





# Introduction

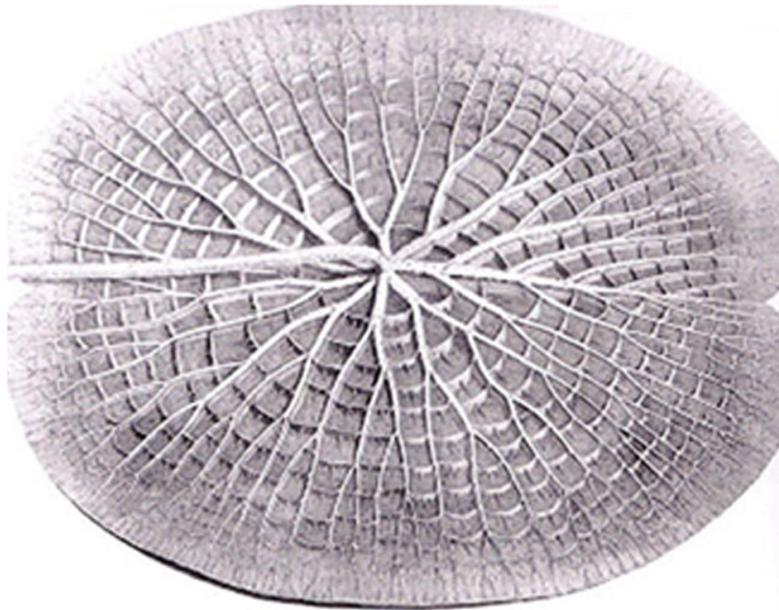
À travers les siècles et les styles, la recherche de la légèreté en architecture a toujours tendu vers des solutions à la fois techniques et esthétiques qui ont bouleversé la manière de construire. La notion de structure est d'abord liée à l'idée des lois de la nature permanentes et stables auxquelles il s'agit de se conformer. Le contenu de ces lois a considérablement varié de la Renaissance à nos jours en même temps que les techniques de constructions se modifiaient.

L'observation de la diversité des formes que l'on trouve dans la nature est une expérience extrêmement enrichissante qui a influencé nombre d'architectes et d'ingénieurs en quête de virtuosité structurale. La nature, du fait d'une sélection permanente des éléments les plus économiques en matière et en

ressources, offre en effet quantité d'exemples de structures ultra légères aux propriétés mécaniques saisissantes.

Si l'on considère par exemple une feuille de nénuphar géant –pouvant atteindre un diamètre de plus de deux mètres-, on remarque immédiatement deux particularités dans sa structure. La feuille présente d'une part un bord relevé, d'autre part un réseau radial de nervures reliées dont les compartiments sont recouverts par un limbe plissé comme de la tôle ondulée. Et comme celle-ci ou comme les éléments d'une toiture plissée autoportante, un tel système de nervures confère une étonnante rigidité à la grande surface de la feuille. Le bord relevé quant à lui empêche l'eau d'inonder la feuille tout en contribuant lui aussi à la rigidité de la surface. Le limbe lui-même ne se compose cependant que d'un tissu végétal très fin, de l'épaisseur d'un millimètre et qui n'est pas insensible à la traction. On pourrait croire que la plus petite vague risquerait de détruire une structure aussi étendue (environ  $4,5\text{m}^2$ ) et fine, pourtant celle-ci est extrêmement résistante et peut supporter le poids d'un jeune enfant ou d'un animal.

Au cours des années 1850-1851 fut construit le Crystal Palace pour l'exposition universelle à Londres, considéré aujourd'hui en histoire de l'art, comme l'une des plus importantes créations architecturales du XIXème siècle. Si l'on observe les nervures de la construction du toit, on trouve d'étranges similitudes avec « l'astuce » que la nature a utilisée pour la feuille de nénuphar géant. Il est fortement vraisemblable que son concepteur, Sir Joseph Paxton, horticulteur déjà connu pour la réalisation de plusieurs serres aux formes et aux dimensions



extravagantes, se soit inspiré des principes de construction de l'espèce Victoria regia, dont il avait fait une étude minutieuse pour en copier le système radial de nervures.

L'objet de ce mémoire sera ainsi d'explorer diverses structures naturelles remarquables pour leur légèreté et leur grande rigidité et de les mettre en perspective en architecture pour leur exemplarité structurale.

**Le Crystal Palace et le nénuphar géant Victoria regia utilisent tous les deux un système de nervures radiales**







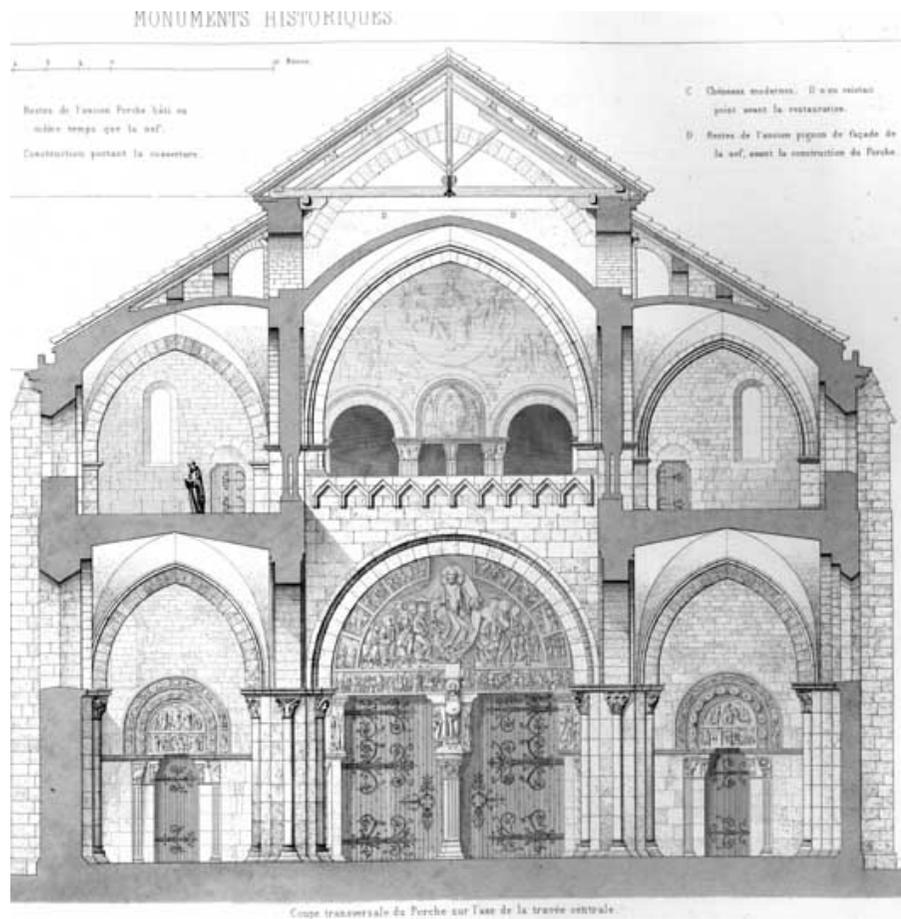
## Architecture et légèreté

Du XVI<sup>ème</sup> au XVIII<sup>ème</sup> siècle, les édifices, qu'ils soient de pierre ou de brique, sont le plus souvent construits de manière massive; leurs murs et leurs planchers sont surdimensionnés, si bien que leur poids propre l'emporte sur les autres types de charges qu'ils ont à supporter. Pour concevoir un ouvrage, les ingénieurs et architectes de l'époque raisonnent en termes de proportions entre les différentes parties dont ils se composent.

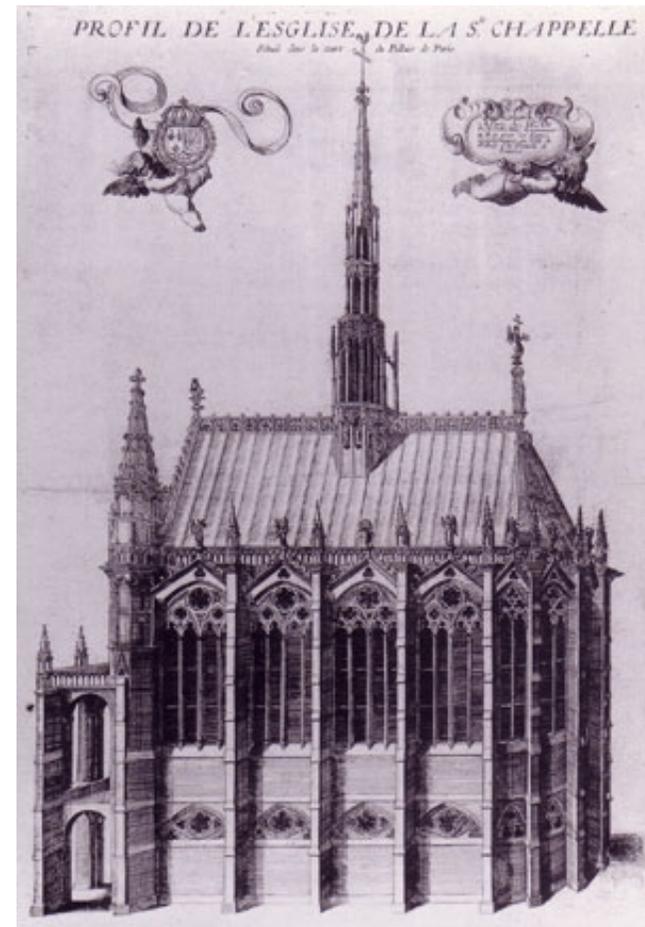
Au plein-cintre roman succède un mode de couverture beaucoup plus léger, permettant de donner une plus grande hauteur aux édifices et de percer plus largement les murs pour faire entrer la lumière. Marqué par des performances de plus en plus spectaculaires, le temps des cathédrales gothiques peut alors s'ouvrir. Cette logique de la performance a impliqué des solutions formelles plus audacieuses. Il en résulte de véritables dentelles minérales qui offrent une vision complexe et légère de l'aspect de

l'architecture religieuse. Dans les cathédrales des XII<sup>ème</sup> et XIII<sup>ème</sup> siècles, la construction se donne à voir au même titre que le décor sculpté dont s'ornent les façades.

