Ainsi, arrivons nous à une première réalité grâce aux polyèdres réguliers et semi-réguliers (24, 28) : la nature n'a pas une multitude de formes fondamentales. Et pourtant, elle n'utilise que rarement ces formes parfaites : son but n'est pas de réaliser des formes pures ; la plupart du temps, elle se moque des contraintes et arrive à des formes très "torturées". Elle profite de la flexibilité des matériaux et crée des variations. Mais cette liberté est bien restreinte en ce sens qu'elle ne peut s'effectuer, là encore, que limitée par les possibilités qu'à la matière de se distribuer dans l'espace.

B. LES ICOSAEDRES

1) Définition

Un icosaèdre est un polyèdre défini : un deltaèdre où les cotés triangulaires sont équilatéraux et au nombre de vingt. De nombreux virus ont une telle structure : ils font partie de la symétrie cubique et ont toujours au minimum 12 sommets, 30 cotés et 20 triangles. C'est pourquoi ils serviront de base d'exemple de ce thème.

2) Les dômes géodésiques

La compréhension de la structure des virus à structure icosaédrique a bénéficié des études de Buckminster Fuller sur les dômes géodésiques pour le pavillon des Etats-Unis lors de l'exposition universelle de Montréal en 1967 (25, 31).

Dans les deux cas, c'est une architecture constituée de triangles : quelque soit la subdivision, on peut retrouver les unités élémentaires et former un cercle. La majorité des éléments ont comme base 6 triangles avec de temps en temps des structures à 5 triangles. En fait, pour une taille donnée, il existe une relation constante entre le nombre d'héxamères et de pentamères. Ces derniers sont indispensables pour donner la courbure. Les triangles ne sont pas équivalents mais quasi-équivalents (équilatéraux mais n'ont pas forcément de même taille) (23).

Néanmoins, un certain nombre d'éléments sont à noter (32):

- Les sommets pentamériques sont tous inscrits sur une sphère parfaite. Les héxamères n'ont pas de sommets : par contre, leurs centres sont sur une autre sphère de diamètre inférieur au précédent.

- Dans une structure équivalente, l'angle entre les 5 triangles d'un pentamère est différent de celui entre les 6 triangles d'un héxamère. Pour une structure quasi-équivalente, c'est impossible : soit les triangles ne sont pas équilatéraux, soit les sommets ne sont pas sur le même diamètre.

- Quelque soit la structure, il reste toujours 12 sommets pentamériques. Lorsque la sphère diminue de taille, ce sont les

hexamères qui disparaissent. A la limite, il ne subsiste que les pentamères : la structure obtenue alors est équivalente ; c'est un icosaèdre parfait.

3) La symétrie icosaédrique

a) Centres et plans de symétrie

Dans la structure géométrique, ces deux éléments existent, mais sont absents de la structure des virions. En effet, les virions sont uniquement constitués d'acides aminés (AA) de série L. Or il existe une autre catégorie d'AA qui est la série D : les seuls moyens de passer d'une série à l'autre est par un centre ou un axe de symétrie. Puisque les virions sont uniquement de la série L, ce transfert est impossible.

b) Axes de symétrie (26)

Seul élément de symétrie caractérisant les virions, l'axe de symétrie existe en trois sortes :

- 15 axes d'ordre 2 : l'axe passe par le centre d'un coté et traverse jusqu'au centre du coté opposé.
- 10 axes d'ordre 3 : l'axe passe par le centre d'un triangle ; il y a donc 20 faces pris 2 à 2.
- 6 axes d'ordre 5 : l'axe passe par deux triangles opposés.

c) Importance de cette symétrie

Lla structure planaire est constituée d'un assemblage de structures triangulaires. Avec 6 structures, on construit des hexamères. Il est possible d'enlever des unités. Progressivement, la tension augmente (la limite est fixée à 4 triangles).

On peut calculer le nombre de triangulations T . Déterminé par la distance entre les centres de deux pentamères voisins, il suffit de projeter le vecteur dans un système de coordonnées hexagonal.

$$T = f^2 (h^2 + hk + k)$$

avec $f = N-1$ (N est le nombre de fois où le vecteur rejoignant 2 pentamères passe par un hexamère)

h : valeur de la projection sur l'axe h ($=f \times h$)
 k : valeur de la projection sur l'axe k ($=f \times k$).

Si le vecteur rejoignant deux pentamères voisins est confondu avec l'arête du virion de l'icosaèdre, la valeur de T est le carré de la distance entre 2 capsomères moins 1.

