



Communiqué de presse

L'art de l'ingénieur Constructeur, entrepreneur, inventeur

Exposition
Galeries Nord et Sud, Forum
25 juin-29 septembre 1997

Quelques manifestations internationales ont abordé au cours des dernières décennies, le monde de l'ingénierie, parmi lesquelles *Twentieth Century Engineering* au Museum of Modern Art de New York en 1964, *Architecture d'ingénieurs, XIXe et XXe siècles* au Centre Georges Pompidou en 1978, et, plus récemment *Great Engineers* au Royal College of Art à Londres en 1987. Le Centre Georges Pompidou, dont la conception a été le fruit d'une collaboration très étroite entre ingénieurs et architectes, consacre, vingt ans après son ouverture au public, une grande rétrospective aux réalisations majeures des ingénieurs constructeurs depuis le milieu du XIXe siècle. Cette grande exposition investira l'ensemble des espaces du rez-de-chaussée : Forum haut et bas, Galeries nord et sud, soit environ 4000 m². Dès l'entrée dans le Forum, le visiteur se trouvera confronté puis immergé dans le monde des ingénieurs grâce à la présence d'objets spectaculaires comme un dôme géodésique de Buckminster Fuller, la voûte du Pavillon de l'Aluminium de Jean Prouvé ou encore une structure tendue de Frei Otto.

Notre perception a été programmée par les oeuvres de nouveaux créateurs, les ingénieurs des grandes structures qui donneront au siècle ses références. Les grandes serres, halles d'exposition, silos, ponts, hangars de dirigeables, plate-formes offshore : chacune de ces productions se révélera un puissant vecteur d'émotions nouvelles. La prouesse constructive, l'économie de matières et de moyens, l'intelligence des inventions techniques ont fait des ingénieurs les véritables possesseurs de l'émotion architecturale depuis la révolution industrielle. Ces ouvrages installés dans la ville ou le paysage ont inventé la légèreté et la transparence, les images du monde contemporain et le regard que nous lui portons.

A l'opposé de la tradition et des pouvoirs de la "proportion" chère aux architectes, l'art de l'ingénieur, fondé sur l'expérimentation et le calcul, le raisonnement analytique, s'est rendu maître de l'audace et de la nouveauté. Cette dimension héroïque implique l'idée de performance - éphémère car toujours dépassée par les nouveaux acquis - but ultime au sein d'une vision positive et progressiste. Le monde des objets semble alors pouvoir être produit et jugé selon les critères d'une "beauté technologique" ne laissant plus de place à l'historicisme ou au goût.

L'exposition rend compte des oeuvres fabriquées selon cette hypothèse qui nous accompagne depuis la révolution industrielle. Elle prend comme guide la mise en oeuvre des matériaux, la fabrication de l'ouvrage, l'avancement du chantier qui sont pour l'ingénieur plus essentiels que l'oeuvre faite. A la présentation de l'ouvrage terminé, l'exposition substitue le temps de l'oeuvre en train de se faire.

Les ingénieurs furent tout d'abord les concepteurs de structures et de grands ouvrages d'art installés dans un site. La compréhension du fonctionnement des structures soumises aux efforts du vent, des charges, de la gravité fut constitutive de leur science. Cette exposition est également une typologie des structures. Les innovations dans les structures, depuis les années cinquante, sont devenues moins spectaculaires.

Qu'en est-il désormais de l'ambition créatrice des ingénieurs, dès lors que l'exploration scientifique des structures constructives est terminée? De nouvelles contraintes sont venues supplanter la maîtrise du calcul des grandes portées. Les ingénieurs civils nous apprennent que le chantier et la mise en oeuvre de l'ouvrage importent plus désormais que son calcul. La recherche ne s'est-elle pas déplacée de la structure constructive vers les technologies liées à la construction ? Appareillages techniques, machines, technologies de l'isolation acoustique et thermique, maîtrise de la lumière et du climat ont pris le pas sur la structure.

Les grandes mutations industrielles, la diffusion des matériaux et les inventions techniques rythment l'exposition :

1-Le fer : au XIXe siècle, le développement de la production des métaux ferreux et des chemins de fer introduisent la construction des ponts et gares à grande échelle. Mariée avec la production moderne du verre industriel, l'époque permettait une transparence : halles d'exposition, pavillons, dômes, tours paraboliques, gratte-ciel, serres... (Galerie nord). Chargée de recherche : Barbara Shapiro Comte.

2-La diffusion du béton armé et l'invention de la précontrainte, le développement des coques. Le béton armé s'invente à travers des brevets (brevet Monier 1867, brevet Hennebique 1892, Ransome 1884, etc...) qui sont le moyen juridique favorisant sa promotion. La précontrainte (1936) qui révolutionne la connaissance du matériau sera mise en oeuvre par Eugène Freyssinet. Les coques en voile mince, à partir des années 20 et 30, introduisent une nouvelle esthétique. (Galerie sud). Chargée de recherche : Concetta Collura.