Dans ce contexte, les règles de dimensionnement correspondent à une exigence de confort visuel et d'harmonie géométrique. Tandis que l'art roman aimait le symbolisme des nombres qui renvoyait directement au message biblique et ses interprétations, les bâtisseurs gothiques rêvèrent avant tout à la géométrie. Mais leur géométrie, différente en cela de celle de Vitruve qui reposait avant tout sur des rapports dimensionnels entre le tout et les parties, possède un côté beaucoup plus appliqué. C'est une géométrie de la règle et du compas qui enseigne comment coordonner le plan et l'élévation de l'édifice, mais aussi comment définir les gabarits des pierres qui doivent permettre sa réalisation. Les enjeux ainsi définis imposent alors la recherche d'un équilibre entre les systèmes de représentations,



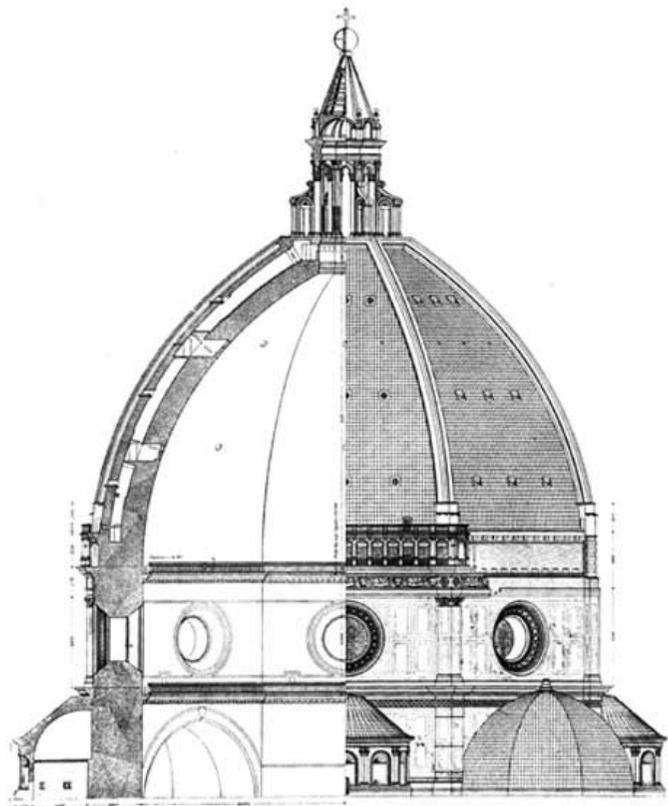
Eglise romane de Vézelay en Bourgogne. Massivité et rapports de proportions



La Sainte Chapelle à Paris, une dentelle minérale

les modèles mathématiques, le plan, l'élévation et la construction. Cette évolution conceptuelle et formelle importante aura une incidence majeure sur les techniques de construction, on voit alors ainsi l'apparition du gabarit et des premiers procédés de standardisations. C'est à la Renaissance, et plus particulièrement au Quattrocento en Italie, qu'une transformation profonde de la représentation du monde va faire émerger une pensée mécaniste illustrée en particulier alors par le développement de la Camera Obscura. Celle-ci va avoir une influence directe sur la peinture avec la perspective et sur l'architecture avec le projet « manifeste » de Brunelleschi pour le Duomo à Florence. Pour cette réalisation, l'architecte résout les contraintes de charges de la coupole (jusqu'alors non solutionnées) par la mise en place d'un dispositif constructif léger conçu comme une structure « sandwich » dont la partie extérieure n'avait plus qu'à recevoir les éléments de couverture : les tuiles. Il s'agit d'un nouveau mode de pensée centré sur l'Homme, où les modèles mathématiques, les sciences, les techniques, la philosophie développent de nouvelles

représentations et de mesures du monde qui échapperont progressivement à la seule autorité religieuse. Cette révolution imposera implicitement ou explicitement le développement de solutions techniques où la recherche de légèreté sera omniprésente. À la charnière des XVIIIème et XIXème siècles, cette conception mécaniste va évoluer profondément vers une transformation des connaissances techniques mais aussi de la « juste proportion » des ouvrages qui vont influencer sur la perception des ouvrages d'art et des bâtiments. Au cours du XVIIIème siècle, l'usage du calcul infinitésimal se répand dans les milieux scientifiques en ébranlant du même coup la toute puissance de la géométrie. L'analyse va progressivement devenir l'instrument par excellence du calcul des structures. L'une de ses premières applications est due à l'ingénieur polytechnicien Charles Augustin Coulomb qui révolutionne le calcul des voûtes et élabore une théorie sur la résistance des matériaux dans un essai soumis en 1773 à l'Académie des Sciences. Bien que des théories comme celle de Coulomb rencontrent peu d'écho parmi les praticiens, ces



Duomo realise par Brunelleschi à Florence

derniers pressentent confusément qu'une page de l'histoire de la conception des structures est sur le point d'être tournée. Les concepts de force de l'effort, les modalités d'équilibre et de transmission de ces forces et de ces efforts, vont se substituer aux considérations géométriques traditionnelles. Tout le problème va consister à canaliser les efforts auxquels se trouvent soumises les constructions, des efforts qui ne sont plus seulement liés à leur propre masse, mais aussi aux contraintes d'usage, au vent et à bien d'autres paramètres physiques. Ces recherches vont avoir une influence déterminante sur les formes et les principes structurels. Les structures porteuses vont être allégées et la notion d'économie de matière va être introduite dans la conception des projets. Dès la première moitié du XIXème siècle, les ingénieurs développent de nouvelles formules sur la résistance des matériaux. Née dans les années 1820-1830 des efforts conjugués de savants et d'ingénieurs comme Navier, Cauchy, Poisson ou Lamé, la théorie de l'élasticité permet de dimensionner les structures sans véritable dialogue avec la conception

architecturale. La construction constitue simplement l'un des terrains d'application de la résistance des matériaux et de la théorie mathématique de l'élasticité sur laquelle elle repose en grande partie. L'équilibre des formes classiques se trouve alors confronté aux contraintes de la performance technique. L'architecture s'inscrit donc dans une nouvelle complexité. La massivité des appareillages fait place à une recherche d'équilibre et de stabilité. Ces recherches illustrent les prémices des bouleversements qui vont s'opérer avec la Révolution Industrielle dans la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle avec le développement de mode de production standardisé, mécanisé et rationalisé, en particulier dans le domaine de l'acier et du verre. Le Crystal Palace réalisé par Joseph Paxton en 1851 à l'occasion de la première Exposition Universelle à Londres est emblématique de cette révolution. Le projet de Paxton répond par ces proportions, ses charpentes métalliques, ses murs de verre et son temps de réalisation a un savoir faire industriel et non plus artisanal. Les structures légères viennent ici répondre aux contraintes de temps



Galerie des machines de l'exposition universelle de Paris en 1889

et elles symbolisent l'émergence de nouvelles typologies architecturales. Le Crystal Palace est la première « cathédrale » de verre tout en présentant une autre innovation qui marquera profondément l'architecture moderne : le mur rideau. Devant le succès rencontré par cette exposition, les pays industrialisés vont organiser régulièrement des expositions internationales qui seront le prétexte à présenter les innovations dans le domaine architectural, mais aussi dans l'ingénierie, le mobilier, etc. L'influence du Crystal Palace et sa légèreté structurelle va être majeure dans le champ de l'architecture telle que la Galerie des machines de l'exposition universelle de Paris en 1889 conçue par l'architecte Ferdinand Dutert et l'ingénieur Victor Contamin, elle établit un record avec ses 420 mètres de longueur, ses 115 mètres de largeur pour un peu plus de 43 mètres de haut. Mais l'empreinte du Crystal Palace se retrouve aussi dans la réalisation de grands ouvrages d'art, en particulier dans la réalisation du chemin de fer et la nécessité de réaliser des ponts, des viaducs où les structures en treillis métalliques vont permettre la création de

franchissement de grandes portées. Le pont sur le Forth près d'Edimbourg en Ecosse construit entre 1882 et 1890 par Sir William Arrol, Sir Benjamin Baker et Sir John Fowler représentent une avancée technique importante avec sa structure à poutres cantilever. À la même époque (1869-1883), la construction du pont de Brooklyn à New York inaugure une autre solution technique pour franchir des grandes portées (ici, une portée principale de 487 mètres) grâce à un système de pont suspendu avec des haubans.