4) Les virions comme exemples

La symétrie icosaédrique permet de disposer de façon équivalente un nombre de protéines inférieur ou égal à 60. Quelques virions ont exactement 60 unités. Mais la plupart ont un nombre supérieur. La symétrie icosaédrique résout le problème par l'utilisation des structures quasi-équivalentes (19,36).

$$a) T = X^2$$

Les unités adoptent une disposition très particulière permettant de respecter la symétrie icosaédrique.

Soit le virus de l'herpès (240 unités). Imaginons 20 triangles de même taille, chacun constitué de 4 triangles unitaires avec 3 protéines de même direction : $20 \times 4 \times 3 = 240$. On retrouve bien le chiffre initial.

On conserve toujours un icosaèdre (même s'il augmente de volume) avec 20 faces, 12 sommets et 30 cotés. Le nombre de triangulations se calcule ainsi : $P + H = 12 + 10(T - 1)$.

$$b) T > < X^2$$

Tout ce qui précède n'est vrai que lorsque le nombre de triangulations est un carré. Quand il est différent, on a un solide s'inscrivant dans un cube. Le problème se pose alors différemment car 2 pentamères ne sont pas séparés par des hexamères entiers. Le virus de la mosaïque jaune du navet a une telle structure. A partir de $T = 7$, les virions peuvent être gauche ou droite : l'un est l'image de l'autre.

III. LES SPIRALES

A. INTRODUCTION

En 1964, Louis Armand (15) confiait : "C'est à partir de lois biologiques que travailleront les architectes ; les nombres d'or ne seront plus géométriques mais biologiques."

C'est en effet la réflexion que l'on peut se faire en regardant un certain nombre de projets et en particulier ceux issus des prospectives des années 75. Michel Ragon (75) a beaucoup travaillé sur ce sujet. L'architecture est alors conçue comme une cellule biologique obtenue non pas par mimétisme, mais par analyse de structures animales ou végétales. Un nouveau répertoire de formes envahit le domaine de la construction. Ainsi, certains bâtiments ont adopté la forme de l'escargot avec une circulation en spirale, symbole d'évolution dialectique de l'humanité et de l'univers. Cette spirale est très souvent présente dans le monde biologique et puisqu'elle a inspiré un nombre important de projets nous allons l'étudier de façon plus approfondie.

B. LES SPIRALES

1) Quelques exemples dans la nature

Le tourbillon est un prototype d'enclos spatial. En s'enroulant sur lui même, il délimite un domaine protégé. Il vit de l'énergie qu'il puise dans le courant principal. Il est intéressant de remarquer que souvent les tourbillons vont par paire (53). Ainsi, chaque tour de rame engendre une paire de vortex (43).

Dans le monde animal, à part la corne de narval, toutes les cornes vont par deux. Sauf pour cet animal, toute spirale dextrogyre de corne ou d'os est, en général, compensée par une spirale lévogyre. Chez la fougère, l'axe de la feuille est enroulé sur lui même en forme de crosse. La pousse du polype dessine ainsi une parfaite spirale logarithmique (49).

A un niveau moléculaire, le DNA, les acides-aminés et les sucres se présentent sous des formes droites ou gauches (cf la démonstration précédente de la symétrie icosaédrique). Il existe des bactéries énantiomorphes qui se nourrissent de sucres énantiomorphes

: les bactéries droites ne digèrent que les sucres droits et les bactéries gauches que les sucres gauches.

Le cosmos lui-même possède cette particularité : les typhons tournent positivement au nord de l'équateur et négativement au sud, exactement comme les nombres se placent de part et d'autre du zéro, négatifs à gauche, positifs à droite.

Dans le monde animal, l'escargot est un exemple classique, mais également les bactéries sont également intéressantes. En effet, une espèce de bactéries, les spirochètes, ont une structure en spirale ; le tréponème pâle (agent de la siphyllis) appartient à cette classe. Bien qu'appartenant à une autre espèce : celle des vibrions, le vibron cholérique a une forme incurvée (39, 40).

2) Pourquoi la spirale ?

Pour tenter de mieux appréhender le problème, nous prendrons comme premier exemple les coquilles marines parmi lesquelles on trouve un nombre élevé de formes en spirale. Pour nombre d'entre elles, les spires s'élargissent régulièrement de façon à produire une spirale logarithmique.

Au fur et à mesure de sa croissance, l'animal élargit son domaine. Chaque incrément a la même forme que le précédent et la même position : il est simplement de plus grande taille. La méthode employée pour maintenir la croissance en spirale de la coquille consiste à faire grandir plus vite la surface externe (celle qui va le plus loin de l'axe d'enroulement) que la surface interne. Cette différence engendre automatiquement l'enroulement. Pas plus que pour l'huitre de tout à l'heure, il n'existe de gène pour la forme : par contre un des gènes facilite une croissance différentielle.