3-Les structures légères : la recherche de la légèreté et une meilleure maîtrise du calcul conduisent au développement des nappes tridimensionnelles. Les membranes tendues ou gonflables, sont permises par l'existence de tissus acceptant des tensions importantes. (Forum). Chargée de recherche : Caroline Maniaque.

4-Les recherches contemporaines sont liées à l'apparition de nouveaux matériaux, à la généralisation de la simulation informatique, au développement des structures hybrides et des techniques de second oeuvre. Si la grande portée et la grande hauteur sont toujours d'actualité, la préservation de l'environnement, la consommation d'énergie et le confort sont désormais des thèmes de travail de l'ingénieur. (Forum bas). Chargée de recherche : Rémi Rouyer.

Architecture de l'exposition

Conçue par Alain Guiheux et réalisée par les architectes Michel Antonietti et Nathalie Crinière, l'architecture de l'exposition "L'Art de l'ingénieur" part de l'expérience visuelle de la tradition des grandes halles d'exposition des XIXe et XXe siècles. Le toit "Festival Plaza" (Tange architecte, Kawaguchi ingénieur) de l'exposition d'Osaka 70, puis le bâtiment du Centre Georges Pompidou ont été profondément marqués par le projet générique du Crystal Palace. La grande longueur, la répétition, la transparence et l'ampleur des volumes caractéristiques de ces espaces sont retrouvés par une présentation sur des tables basses, identiques pour toute l'exposition, qui évacuent toute présence des cimaises.

Le volume lui-même, le Forum et les galeries du rez-de-chaussée, qui indiquent l'architecture d'ingénieur - nous sommes dans le bâtiment d'un grand ingénieur, Peter Rice - et la force des objets exposés, accrochés ou suspendus, sont les seules présences. Les objets sont l'architecture même : un dôme de Buckminster Fuller, la voiture Dymaxion, la voûte du Pavillon de l'Aluminium de Jean Prouvé, une lentille flottante de Jörg Schlaich, une structure tendue de Frei Otto, une aile de bateau, la structure d'un avion du début du siècle.

L'ingénieur-bâtitteur travaille sur des objets qui ont des dimensions imposant le sentiment de changement d'échelle. Les ponts, les barrages, les plate-formes offshore

dépassent notre échelle. Plus encore que pour une autre exposition d'architecture, les édifices ne peuvent y entrer. Les grandes images en mouvement du sol au plafond sur les murs périphériques redonnent cette grande dimension de l'art de l'ingénieur. L'art de l'ingénieur se caractérise aussi par son investissement dans la fabrication même des ouvrages et tout d'abord du chantier et de ses procédures. Les projets sont présentés le plus souvent possible aussi à travers des photographies représentant la progression du chantier.

Au sein de ce découpage, l'exposition rend compte de l'oeuvre d'ingénieurs-constructeurs qui ont bâti le XIXe et le XXe siècles. Parmi eux : *Gustave Eiffel, Isambard Kingdom Brunel, Thomas Telford, William Le Baron Jenney, John Roebling, François Hennebique, Albert Caquot, Othmar Amman, Eugène Freyssinet, Robert Le Ricolais, Robert Maillart, Pier Luigi Nervi, Edoardo Torroja, Felix Candela, Richard Buckminster Fuller, Jean Prouvé, Frei Otto, Mamoru Kawaguchi, Yoshikatsu Tsuboi, Ted Happold, Fritz Leonhardt, Leslie Earl Robertson, Ove Arup, Franz Dischinger, Ulrich Finsterwalder, Norman Foster, Peter Rice, Jörg Schlaich, Ricardo Morandi, Vladimir Sukov, Nicolas Esquillan, Jean Muller, Stéphane du Château...*

Commissariat de l'exposition : Raymond Guidot et Alain Guiheux, Paris ;
José A. Fernandez Ordonnez, Madrid.

L'exposition "L'Art de l'ingénieur" a été réalisée grâce au soutien de OTIS, PHILIPS, FORBO SARLINO, CAMPENON BERNARD SGE et FREYSSINET.

Le Dictionnaire

A l'occasion de l'exposition "L'art de l'ingénieur", les Editions du Centre Georges Pompidou coéditent avec les Editions Le Moniteur, un Dictionnaire des ingénieurs, ouvrage d'environ 600 pages, rassemblant quelques 700 illustrations et plus de 100 auteurs français et étrangers, ingénieurs, architectes et historiens, sous la direction d'Antoine Picon. Prix public : 490 frs.

Autour de l'exposition

Un petit journal (24 pages, 25 francs), reprenant les quatre sections de l'exposition, sera publié par les Editions du Centre Georges Pompidou sous la direction de Bernard Vaudeville de l'agence R.F.R, également membre du Comité scientifique de l'exposition.