Ces architectures, fruit d'une collaboration entre architectes et ingénieurs, sont caractérisées par leurs légèretés, leurs mobilités, mais aussi le caractère temporaire qu'elles revêtent parfois au moyen de leurs démontabilités. Ce dernier aspect est essentiel car il amorce une nouvelle perception de l'architecture liée à sa légèreté, celle de l'impermanence opposée à la permanence patrimoniale classique. Les expérimentations vont se poursuivre avec les différents mouvements d'avant garde qui vont marquer le début du XXème siècle avec les



Pont sur le Forth construit à la fin du XIXème siècle en Ecosse

Constructivistes Russes (monument de la IIème Internationale et le « Letatlin » de Vladimir Tatlin, les villes volantes de Krutikov, etc.), mais aussi au travers des écrits de Antonio Sant'Elia et Filippo Marinetti qui constatent de façon prémonitoire en 1914 dans le manifeste suivant : « Nous avons enrichi notre sensibilité par un goût du léger, du pratique, de l'éphémère et du rapide. Nous sentons que nous ne sommes plus les hommes des cathédrales, des palais, des salles de réunions ; nous sommes les hommes des grands hôtels, des gares, des routes immenses, des ports gigantesques, des marchés couverts, des galeries brillamment éclairées, des autoroutes, des chantiers de démolition et de reconstruction. » Mais c'est surtout avec la création du Bauhaus que l'ensemble des recherches se trouve synthétisé dans des applications pratiques. L'industrie et la création se rencontrent alors et favorisent le développement de nouvelles typologies dans l'architecture et le mobilier. La standardisation et la rationalisation de la production vont permettre le développement de nouveaux principes de construction tel que

le poteau-poutre qui offrent à l'architecture les moyens de se débarrasser des motifs historicisants.

L'ensemble des principes articulés par les acteurs du mouvement moderne tel que la pureté géométrique, la clarté et la lumière, l'optimisation de l'espace vont influencer de façon déterminante les formes et les structures. L'école du Bauhaus cesse son activité en 1933 peu de temps après l'arrivée au pouvoir des Nazis qui jugent l'esprit de la formation comme « anti-germanique » et « dégénérée ». La plupart des acteurs du Bauhaus s'expatrient aux Etats-Unis ainsi qu'en Israël. Les réalisations de Mies Van Der Rohe comme la «Farnsworth House » et de Philip Johnson avec la « Glass House » restent emblématiques de cette époque. La transparence, le champ laissé libre par le décroisement des pièces de la maison et la rigueur de l'architecture traduisent une volonté de changement des modes de vie. Ici, la légèreté est présente en termes d'espace, de transparence et de rigueur de la proportion.

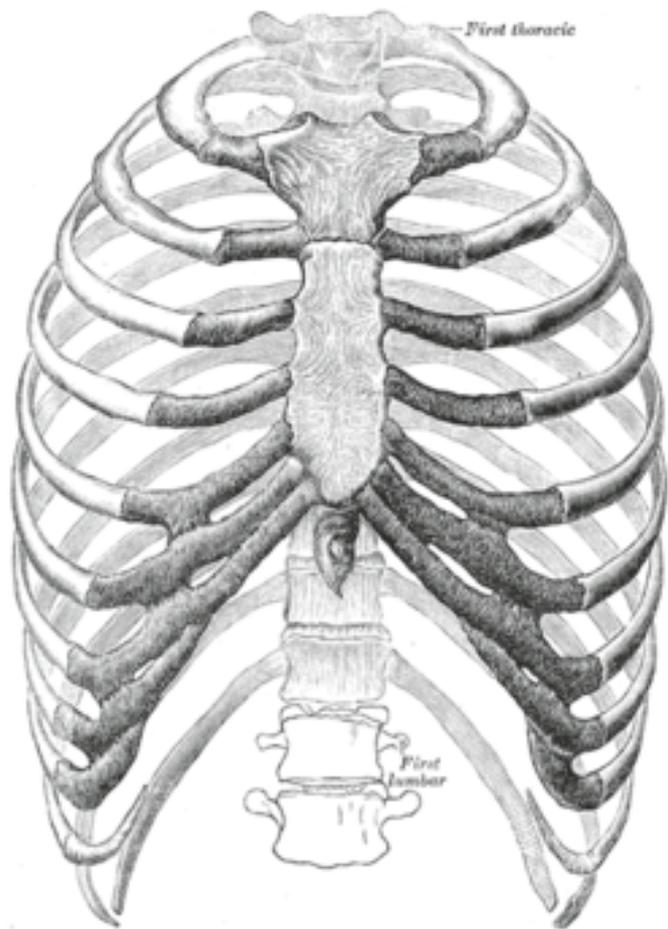




# Monde organique et univers de la machine : deux sources d'inspiration nouvelles en conception des structures

Avec le XXème siècle se développe une nouvelle vision de la conception structurale. Pour un ingénieur ou un architecte contemporain, concevoir une structure c'est imaginer un système de transmission des efforts ; c'est déterminer les conditions d'équilibre de ce système et en exprimer visuellement les caractéristiques. Deux types de références peuvent le guider dans cette tâche: le monde organique d'un côté, l'univers de la machine de l'autre.

De nombreux concepteurs de structures s'inspirent du monde organique. Cette inspiration peut prendre des formes très différentes. Elle est surtout plastique chez Santiago Calatrava dont les ossatures généreuses font penser à des squelettes monumentaux. Elle est plus raisonnée chez Frei Otto, pour qui le vivant constitue une référence permanente, même s'il prend le soin de se démarquer des partisans d'une imitation trop littérale de la nature. **« L'idée largement répandue que tous les objets de la nature vivante sont optimaux est une demi-vérité qui a fait beaucoup de mal. La tendance à considérer la nature comme une invention technique dont on attend seulement des réponses toutes prêtes a conduit à une impasse. »** (F. Otto, « Architecture et bionique Constructions naturelles », traduction française Denges, Ed. Delta & Spes, 1985, p.8), écrit-il dans son livre. Cela ne l'empêche pas de multiplier les parallèles entre l'architecture complexe des corps organiques et les créations de l'homme. Mais ce qui lui semble le plus admirable, c'est l'économie rigoureuse du matériau et de l'énergie nécessaire au processus de construction qui donne naissance à cette architecture du vivant. Par l'intermédiaire de la

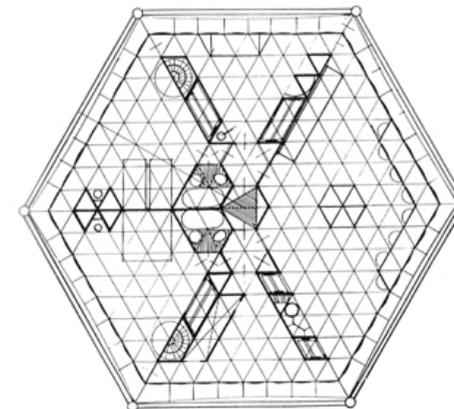
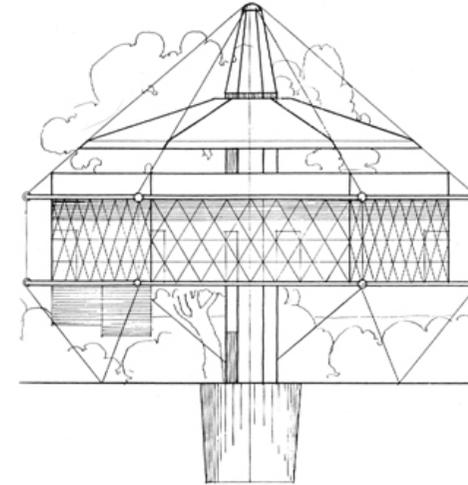
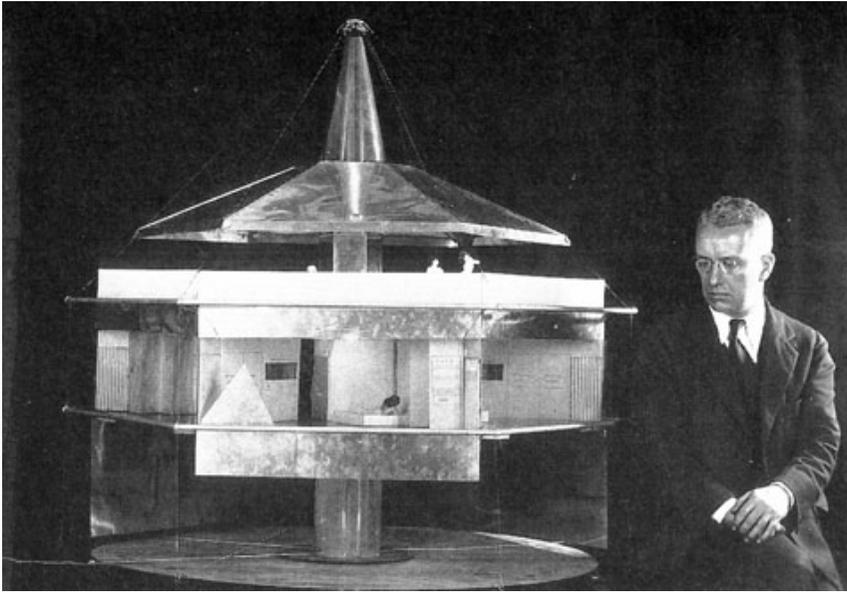


Projet de Calatrava d'une station de métro pour le World Trade Center à New York. On observe l'influence manifeste de la structure d'une cage thoracique dans la composition du bâtiment, apparentant celui-ci à une gigantesque sculpture naturaliste.

référence naturelle s'introduit une idée constitutive de la pensée structurelle moderne : celle du lien nécessaire entre forme et technique de construction. L'économie de matière de l'objet achevé doit s'enraciner dans une économie des moyens qui servent à la réaliser.