D'Arcy Thompson (34) nous fait remarquer que les cornes poussent de la même façon. Si à la base de la corne, la zone antérieure pousse plus vite que la zone postérieure, la corne se courbe vers l'arrière.

Reprenons l'exemple du DNA : support de l'hérédité, il est la combinaison de deux hélices simples. Chaque hélice est formée d'une colonne de molécules de sucres et de phosphates qui

s'entourent sur elle-même ... parceque les liaisons chimiques qui les relient sont de longueurs inégales.

La méthode d'enroulement est tout à fait générale et indépendante de la nature du tissu ou du matériau utilisé. Les formes s'enroulent de façon que la surface plus longue (ou qui croît le plus vite) soit à l'extérieur et que la plus courte (ou qui croît le moins vite) soit à l'intérieur laissant ainsi plus de place dehors que dedans. Ce principe de croissance est commun à toute les spirales.

3) Les spirales architecturales

Le Corbusier a non seulement de nombreuses réalisations à son actif, mais également un nombre important d'écrits (41). A propos de méandre, il définit "la loi du méandre" car selon lui "l'étude de la marche des eaux est une leçon" Dans un autre ouvrage, il suppose à propos de la spirale que "ce doit être cet axe sur lequel l'homme est organisé en accord parfait avec la nature et probablement l'univers".

La loi des nombres et les formes sont inscrites dans les oeuvres naturelles. Pour imager sa théorie, il cite l'étude des bourgeons avec leurs stylisations géométriques ou des coquillages ouverts. Il est exact que la spirale a fortement inspiré nombres d'architectes : un exemple très connu reste le musée Guggenheim de Frank Loyd Wright (53) ou le non moins connu monument à la troisième internationale construit par Tatlin en 1920.

L'esquisse de Erich Mendelsohn (35) pour un studio de cinéma à un époque tout à fait contemporaine (1917) peut également servir d'exemple. On note trois formes hélicoïdales semblables au musée de Guggenheim. Les représentations de Mendelsohn n'utilisent pas la quadridimensionnalité des cubistes mais elles exaltent le mouvement au moyen d'une vision d'angle et de matériaux dynamiques. Trois années plus tard, il réalise la Tour d'Enstein dont l'esquisse présente bien ce mouvement en spirale ascendant, symbole de l'aspiration évolutive de l'humanité et de l'univers.

Pour rester toujours dans la même optique, intéressons nous à la Bavinger House de Norman (1950). Plus que la maison elle-même, ce sont les plans masses qui montrent cette forme en spirale (48). On retrouve exactement la structure d'un coquillage marin.

L'architecture intérieure n'est pas de reste : il ne faut pas oublier de citer au passage l'escalier à double révolution du musée du Vatican ou, plus récent, l'escalier de la bibliothèque de l'Institut du Monde Arabe (Nouvel et Architecture Studio).

Avec Le Corbusier, un nouveau type de construction apparaît et le musée à croissance illimitée en est le témoin (36). Les temps modernes posaient jusqu'alors le problème de la croissance (ou de l'extension) des bâtiments. Par standardisation totale des éléments de construction (poteau, poutre, élément de plafond, éclairage...), le tout réglé par des rapports de section d'or, il assure des combinaisons faciles, harmonieuses et illimitées. Le principe fondamental est la construction sur pilotis, l'accès au niveau du sol se faisant par le milieu même de l'édifice où se trouve la salle principale, véritable hall d'honneur. La solution adaptée est une spirale carrée conçue sur le modèle d'une spirale de coquillage marin (42). Des interruptions le long des parois peuvent faire communiquer les locaux et permettre une foule d'agencement divers. Le standard apporte ici l'économie, mais aussi une richesse de combinaisons propre à répondre à la bonne organisation.

C. LES MEANDRES

La méandre est étroitement liée à la spirale. Lorsqu'au cours de sa croissance, une face s'étire plus que l'autre, on obtient une forme enroulée. Cette forme peut être enroulée à droite ou à gauche. Imaginons que le sens de la croissance varie de façon périodique : la forme ne serait plus enroulée mais ondulée. C'est le principe même adopté par le serpent pour se mouvoir : il contracte et relâche ses muscles alternativement et de façon cyclique sur chaque flanc. Cette alternance de contractions et d'extensions force le corps à onduler.

Dans le domaine de l'architecture, la colonne flexible de Frei Otto constitue un bon exemple. Des plaques triangulaires de taille décroissante vers le haut supportent la compression due à la charge : elles jouent le rôle des vertèbres de notre colonne vertébrale. Des fils de tension fixés aux plaques contrôlent la forme, comme nos muscles contrôlent la forme de notre colonne vertébrale.