L'univers de la machine constitue une autre source d'inspiration pour les concepteurs de structures. Comme le regard porté sur le vivant, la référence de l'univers de la machine peut fonctionner de bien des manières ; elle peut être simplement plastique comme chez de nombreux partisans actuels du « high-tech » ou participer d'une vision beaucoup plus large comme pour Buckminster Fuller ou Jean Prouvé. Chez Buckminster Fuller par exemple, les maisons rationnelles ou les dômes géodésiques ne sont pas que des applications particulières du pouvoir du créateur acquis par l'homme à l'ère industrielle. Dans un ordre d'idées assez voisin, Prouvé écrit : « **Un bâtiment est un objet à construire comme un autre ; il est seulement plus grand (...)** Pourquoi alors ne

**pas le considérer comme un article totalement élaboré, fabriqué et mis en vente par d'importantes industries qui sont à créer ? ».** (Jean Prouvé, *Une architecture par l'industrie*, édité par B. Hubert et J.-C. Steinegger, Zurich, Ed. d'Architecture Artemis, 1971, p.24) Derrière la question des rapports entre bâtiment et industrie se profile toujours la même interrogation sur les liens entre l'objet achevé et le processus qui lui donne naissance. La structure doit dans la mesure du possible exprimer ce processus au lieu de venir simplement le clore. En cela, l'architecture de Prouvé et de Fuller tout comme l'architecture « high-tech » révèlent d'un certain expressionnisme des structures, celles-ci deviennent emblématique du projet.



Merveilleuse combinaison d'un bateau à voile et d'une maison perchée dans les arbres, la « Dymaxion House » de Bukminster Fuller (1927), une structure métallique hexagonale, résume toute l'esthétique de la légèreté prônée par Fuller : elle est fonctionnelle, radicalement simple et ses éléments constitutifs sont standardisés et économiques afin d'être produits en série en usine. La maison peut être supportée par un mât central, comme si elle flottait dans les airs, libérant ainsi l'espace sous-jacent pour garer les véhicules.

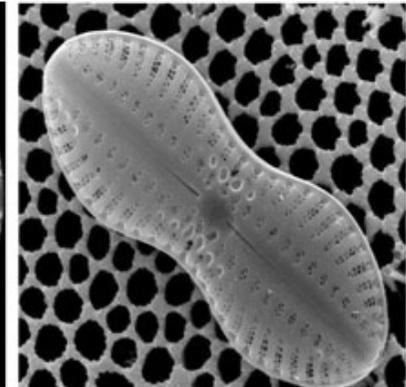
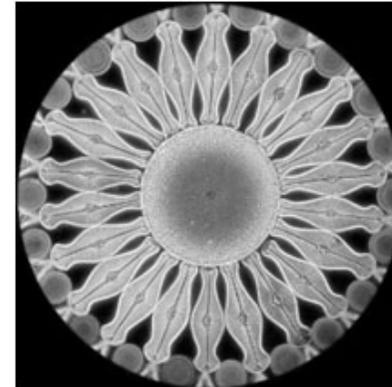
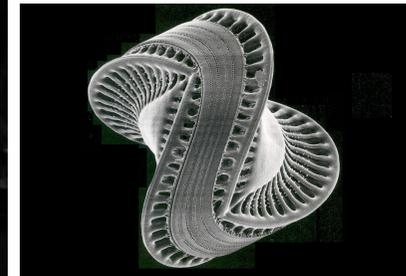


# Les raffinements structuraux du monde de l'infiniment petit : diatomées et radiolaires

Depuis son invention au début du XX<sup>ème</sup> siècle, le microscope électronique a permis l'exploration de structures jusqu'alors insoupçonnées du monde de l'infiniment petit. C'est grâce à cette sonde électromagnétique que certains micro-organismes ont pu révéler les raffinements de leur coque, construction de silice remarquable et très instructive pour l'œil de l'architecte friand de prouesses structurales. La structure de la coque des diatomées et des radiolaires constitue en effet un exemple frappant de finesse et de complexité biostatique dont l'étude permet d'ouvrir un champ de possibles pléthorique en architecture.



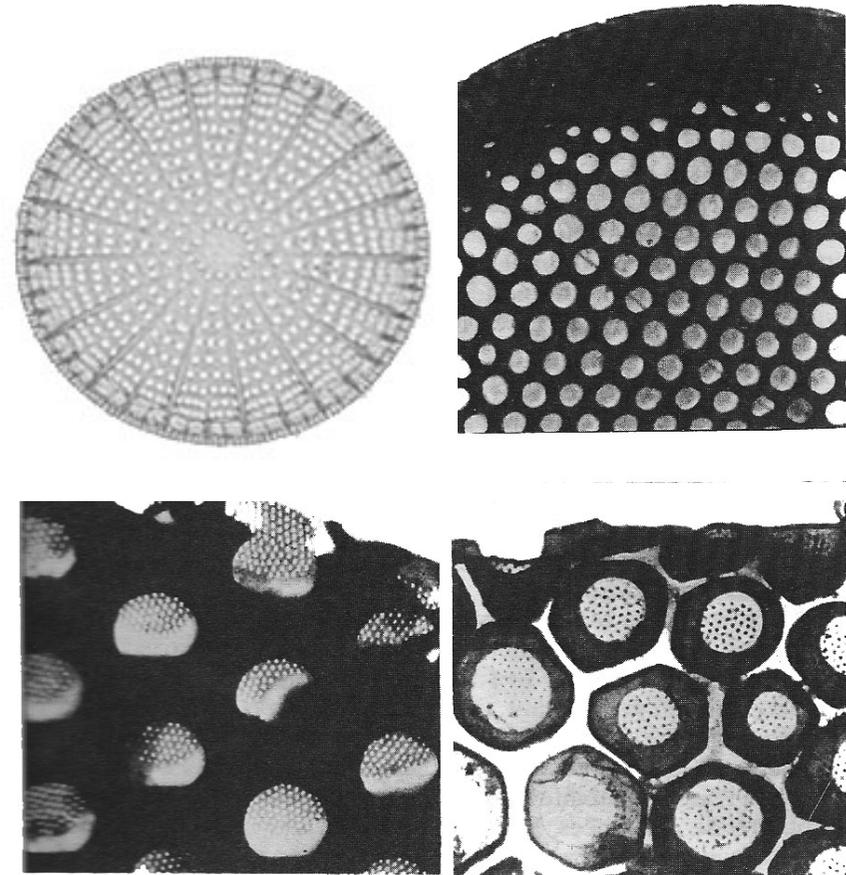
Diatomées au microscope  
électronique



Afin de se plonger dans cet univers fascinant de l'infiniment petit, il faut tout d'abord tenter de percer le mystère de la forme de la coque d'une diatomée. Cette forme est en rapport immédiat avec son mode de formation spécifique qui a fait l'objet de nombreuses recherches par les biologistes dans les années cinquante, notamment grâce au recours à des prises vidéo accélérées.

Considérons, grâce à un microscope électronique, une coque de diatomée de l'espèce *Thalassiosira*. Il s'agit d'une diatomée marine de forme circulaire à l'architecture filigrane la plus délicate. Comme nous pouvons le voir sur l'illustration ci-contre (dont le grossissement est de 3 500), la coque de cette diatomée est ronde et traversée de nervures et de côtes. De toute évidence, la paroi se compose d'éléments alvéolaires.

Si l'on observe celle-ci d'un peu plus près avec un grossissement d'objectif supérieur (de 10000 fois), on réalise que les côtes contiguës forment une sorte de structure hexagonale qui

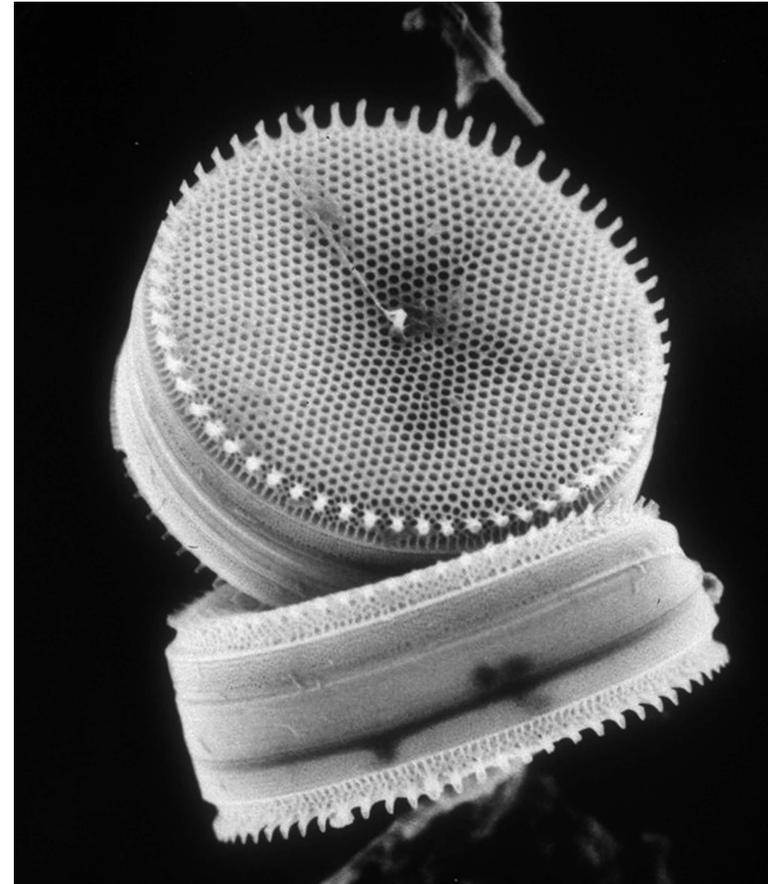


En haut à gauche: Diatomée centrale -*Thalassiosira nordenskiöldii* (grossie 3 500 fois). Autres photographies: détails au microscope électronique à différents grossissements de la paroi siliceuse alvéolaire.

semble comprendre des cavités centrales, comme dans un rayon d'abeilles. Ces cavités, apparemment, ne sont pas fermées de tous côtés puisque l'on voit apparaître en arrière-plan une structure très finement pointillée.

Ces détails peuvent être à leur tour observés en portant le grossissement à 25000. On voit alors que chaque cavité centrale est fermée, à son extrémité, par une plaque criblée, constituée par une fine membrane percée de trous minuscules.

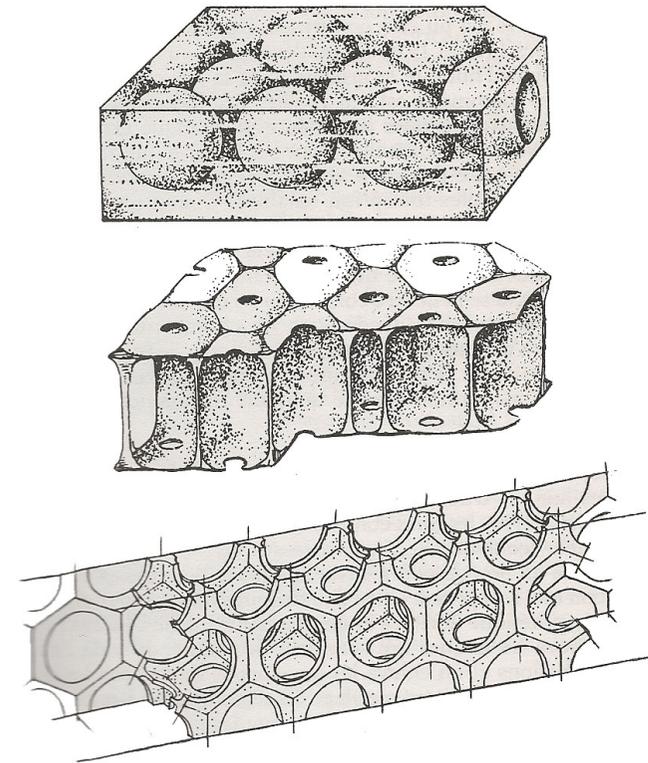
On pourrait penser que cette structure alvéolaire a été naturellement sélectionnée pour son incroyable stabilité permettant d'assurer la fonction protectrice de la coque et également pour sa capacité à permettre les processus de pénétration nécessaires au métabolisme au travers des parois extrêmement fines des petits trous tapissant chaque cavité.



Diatomée centrale – *Thalassiosira ritscheri*

Concernant la formation de cette paroi alvéolée, l'allemand Helmcke avança une explication chimique et mécanique : les précurseurs de l'acide silicique nécessaires à la nouvelle

formation prendraient corps dans les gouttes du cytoplasme de la cellule elle-même. Le cytoplasme constituerait alors un système colloïdal comprenant une phase aqueuse et une phase lipidique. Il se formerait ainsi une sorte de suspension, des gouttelettes lipidiques nageant dans une émulsion de base aqueuse. Helmcke propose alors un modèle mécanique selon lequel de petites gouttelettes lipidiques, assemblées en une sorte de radeau à la surface de la nouvelle cellule de la diatomée, s'aplatiraient mutuellement. Dans les interstices serait injecté l'acide silicique qui, après durcissement, formerait une charpente légère mais très résistante. De la même façon, mais à des échelles plus petites, pourrait avoir lieu, selon lui, la formation des plaques criblées et des pores. Toutes ces formes seraient en quelque sorte un moulage des interstices entre les gouttelettes lipidiques assemblées en des sortes de radeaux.



*L'architecture des diatomées et les structures techniques minimales*  
Modèle hypothétique du mécanisme de formation de la paroi cellulaire en silice autour de gouttelettes lipidiques. L'hypothèse de Helmcke ne s'est pas confirmée mais a été une source d'inspiration pour la réalisation de structures minimales préfabriquées en béton.



# L'architecture des diatomées et les structures techniques minimales

En réalité, ce modèle de formation de la coque de la diatomée s'est révélé par la suite invalidé par de nouvelles recherches. Le processus serait beaucoup plus complexe que ce qu'envisageait Helmcke. Mais si d'un point de vue de biologiste cette explication s'est avérée fautive, elle a néanmoins permis de faire considérablement avancer l'élaboration de structures architecturales légères tout à fait valables. Quand on invalide une hypothèse scientifique jugée obsolète, on oublie néanmoins qu'en tant que tentative de compréhension d'un phénomène physique,

sa transposition dans un domaine technique peut se révéler très enrichissante.

C'est ainsi que, supposant que la nature créait des coques de diatomées en « injectant » des liaisons d'acide silicique dans les cavités qui séparent les gouttelettes serrées les unes contre les autres, Helmcke croyait possible de copier techniquement ce procédé de formation en prenant par exemple, au lieu de gouttelettes lipidiques, des vessies de ballons de football que 'on pressa entre deux coques pour couler ensuite la résine synthétique dans les interstices ainsi formés. La résine durcie, on enleva les coques qui servaient de moule, on vida l'air des vessies de ballons et on enleva les enveloppes molles par les ouvertures obtenues. Il restait ainsi un moulage en négatif fidèle. Les structures obtenues rappellent de manière étonnante les coques de diatomées fortement grossies observées au microscope électronique. En somme cette hypothèse erronée de la formation

des diatomées à une échelle microscopique a été une source d'inspiration très riche pour la réalisation de structures minimales architecturales préfabriquées en béton notamment.

De telles structures artificielles de coques, composées d'un réseau alvéolé, préformées, moulées, ont des propriétés statiques étonnantes : ce sont des constructions minimales. Avec un matériau réduit au minimum, elles peuvent supporter des charges très fortes. On comprend alors que les architectes et les ingénieurs structure, face à de tels matériaux, voient s'ouvrir des possibilités nouvelles.

De ce fait, des procédés de ce genre ont été utilisés avec succès pour la construction de structures spatiales de grande surface, alliant ainsi les avantages d'un bas prix à ceux d'une haute stabilité. Et, comme cela arrive souvent dans l'histoire des analogies entre la biologie et la technique, de telles structures mises au point par des ingénieurs ont également été développées

indépendamment de l'exemple de la nature. Ce qui illustre par ailleurs le fait qu'en suivant sa propre voie, l'esprit créateur de l'homme s'appuyant sur les sciences et les mathématiques redécouvre souvent des structures que la nature avait sélectionnées pour leur perfection et leur grande adaptation au milieu environnant.