Un exemple courant de méandres dans la nature est le cours des rivières (46, 47). Alors que le plus court chemin entre deux points est la ligne droite, pourquoi tout cours d'eau présente tant de courbes de la source à l'embouchure ? Il existe trois théories différentes pour expliquer ce phénomène : soit la force centrifuge et l'érosion, soit la dissipation uniforme de l'énergie, soit une théorie basée sur les probabilités. En réalité, il semble que les trois explications s'interpénètrent dans le cas des méandres.

Dans un monde où les formes sont en nombre limité, les méandres satisfont à plusieurs conditions.

D. PARABOLES ET HYPERBOLES

A partir des spirales, doivent être mentionnés quelques noms dont l'architecture se retrouve plus ou moins.

Le plus connu est peut-être l'opéra de Sidney en Australie du danois Jørn Utzon (1956) : symbole le plus marquant des années soixante, il est conçu comme de grandes calottes de nervures préfabriquées en béton volant au ras des eaux du port.

A la même époque (1958), le Pavillon Philips à l'exposition universelle de Bruxelles fait état de voiles "paraboles - hyperboles". C'est la première manifestation que nous fait Le Corbusier, en collaboration avec Xenakis, d'un art nouveau : les "jeux électroniques", synthèse illimitée de la couleur, de l'image, de la parole, de la musique et du rythme.

Un autre architecte contemporain : l'italien Pier Luigi Nervi a également conçu des formes monumentales inspirées de la nature comme, par exemple, le "cité de Paris". Ces œuvres sont parmi les plus abouties de l'architecture moderne.

III. LES ARBORESCENCES

L'idée toujours présente doit être la suivante : toutes les formes tracées à la main par un artiste, calculées par un mathématicien ou résultant de forces naturelles sont moulées dans le même environnement spatial.

Un certain nombre de questions méritent des explications : les arbres ont de grosses branches qui se subdivisent en une multitude de petites branches : quelle est la hiérarchie de ces branches ? De combien troncs et branches sont-ils plus gros que rameaux et brindilles ? Pourquoi fleuves et éclairs se ramifient-ils comme les arbres ? Pourquoi tant de systèmes grandissent-ils par adjonction d'éléments de plus en plus petits ?

A. LES RAMIFICATIONS

1) Le tracé théorique

Luna B. Leopold a étudié les tracés ramifiés à l'aide de nombres au hasard ; il s'est aperçu que ces tracés ressemblaient à des réseaux réels de rivières (56).

L'"analyse de Horton" (54) des diagrammes a été mise en au point par l'ingénieur Robert Horton puis modifiées ultérieurement par A. N. Stradhler (59). C'est la méthode classique d'analyse des systèmes fluviaux : aussi allons nous nous en servir pour décrire l'étude de Luna Leopold.

L'analyse partage un fleuve en cours d'eau du premier, second, troisième etc ... ordre d'après la règle suivante : un cours d'eau donné ne peut provenir que de cours d'eau d'ordre inférieur au sien. Ainsi, une rivière du premier ordre, qui naît à une source, ne reçoit pas d'autre rivière ; une rivière du deuxième ordre, qui naît à la jonction de deux rivières de premier ordre ne reçoit que des rivières de premier ordre. Dans les bassins fluviaux, les rivières d'un ordre donné sont en moyenne 3 à 5 fois plus nombreuses que celles d'ordre immédiatement supérieur, ce qui revient à dire que, pour un réseau donné, les fleuves du premier ordre sont environ quatre fois plus

fréquents que ceux du second ordre, eux mêmes à peu près quatre fois plus nombreux que ceux du troisième ordre.

Une autre constatation concerne les tailles : les branches d'ordre élevé sont en moyenne plus longues que les branches d'ordre faible. Horton a découvert que la surface du bassin de drainage est reliée à l'ordre d'un fleuve et que la longueur du lit d'une rivière est en moyenne égale à 1,4 fois la surface A élevée à une puissance $2/3$ (54). Ceci conduit à la formule suivante :

$$L = 1,4 \times A^{2/3}$$

Cette formule est une moyenne : le facteur multiplicatif varie en réalité entre 1 et 2,5 et l'exposant entre 0,6 et 0,7. Cet exposant en dit pourtant long sur la forme des rivières : un changement de taille s'accompagne d'un changement de forme.

Notons que le système d'irrigation des feuilles montre la même tendance ; c'est à dire que les grandes feuilles ont tendance à être relativement longues : le grande feuille du bananier s'oppose en ce sens à la feuille petite et ronde de l'oseille.

L'éclair est un phénomène qui s'effectue dans l'espace à trois dimensions. Mais une analyse de Horton de la projection à deux dimensions révèle le même rapport de bifurcations que dans un réseau fluvial (55).