***“Nous croyons que l'évolution architecturale ne pourra se faire qu'en se libérant de considérations esthétiques révolues, en retrouvant avec humilité le respect des lois de la raison. Au lieu d'une attitude purement analytique, une vision synthétique des structures est la prochaine étape à franchir et il est hors de doute que l'étude des formes naturelles gouvernées aussi par le nombre nous aidera à franchir un grand pas.”***

***Le Ricolais.***

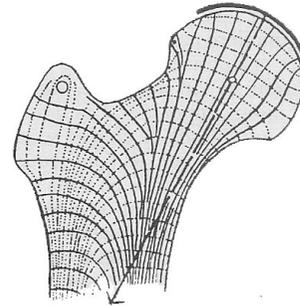


# **Le tissu osseux, une structure résistante et légère ayant inspiré les concepteurs de la Tour Eiffel**

Quoiqu'il en soit, ces analogies ont donné à réfléchir à ceux qui étaient capables de créer, mais aussi de regarder au-delà des limites de leur propre discipline. C'est par exemple l'étude du tissu osseux qui a permis à la tour Eiffel de voir le jour lors de l'Exposition Universelle de Paris en 1889. Si cet entrelacs de ferraille (les procédés de fabrication de l'acier étant encore peu développés à l'époque) s'impose par sa logique harmonique, c'est que ce monument de 300 mètres de haut fut pensé à partir d'un

simple os. Un détail du squelette qu'il a suffi d'observer avec un peu plus d'attention pour en révéler le prodigieux potentiel. L'os possède à la fois légèreté et rigidité, enveloppées d'un savant mélange de fonctionnel. Karl Culmann, professeur de statique à la faculté de Zurich, ne doute pas de l'intérêt offert par cette charpente légère et particulièrement efficace qu'est le squelette humain composé de rotules, d'os et de cartilages liés entre eux par des attaches et des tissus plus souples dans une organisation extrêmement savante. Dès la fin du XIXème siècle, ce professeur de structures pense déjà que ses élèves devraient également s'initier à la médecine pour comprendre l'importance de l'anatomie des os. Parmi ceux-ci, l'alsacien Maurice Koechlin finit par être engagé dans l'entreprise de Gustave Eiffel. Très vite ses compétences vont être mises à profit et le conduire à participer au grand projet de l'Exposition Universelle. Peu de monde se souvient cependant aujourd'hui que la fameuse tour n'aurait pas dominé Paris sans l'indispensable regard qu'il convenait de porter sur l'architecture d'un os humain. Mais le principe qui structure

notre fémur a inspiré d'autres bâtisseurs. Le célèbre architecte italien Pier Luigi Nervi, très intéressé par une conception bionique de l'architecture, a déposé un brevet portant sur un tracé organique de poutres de plafond en béton. Ses conceptions ont fait leurs preuves dans nombres de ses réalisations comme le hangar d'aviation d'Orvieto. Ce dernier est construit selon le modèle du fémur humain qui permet de supporter des charges importantes tout en économisant le matériau.



**Ci-dessous : Hangar d'aviation d'Orvieto par Pier Luigi Nervi, construit selon la trame des lignes de compression (en traits pleins sur la coupe du fémur ci-contre e) et de traction (en traits pointillés) du tissu osseux.**



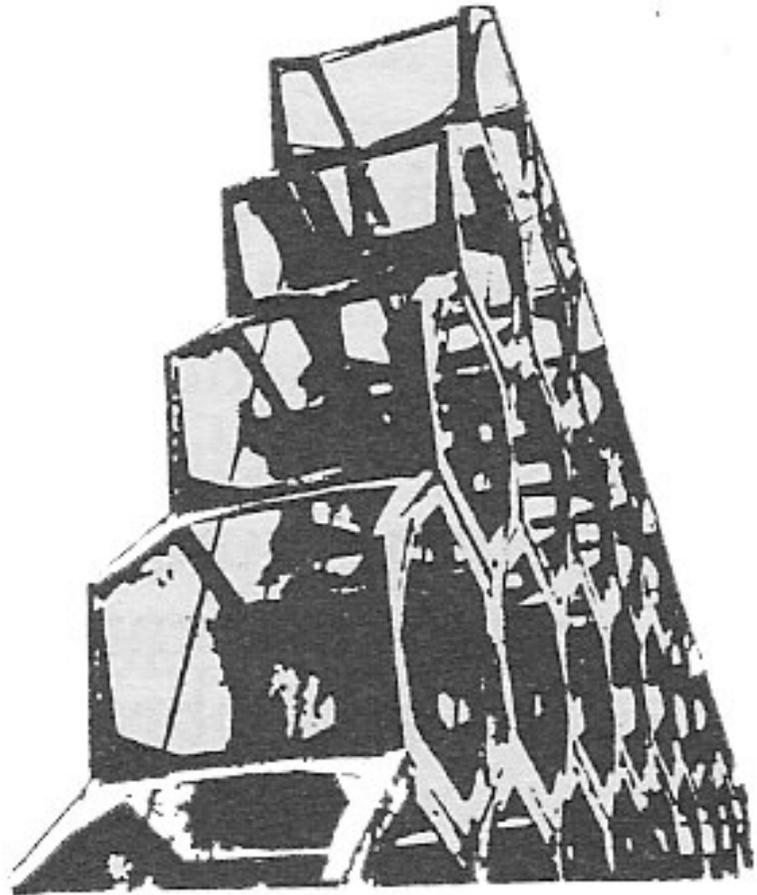


## Structures alvéolées et surfaces de grande portée

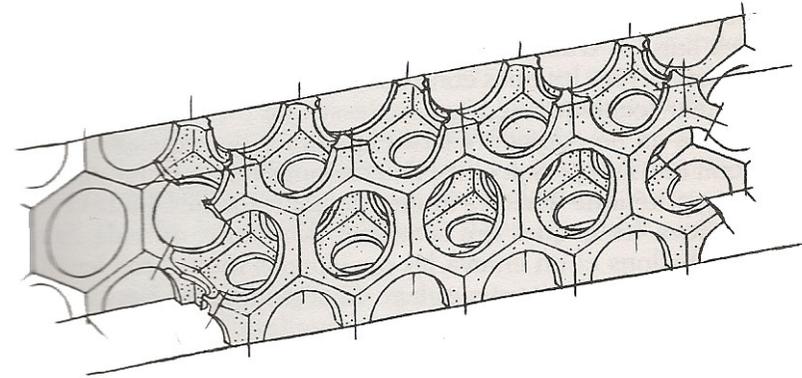
Revenons maintenant à l'exemple précédent de l'étude des diatomées. Le biologiste Helmcke fut subjugué quand il vit sur la scène de plein-air du stade Olympique de Berlin en 1961 une toile de cinéma de 28 mètres de long et de 15 mètres de large fixée sur une structure ressemblant de façon frappante à une coque de diatomée géante. Maintenir bien tendue une telle surface souple sans que les efforts du vent ne la fassent claquer est chose impossible par simple tension sur un cadre (même si celui-ci pouvait être renforcé par des câbles et des supports). De surcroît, l'érection d'un mur-écran rigide devait répondre à une exigence supplémentaire, à savoir être mis en place rapidement pour les représentations cinématographiques mais escamoté tout aussi rapidement pour les représentations théâtrales. C'est pour cette raison que le duo constitué par l'ingénieur Manleitner et

l'architecte Mühlau se décida pour une solution absolument révolutionnaire d'un point de vue technique. Une structure spatiale à cellules hexagonales similaires à des alvéoles d'abeilles a été conçue. Chacune des cellules hexagonales fut fabriquée en résine polyester renforcée par des fibres de verre avec une plaque hexagonale antérieure pour projections d'images et d'un cadre arrière correspondant. Ces deux parties d'un élément n'étaient par ailleurs maintenues à distance que par quatre profils. Ceci permit la réalisation, d'un système très léger, relativement bon marché et surtout extrêmement stable la surface efficace exposée aux pressions exercées par le vent étant minimisée avec une structure néanmoins parfaitement rigide. Il suffisait de fixer ce support au sol avec des câbles pour qu'il résiste au vent. L'analogie entre la structure technique mise au point par l'ingénieur Manleitner et une structure biologique comme la paroi alvéolaire d'une diatomée est véritablement saisissante. Ceci est particulièrement visible sur les dessins de reconstitution qui fit

Helmcke d'après les mesures photogrammétriques exactes des

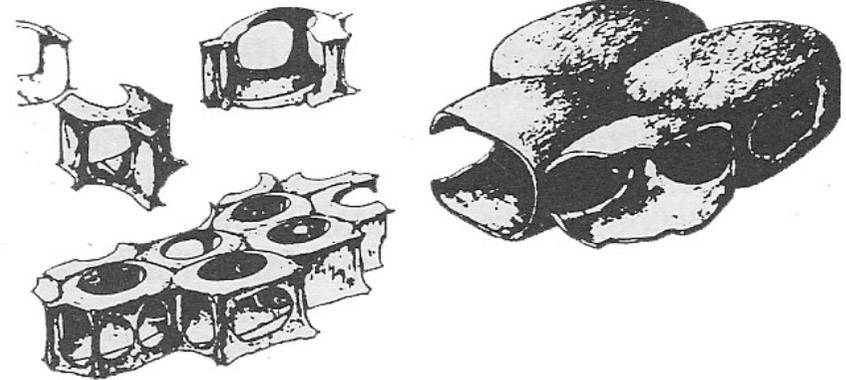


photographies stéréoscopiques



Cette structure légère minimale conçue par les architectes et ingénieurs Mühlau et Manleitner est inspirée de la diatomée *Pleurosigma* dont un détail de la coque est représenté à droite. Elle a permis de constituer un écran de cinéma monumental de plein air à Berlin par assemblage d'éléments prismatiques hexagonaux afin de former une surface verticale de 500 m<sup>2</sup>.

prises au microscope électronique à balayage. L'illustration ci-contre représente une petite partie contigüe de la paroi cellulaire siliceuse de la diatomée *Pleurosigma*. Ces alvéoles ont été recouvertes, suivant un procédé de moulage particulier, d'une mince pellicule de carbone. Après que la matière siliceuse de la coque fut dissoute chimiquement, il ne restait plus que le revêtement ou, pour être plus précis, que la couche limite de la structure silicatée. De la même façon, on a pu obtenir des structures semblables avec les vessies de ballons de football pressées entre deux coques et dont les interstices ont été remplis de béton léger, de plâtre ou de plastique. Helmcke a fait fabriquer de telles coques pour les étudier d'un point de vue statique. Comme on pourrait s'y attendre elles ne sont pas particulièrement adaptées pour résister à des charges ponctuelles mais sont en revanche extraordinairement aptes à soutenir des charges réparties sur de grandes surfaces produites par exemple par le vent dans le cas de l'écran ou bien une couche de neige sur la couverture d'un toit.