Nous découvrons ainsi que de très nombreuses choses se ramifient selon le même principe. Partout et toujours, les branches d'ordre inférieur seront plus courtes que les branches d'ordre supérieur. Ainsi, il nous est possible de penser que les résultats statistiques de Horton dépendent plus de propriétés générales de l'espace que de mécanismes propres à l'écoulement des fleuves (point de départ de son analyse). Si des tracés semblables apparaissent dans des matériaux si différents, cela doit venir de ce que le terrain d'action, l'espace, est commun.

2) La pratique

Bien que statistiquement, les réseaux ramifiés correspondent au calcul, on ne peut pas dire que l'allure générale de nos fleuves sont ressemblants. Les embranchements sont trop abrupts et trop réguliers : la nature est plus douce et plus "fantasque".

Pour déterminer les angles corrects de chaque branchement et de chaque intersection, il faut s'intéresser aux travaux de Cecil D. Murray qui a montré comment des considérations d'économie d'efforts décrivent les angles de branchements (57, 58). Il a développé un système qui rend immédiat la détermination des angles de branchements. En portant en abscisse le rapport des diamètres des deux branches, on lit en ordonnée l'angle correspondant. L'utilisation de ce graphe permet un certain nombre de constatations :

- *Les petites branches se séparent du tronc suivant un angle voisin de 90° et ne modifient que peu la ligne du tronc ; les grosses branches divergent moins de la ligne du tronc mais la modifient davantage.*

- *La section totale des branches doit excéder celle du tronc. En effet, les branches doivent transporter autant de sève que le tronc : or, puisque les branches offrent plus de résistance à l'écoulement, leur section doit augmenter pour compenser cette résistance*

- *De subtils changements affectant une partie de l'arbre ont des répercussions sur l'ensemble ou encore, suivant les termes de Violet Le Duc "Chaque détail porte en lui un rapport défini à l'ensemble de la composition".*

Avant de terminer cette partie, il faut également spécifier que la nature ne calcule pas un travail ou un effort : elle laisse simplement chaque branchement prendre soin de lui-même et la sève, l'eau ou le sang va ensuite où le branchement l'entraîne. Il n'y a pas de préméditations dans la nature : elle n'utilise pas de mathématiques, elle ne produit pas délibérément de structures globales, elle laisse ces structures globales se produire d'elles-mêmes.

B. LES ARBRES

L'arbre est un cas concret des démonstrations exposées ci-dessus. En référence à Horton, nous attendrions d'un arbre qu'il s'étale dans l'espace de façon à ce que les branches d'un ordre donné soient 3 à 5 fois plus nombreuses que les branches de l'ordre supérieur. Ce n'est que partiellement exact car les branches ont besoin de lumière pour vivre. Elles cherchent donc à en capter le maximum en se dirigeant vers l'extérieur, négligeant alors les connexions à l'intérieur ombragé de l'arbre.

De même, si on considère l'arbre comme un réseau de transport d'eau et de nourriture, il doit respecter la théorie du travail minimum de Murray qui fait saillir les petites branches à angle droit des grosses et s'écarter les grosses les unes des autres avec un angle plus faible. Ceci se révèle exact.

Il faut toutefois noter que l'arbre est une structure vivante un peu particulière : il ya deux réseaux de transport, l'un pour l'eau appelé le xylème et l'autre pour la nourriture appelé le phloème. Ces deux réseaux travaillent par deux mécanismes différents et complémentaires : une pression positive provoquée par les racines qui agissent comme des pompes ; le système le plus courant est celui d'une pression négative où la sève s'écoule vers le haut tirée par l'évaporation. Le système d'irrigation d'un arbre est donc très spécial : il ne coule pas automatiquement d'un point haut vers un point bas. Utilisant l'information génétique contenue dans sa graine, il pousse vers le haut malgré la force de gravité qui le tire vers le bas (62).

La croissance des feuilles est entièrement déterminée par la division des cellules du méristème. Or, tous les méristèmes d'une plante donnée sont les mêmes : la structure de croissance est donc la même. La seule variation réside dans le fait qu'un bourgeon ne produit pas obligatoirement des feuilles. En effet, la partie la plus importante d'un arbre qui pousse est le méristème : l'arbre ne peut pousser qu'aux endroits du méristème spécialement préparés au préalable. Généralement, à un méristème apical sont associés des méristèmes inférieurs. En temps normal, leur croissance est inhibée

par une hormone synthétisée par le méristème apical. Ils ne seront actifs qu'en cas d'inactivité de ce dernier.

C'est cette unité structurale de formes vivantes qui a fortement impressionné Frank Lloyd Wright (53). Architecte américain, il a créé une architecture organique fondée en grande partie sur une "mystique" de la nature qui s'est traduit par une série de maisons : "les prairies houses".

Un autre grand architecte a également été impressionné par l'homogénéité de croissance entre plantes et arbres : Le Corbusier (36). Il a soupçonné que "l'arbre entier est une pure fonction mathématique" et qu'il réagit directement à son environnement.

En 1856, Jones essaie de tirer des conclusions au dernier chapitre de son ouvrage : "The grammar of ornament". Il déduit des exemples présentés les règles générales du dessin d'ornement, faisant référence aux objets naturels comme les arbres et les fleurs, et essayant de déceler les lois géométriques de leur structures.

Richard Redgraves (1804 - 1888), considéré comme le meilleur théoricien du groupe, développe le concept d'utilité, comme fondement premier de l'art appliqué (61)

Ruskin fournit un nouvel apport à la réforme des arts appliqués par ses études scientifico-formelles d'éléments naturels, les roches, les arbres, les nuages. Il ne se contente pas de les examiner d'un point de vue des sciences naturelles, mais il cherche à en faire ressortir, avec l'aide de la science, la structure intime qui est à la base des effets artistiques (61).

Il ne faut jamais oublier que la nature n'agit pas par obéissance à des lois mathématiques, mais par utilisation maximale de son environnement spatial en tenant compte de ses propres restrictions.

CONCLUSION

Quelques soient les exemples, tous induisent la même tendance : la nature ne peut pas construire où bon lui semble. Elle doit utiliser les règles draconiennes de l'espace : elle doit utiliser les réseaux d'héxagones à jonctions triples pour économiser la matière et doit utiliser d'autres modules en plus des hexagones pour enfermer l'espace. Elle doit augmenter la surface externe d'un gros organisme pour le faire fonctionner comme un petit. La croissance d'une partie affecte la croissance de toutes les parties...

Les règles sont rigoureuses, mais malgré leurs contraintes, la variété abonde. A travers cette variété des formes, ces règles s'expriment par une cohérence esthétique et une constance d'intention qui offrent un modèle à toute création humaine, et en particulier à la création architecturale.

En conclusion, je reprendrais les termes de Roland Fivaz (11): "L'ordre est omniprésent dans la nature et il obéit à des règles universelles que la physique a récemment mis à jour. Or ces règles sont également suivies dans les représentations mentales que l'homme construit, que ce soit par l'observation scientifique ou par l'expression artistique. Ordre matériel et ordre mental s'avèrent donc semblables".

BIBLIOGRAPHIE

L'ESPACE : NATURE ET STRUCTURE

- A -

- 1) ALLEN G. et MOORE CH. "L'architecture sensible : Espace, échelle et forme." éd. DUNOD (1982)
- 2) d'ARCY THOMPSON "On growth and form" éd. CAMBRIDGE UNIVERSTY PRESS (2ème édition) (1942)

- B -

- 3) BENEVOLO Leonardo "Histoire de l'architecture moderne : la révolution industrielle" éd. BORDAS (1980) Tome 1
- 4) BENEVOLO Leonardo "Histoire de l'architecture moderne : Avant garde et mouvement moderne (1890-1930)" éd. BORDAS (1980) Tome 2
- 5) BENEVOLO Leonardo "Histoire de l'architecture moderne : les conflits et l'après guerre" éd. BORDAS (1980) Tome 3
- 6) BONNER John T. "Morphogenesis" éd. ATHENEUM (1963)
- 7) BONNER John T. "The size of life" éd. NATURAL HISTORY (1969) 78 numéro 1 40-45

- C -

- 8) CENTRE CULTUREL THIBAUD DE CHAMPAGNE "Quand la nature se fait calligraphie : exposition minéraux de France du 2 au 23 mars 1977" ED. CENTRE CULTUREL THIBAUD (1977)

- E -

- 9) EPSTEIN Emmanuel "ROOTS" éd. SCIENTIFIC AMERICAN (1973) 227 numéro 5
- 10) EISENTEIN et MIKHAILOVYCH Sergueï "La non indifférente nature" Traduction et notes de Luda et Jean Schnitzer éd. UNION GENERALE D'EDITIONS (1978)

- F -

- 11) FIVAIZ Roland "L'ordre et la volupté" éd. PRESSES POLYTECHNIQUES ROMANDES (1989)

Bibliographie

- G -

- 12) GOULD Stephen J. "Allometry and size in ontogeny and phylogeny" éd. BIOLOGICAL REVIEW (1966) 41 587-640

- L -

- 13) LEOPOLD Luna B. "Trees and strams : the efficiency of branching patterns" éd. JOURNAL OF THEORETICAL BIOLOGY (1971) 31 339-354

- M -

- 14) MANSELL Georges "Anatomie de l'architecture" éd. BERGER-LEVRAULT (1979)

- R -

- 15) RAGON Michel "Histoire mondiale de l'architecture et de l'urbanisme moderne : Prospective et futurologie" (1978) 3