À gauche: dessin de reconstitution d'un détail des alvéoles de la coque siliceuse de la diatomée *Pleurosigma*. A droite : moulage en négatif réalisé au moyen d'une fine couche de carbone faisant apparaître distinctement la structure alvéolaire de la coque *Pleurosigma*.

Très intéressé par les recherches de Helmcke, l'architecte Frei Otto, spécialiste des structures légères, a ainsi développé et réalisé des structures porteuses tout à fait conséquentes sur le modèle de construction minimale des coques de diatomées. Plus encore que les réalisations architecturales, c'est un nouveau regard du technicien sur les structures naturelles grâce au dialogue entre le biologiste et l'architecte qui s'est montré fructueux pour la recherche biologique. Frei Otto et Helmcke ont en effet été amenés conjointement à se poser les questions suivantes : quels sont les principes biostatiques régissant la formation des structures siliceuses comme les éponges, les radiolaires, les diatomées ? Est-ce que ces structures ont réellement un mode de formation analogue au modèle technique proposé, relativement plausible ? S'agit-il d'autres mécanismes ? Si toutes ces questions n'ont pour la plupart toujours pas trouvé de réponse, elles ont néanmoins permis de faire avancer considérablement la recherche tant en architecture qu'en biologie.



## Coques nervurées, transparence et légèreté

Ingénieurs et architectes n'ont pas fini d'apprendre à l'école de la nature. L'analogie évidente des coques de diatomées et des coques techniques conçues par les ingénieurs renforcées par des nervures suggère que de la comparaison de structures naturelles et de structures techniques puissent naître des connaissances utiles pour les deux domaines, architecture et biologie.

Grâce aux nervures, on peut soutenir de grandes surfaces et les rendre statiquement résistantes, ce qui permet de les percer en vue de les alléger davantage ou bien de faire pénétrer la lumière dans l'espace intérieur. L'exemple de la coque de la

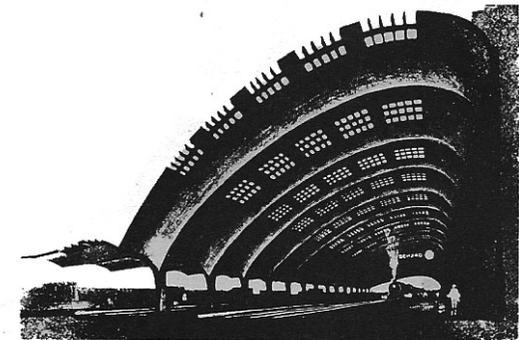
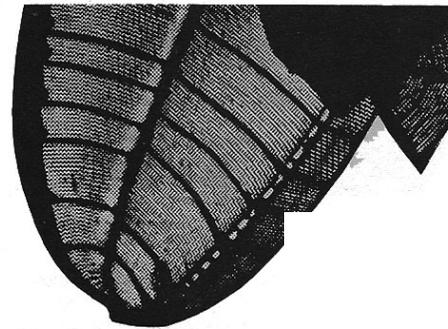
diatomée *Surirella* ou encore tout simplement de la structure d'une feuille d'arbre montrent comment des formes biologiques répondent à cette exigence. Les nervures et côtes enferment des champs d'aréoles qui, à leur tour, sont traversés par un système de très fines nervures. La toiture ci-contre réalisée pour couvrir une gare de chemin de fer réalisée par l'ingénieur E. Torroja avec sa structure régulièrement nervurée et ses percées de lumière alvéolaires rappelle ainsi étrangement la coque de *Surirella*. Ce projet est tiré de l'ouvrage Logique de la Forme de Torroja, dans lequel il décrit de multiples constructions, en béton armé, de coupoles ou de structures à nervures. Et on ne peut que admirer la « logique de forme » des charpentes siliceuses des diatomées qui remplissent leur fonction d'enveloppe protectrice avec un minimum de matériau. Les principes des réalisations techniques en béton armé s'en rapproche beaucoup dans la mesure où celles-ci sont là aussi conçues pour une utilisation de matériau minimisée, à la fois pour une question de coût mais aussi pour alléger la structure afin d'augmenter les portées envisageables.

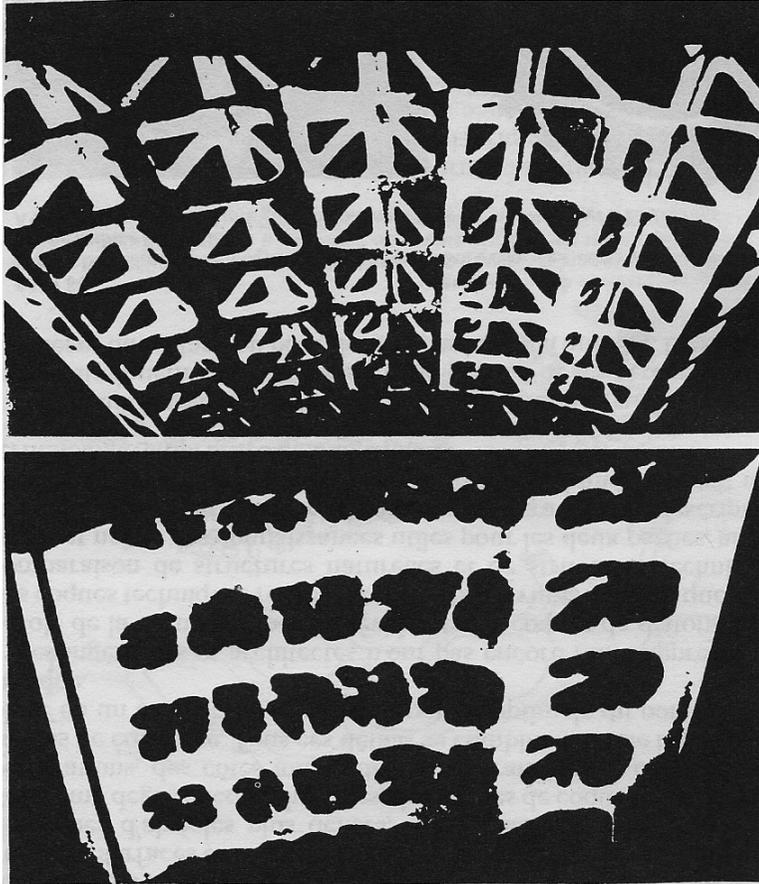
On pourrait aussi faire la même analogie avec le système des constructions légères des membrures et revêtements en aluminium des fuselages d'avions.

Représentée sur le photogramme de la page suivante, la dalle réticulaire légèrement cintrée réalisée par l'institut de Frei Otto constitue un exemple de projet très intéressant. Il s'agit d'une coque en treillis, à simple courbure, et qui, dans le sens de la courbure se compose d'un assemblage de barres dans une trame carrée avec des nœuds rigides.

Ceci nous amène à considérer le fait, qu'en biologie comme en architecture, les mêmes exigences semblent conduire aux mêmes structures. Fonction et matériau sont-ils dans les deux cas, les éléments déterminants dans l'idée du constructeur ?

A gauche: detail de la coque de la diatomée *Sirirella*. On observe que les côtes renfoncent la coque criblée d'alvéoles. A droite: Projet de couverture d'une gare par E. Torroja. La coque nervure en béton reprend la meme logique statique que *Sirirella*





En haut: detail de la coque de la diatomée *Cocconeis scrutellum*. En bas: projet d'une dale reticule, légèrement cintrée, conçu par l'institut de Frei Otto.