- T -

- 16) TROMBA Anthony et HILDEBRANDT Stephen "Mathématiques et formes optimales : l'explication des structures naturelles" éd. L'UNIVERS DES SCIENCES. COLLECTION : POUR LA SCIENCE (1986)

- S -

- 17) SHIMBEL A. "Structural parameters of communication networks" éd. BULLETIN OF MATHEMATICAL BIOPHYSICS (1953) 15 501-507
- 18) SCHULZ Norberg "Genius loci : Paysage, ambiance, architecture" éd. PIERRE MARDAGA (1981)
- 19) SCHULZ Norberg "Signification dans l'architecture occidentale" éd. PIERRE MARDAGA (1977)

LES POLYEDRES

- A -

- 20) ACKERMANN, H. W. "Cubic, filamentous and pleomorphic bacteriophages" éd. : LASKIN AND LECHEVALIER, HANDBOOK OF MICROBIOLOGY (1978) II 673-682
- 21) ANDREINS Angelo "Sulle reti di poliedri regolari e semiregolari e sulle corrispondenti reti correlative" éd. MEMORIE DI MATEMATICO I DI FISICA DELLA SOCIETA ITALIANA DELLE SCIENZE (1907) 14 75-129

- B -

- 22) BALL W.W.R. "Mathematical recreations and essays" éd. MACMILLIAMS (2^{ème} édition) (1959)
- 23) BELLET AJD. "The iridescent virus group" éd. ADVANCES IN VIRUS RES (1968) 13 225-246
- 24) BRANTON et KLUG A. éd. JOURNAL MOL. BIOL. (1975) 92 559

- C -

- 25) CHASIEL André "Les grands atlas de l'architecture mondiale" éd. ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS (1981)

- F -

- 26) FRAENKEL-CONRAT et KIMBALL "Virology" éd. PRENTICE HALL INC. (1982)
- 27) FRANKLIN RM., MARCOLI R., SATAKE H. et al. "Recent studies on the structure of bacteriophage PM2" éd. MED. MICROBIOL. IMMUNOL. (1977) 164 87-95

- K -

- 28) KLUG A. JOURNAL MOL. BIOL. (1975) 92 559

- M -

- 29) MELICK J.L., ALLISON A.C., BUTEL J.S. et al "Papoviruse" éd. INTERVIROLOGY (1974) 3 106-120

Bibliographie

- N -

30) NERMUT et AL. "Virus leucose murine" éd. KAPER 77

- P -

31) PHILIPSON L. et PETERSSONE "Structure and function of virion proteins of adenovirus" éd. PROG. EXP. TUMOR RES. (1973) 18 1-55

- R -

32) RUSSEL "Les virus" INSTITUT PASTEUR (1976) 163

- W -

LES SPIRALES

- A -

- 34) d'ARCY THOMPSON "On growth and form" éd. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (2ème édition) (1942)

- B -

- 35) BENEVOLO Leonardo "Histoire de l'architecture moderne : la révolution industrielle" éd. BORDAS (1980) Tome 1
- 36) BOESIGER W. et GUSBERGERT H. "Le Corbusier : 1910-65" éd. LES EDITIONS D'ARCHITECTURE (1967)

- C -

- 37) CHANAUD Robert C. "Aerodynamic whistles" éd. SCIENTIFIC AMERICAN (1970) 222 numéro 4

- G -

- 38) GANS Carl "Biomechanics : an approach to vertebrate biology" éd. J.B. LIPPINCOTT COMPANY (1974)
- 39) GARDNER Martin "L'univers ambidextre" éd. LE SEUIL (1985)
- 40) GARDNER Martin "La symétrie d'aujourd'hui" éd. LE SEUIL (1989)
- 41) GIRARD Véronique et HOURCADE Agnès "Le corbusier" éd. PIERRE MARDAGA (1985)
- 42) GOULD Stephen J. "Ecology and fonctionnal significance of uncoiling in *Vermicularia spirata* : an essay on gastropod form" éd. BULLETIN OF MARINE SCIENCE (1960) 19 432-445
- 43) GRIFFIN O.M. et VOTAW C.W. "The vortex street of the wake of a vibrating cylinder" éd. JOURNAL OF FLUID MECHANICS (1952) 55 31-48

- H -

- 44) HERTEL Heinrich "Structure, form and movment" éd. REINHOLD (1966)

Bibliographie

- L -

- 45) LEE T.D. "Symetries,asymetries and the world of particles" éd. UNIVERSITY OF WASHINGTON PRESS (1988)
- 46) LEOPOLD Luna et LANGBEIN W.B. "River meanders" éd. SCIENTIFIC AMERICAN (1966) 214 60-70
- 47) LEOPOLD Luna, WOLMAN M.G. et MILLER John P. "Fluvial processes" in GEOMORPHOLOGY éd. FREEMAN (1964)

- N -

- 48) NORMAN "Bavinger house 1950" éd. ARCHITECTURE AUJOURD'HUI (1983) 227 46
- 49) NURIDSANY Claude et PERENNOU Marie "La stratégie du bourgeois" éd. SCIENCES ET AVENIR (1989) 503 26-40

- P -

- 50) PORRO ricardo et ROBEIN Jean "Maison au janus" éd. ARCHITECTURE AUJOURD'HUI (1982) 224

- W -

- 51) WITKOWSKY Nicolas "Les miroirs de l'espace temps" éd. SCIENCES ET AVENIR (1989) 511 82-86

Bibliographie

LES ARBORESCENCES

- A -

52) d'ARCY THOMPSON "On growth and form" éd. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (2ème édition) (1942) 948-957

- C -

53) CASREX Jean "Frank Lloyd Wright : le printemps de la prairie house" éd. Pierre MARDAGA (1985)

- H -

54) HORTON Robert E. "Erosional development of strams and their drainage basins : hydrophical approach to quantitavy morphology" éd. BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA (1945) 56 275-370

- L -

55) LE LIONNAIS F. "Les grands courants de la pensée mathématiques" éd. CAHIERS DU SUD (1948)

56) LEOPOLD Luna B. et LANGBEIN W.B. "The concept of entropy in landscape evolution" éd. US GEOLOGICAL SURVEY, PROFESSIONAL PAPER (1962) 55A 1-20

- M -

57) MURRAY Cecil D. " The physiological principle of minimun work applied to the angle of branching of arteries" éd. JOURNAL OF GENERAL PHYSIOLOGY (1926) 9 835-841

58) MURRAY Cecil D. " A relationship between circumference and weight in trees and its bearing on branching angles" éd. JOURNAL OF GENERAL PHYSIOLOGY (1927) 10 725-739

- S -

59) STRAHLER A.N. "Hypsometric analysis of erosional topology" éd. BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA (1952) 63 1117-1142

Bibliographie

- W -

- 60) WOLDENBERG Michael "A structural taxonomy of spatial hierarchies" éd. BUTTER WORTHS SCIENTIFIC PUBLISHERS (1970) 22

- Z -

- 61) ZEVI Bruno "Le langage moderne de l'architecture" éd. BORDAS (1981)
- 62) ZIMMERMANN Martin M. "How sap moves in trees" éd. SCIENTIFIC AMERICAN (1963) 3

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

PARTIE 1 : RECHERCHE DOCUMENTAIRE

INTRODUCTION.....	page 11
I. DEFINITION DU SUJET	page 11
A. L'ORIGINE DE LA DEMANDE	page 11
B. L'ENONCE DU SUJET	page 12
II. METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE.....	page 13
INTRODUCTION	page 13
B. POINT DE DEPART	page 13
C. POLITIQUE DE RECHERCHE	page 14
1) Les orientations	
2) Les points d'accès	
3) Nature des recherches	
4) Liste des moyens	
CONCLUSION.....	page 18

PARTIE 2 : LA SYNTHESE

INTRODUCTION	page 21
I. L'ESPACE : SA NATURE ET SES STRUCTURES	page 21
A. LA NATURE DE L'ESPACE	page 21
B. L'EFFET D'ECHELLE	page 22
C. LES STRUCTURES DE L'ESPACE	page 23
II. LES POLYEDRES	page 25
A. GENERALITES	page 25
B. LES ICOSAEDRES	page 26
1) Définition	
2) Les dômes géodésiques	
3) La symétrie icosaédrique	
a) Centres et plans de symétrie	
b) Axes de symétrie	
c) Importance de cette symétrie	
4) Les virions comme exemples	
a) $T = X^2$	
b) $T > < X^2$	
III. LES SPIRALES	page 29
A. INTRODUCTION.....	page 29
B. LES SPIRALES.....	page 29
1) Quelques exemples dans la nature	
2) Pourquoi la spirale ?	
3) Les spirales architecturales	
C. LES MEANDRES.....	page 32
D. PARABOLES ET HYPERBOLES	page 33

IV. LES ARBORESCENCES	page 34
A. LES RAMIFICATIONS	page 34
1) Le tracé théorique	
2) La réalité	
B. LES ARBRES	page 37
CONCLUSION	page 39

PARTIE 3 : LA BIBLIOGRAPHIE

I. L'ESPACE : SA NATURE ET SES STRUCTURES	page 43
II. LES POLYEDRES	page 45
III. LES SPIRALES	page 47
IV. LES ARBORESCENCES	page 49



PARTIE 4 : TABLE DES MATIERES