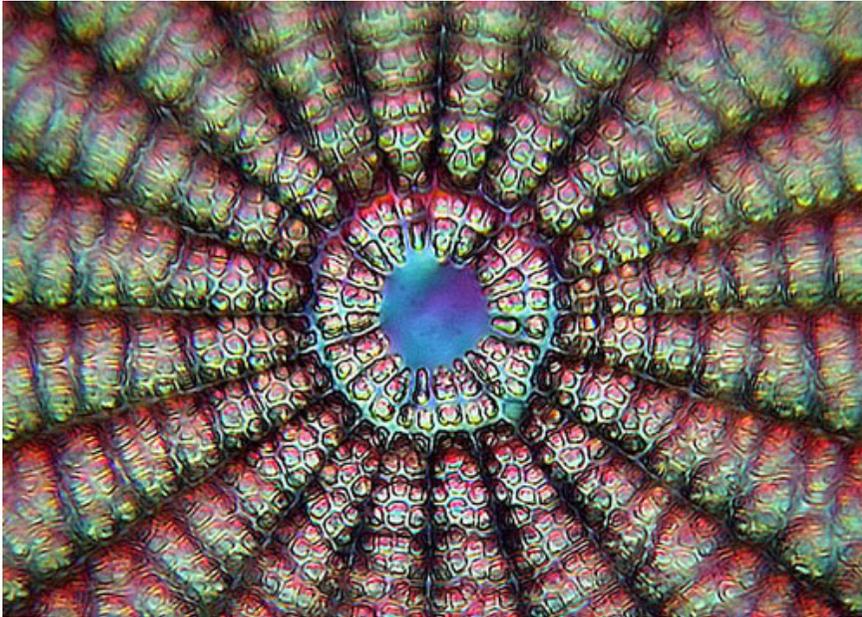


## Coupoles miniatures ou coupoles gigantesques ?

Tout comme celles des oursins observables à l'oeil nu dans les fonds marins, les formes des valves des diatomées sont d'une diversité incroyable: allongée, en forme de S ou rondes. Si l'on examine la face interne d'une coque de diatomée centrée comme la diatomée *Arachnoidiscus*, l'analogie entre le motif radiaire symétrique des côtes et les nervures de certaines constructions modernes de coupôles est saisissante. Sans échelle, on peut même se perdre entre infiniment petit et ordre de grandeur habituel d'un bâtiment. Seules les petites aspérités révélées sur la coque de diatomée *Arachnoidiscus* lors d'une observation attentive permettent par exemple de la distinguer de la coupôle de béton de Pier Luigi Nervi conçue pour le Palais des Sports de Rome. Celle-ci est composée de nervures de béton plissées. D'autres coupôles sont réalisées en une mince coque de

béton, hémisphérique, renforcée par des structures de soutien radiales en réseaux réguliers ou irréguliers. De tels principes structuraux ont ainsi déjà été appliqués à des voûtes de croisées d'ogives de certaines églises gothiques ou aux mosquées persanes à double coupôle conchoïdale renforcée par des nervures radiales. Le revêtement à caisson de diverses coupôles de la Renaissance a aussi une fonction statique. Il soutient la « peau » de briques d'argile tendue au-dessus. Ce principe a effectivement été appliqué pour ériger la coupôle de l'église San Carlino alle quattro Fontane de Rome, dont l'architecte Borromini avait lui-même été surpris de découvrir une structure très ressemblante chez la diatomée marine *Thalassiosira fluviatilis*.

Des analogies techniques, comme les constructions de coupôles ou de coques nervurées, sont souvent des constructions minimales. C'est à dire qu'elles résistent aux efforts qui leur sont appliqués avec un minimum de matériau. Avec les coques de silice des diatomées, la nature a vraiment construit quelque chose de singulier. Du fait de la sélection naturelle permanente,



A gauche: Détail de la partie centrale de la diatomée *Arachnoidiscus*. A droite: couple de béton renforcée par des nervures pour le palais des sports de Rome, conçu par Pier Luigi Nervi.



Coupole du palais des sports de Rome par P. L. Nervi, vue de la voûte en résille .

qui permet aux éléments les plus économiques en matière et en ressources et les plus résistantes aux conditions extérieures, ces structures particulièrement savantes atteignent une rigidité extrême avec une quantité de matériau réduite, comme les structures minimales. Ces petites merveilles de la nature, qui ne mesurent que quelques dixièmes de millimètre, sont en effet de toute évidence des structures minimales. Elles semblent être, elles aussi, conçues pour supporter de fortes pressions, sans constituer de coques massives, qui seraient alourdies par un surcroît de matériau, bien que, dans leur milieu, les diatomées ne supportent que rarement de fortes pressions. Elles peuplent cependant tous les biotopes possibles, des mers aux petits ruisseaux d'eau douce. En réalité, si ces structures particulièrement adaptées aux fortes pressions ont été sélectionnées pour parvenir au bout de plusieurs millénaires à de tels degrés de raffinement mécanique, c'est qu'elles doivent résister à de très fortes pressions

osmotiques et de turgescence de la cellule elle-même. Ainsi, contrairement aux constructions architecturales, ce n'est pas tant l'adaptation aux contraintes extérieures et à leur poids propre qui a déterminé leurs formes si élaborées que leur adaptation à leurs contraintes mécaniques et biophysiques internes.

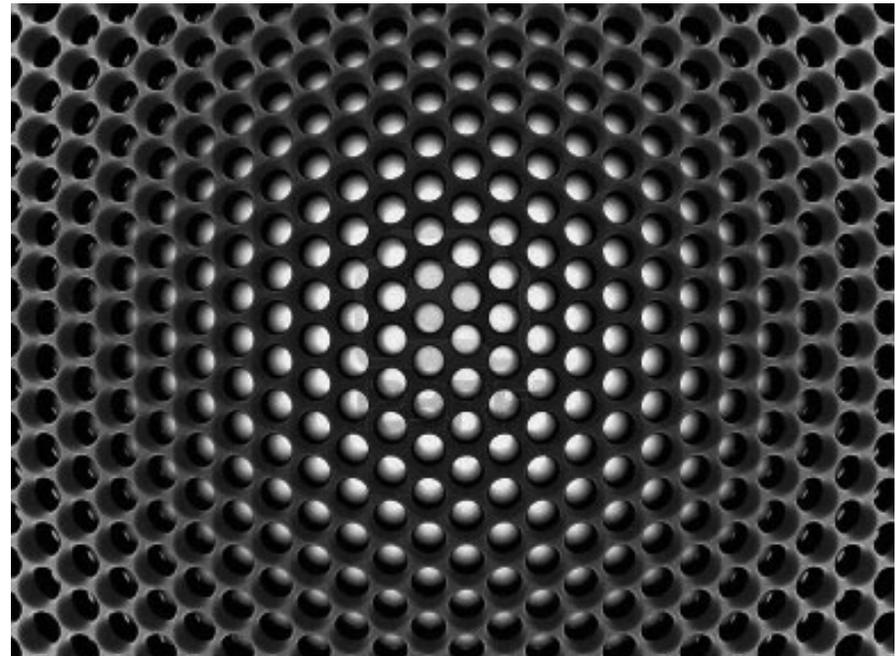
Par ailleurs un autre point mérite notre attention. Il peut paraître tout à fait surprenant qu'un simple agrandissement d'échelle permette la transposition de systèmes microscopiques aussi complexes à la taille d'un ouvrage architectural. Qui aurait pu penser qu'un agrandissement de 30 000 fois d'une structure permettrait néanmoins d'en conserver les propriétés statiques ? En d'autres termes, ces différentes analogies laissent à penser qu'aucune non linéarité régissant l'ordre statique de la structure n'entre en jeu, ce qui est tout à fait surprenant mais ce révèle passionnant et très intéressant. Ceci provient probablement, tout du moins en partie, de la nature des matériaux qui diffèrent entre la silice du micro-organisme et les matériaux utilisés à l'échelle des architectures humaines.

## Conclusion

Nervures, alvéoles, réticulations, plissements, la nature regorge de systèmes structuraux complexes pour allier légèreté et rigidité dans des structures d'une virtuosité étonnante qui n'ont pas fini d'inspirer les ingénieurs et les architectes.

Ces formes nous séduisent d'autant plus qu'elles sont conçues pour remplir leur fonction en interaction avec leur environnement, ce qui est, à une autre échelle, l'une des qualités essentielles que doit posséder un bâtiment ou une structure.

Enfin, ces structures offrent une clé pour remplir l'un des enjeux écologiques majeurs pour la construction du XXIème siècle : construire plus et mieux avec moins.



Structure en nid d'abeilles

# Bibliographie

## Ouvrages :

**Featherweights, Light, Mobile and Floating Architecture**,  
Oliver Herwig, Prestel, 2003

**Prozess und Form « Natürlicher Konstruktionen »**. **Der  
Sonderforschungsbereich 230**, Klaus Teichmann et Joachim  
Wilke. Berlin, Ernst und Sohn, 1996

**Morpho-Ecologies**, Michael Hensel et Achim Menges, AA  
publications , 2006

**Bau-Bionik-Natur <Analogien> Technik**, Werner Nachtigal,  
Springer, 2003

## Sites internet :

[www.microscopies.com/](http://www.microscopies.com/)

[www.cosmovisions.com/](http://www.cosmovisions.com/)

[www2.cnrs.fr](http://www2.cnrs.fr)

[www.inra.fr](http://www.inra.fr)