Un colloque international sur le thème de l'art de l'ingénieur conçu par les Revues parlées aura lieu au Centre Georges Pompidou les 25 et 26 septembre 1997.

Informations pratiques

Ouvert au public du 25 juin au 29 septembre 1997, du lundi au vendredi de 12h00 à 22h00, samedi et dimanche de 10h00 à 22h00, Fermé le mardi.

Tarif : 45 frs / tarif réduit : 30 frs

Forfait spécial : L'art de l'ingénieur + L'Atelier Brancusi + Made in France : 55 frs

Réservation possible à partir du 15 avril 1997 pour les manifestations de l'été sur 3615 Beaubourg (1,29 frs ttc la minute)

Internet : <http://www.cnac-gp.fr>

Direction de la communication

Attachée de presse : **Emmanuelle Toubiana**

Tél. : 01 44 78 49 87 / Fax : 01 44 78 13 02

L'art de l'ingénieur

Le Fer, Galerie nord

Sélection d'oeuvres présentées dans l'exposition

• Brevet et protection industrielle

Au XVII^e siècle en Grande-Bretagne et au XVIII^e siècle aux Etats-Unis, ont été promulguées les lois reconnaissant les droits des inventeurs. En 1791, l'Assemblée nationale adopte en France une loi "relative aux découvertes utiles et aux moyens d'en assurer la propriété à ceux qui seront reconnus en être les auteurs." Elle fonde la construction juridique du droit français des brevets d'invention, qui vient remplacer les privilèges accordés par les lettres patentes. Instrument juridique, le brevet tient lieu de contrat passé entre le corps social et l'inventeur. A l'auteur qui divulgue son invention, l'Etat garantit en contrepartie un droit exclusif d'exploitation. En France, il est d'une durée de vingt ans. (...)

• Les ponts

On a construit des ponts en bois depuis les temps les plus reculés, néanmoins l'histoire des ponts en maçonnerie est également très ancienne. Dès 3500 ans avant J.-C., les Sumériens avaient déjà eu l'idée d'assembler des pierres pour constituer des arches, technique que les Romains perfectionnèrent, en particulier grâce à l'utilisation de ciments naturels. Appliquée à l'art de construire les ponts, cette technique permit d'édifier des voûtes composées de voussoirs en pierre juxtaposés et liés entre eux par du mortier. Pour soutenir les voussoirs pendant la construction, des cintres arqués en charpente étaient provisoirement installés.

C'est au XVIII^e siècle, avec des ingénieurs français tel Jean Rodolphe Perronet, ou anglais comme John Rennie, que l'étude des efforts de compression à l'intérieur des voûtes permet de substituer l'arc elliptique à l'arc de cercle pour aboutir aux arcs surbaissés.

C'est sur le modèle d'une charpente en bois, qui ressemble déjà fort à celle décrite en 1561 par Philibert de l'Orme dans ses "Nouvelles Inventions pour bien bastir et à petits frais", que sera conçu en 1775 le premier pont en fonte de fer : celui de Coalbrookdale.

En revanche, c'est sur le principe des ponts en maçonnerie à voussoirs de pierre que seront construits, à la fin du XVIII^e siècle, les premiers à voussoirs en fonte de fer (ponts de Sunderland et de Southwark). (...)

• Le pont de Coalbrookdale

Si Abraham Darby III a la responsabilité de la construction du pont de Coalbrookdale, premier pont entièrement métallique de l'histoire, l'idée en revient à l'architecte de Shrewsbury, Thomas Farnolls Pritchard, qui en dessina les plans en 1775. Bien que fabriqué en fonte de fer, ce pont est constitué de multiples pièces assemblées selon des techniques propres au charpentier. Les pièces de fonte moulées sont montées pendant l'été 1779, et le pont résistera à une crue dévastatrice en 1795. Il apparaît dès lors comme le symbole suprême de l'ère nouvelle. Les touristes commencent à venir voir le pont dès le début des années 1780 ; on construit sur la rive nord une ville à laquelle on donne son nom : Ironbridge. (...)

• Les ponts suspendus du début du XIX siècle

La fonte de fer a pu être produite en masse dès le début du XVIII siècle. En 1784, Henry Cort met au point la technique du puddlage qui permet d'obtenir un fer pratiquement pur. Le fer résiste bien à la traction. Il est forgeable. Ses qualités sont donc complémentaires de celles de la fonte; aussi verrons-nous les deux matériaux associés fréquemment dans la réalisation de bâtiments et d'ouvrages.

A la fin du XVIII siècle, le fer puddlé permet la transposition à une échelle industrielle d'une technique très ancienne, celle des ponts suspendus traditionnels utilisant pour leurs éléments porteurs des matières végétales fibreuses et qui pouvaient atteindre jusqu'à 245 mètres de portée dans les régions montagneuses, que ce soit en Chine ou en Amérique du Sud. Des ponts à chaîne en fer furent construits en Chine et au Tibet dès le XV siècle. Ils furent connus en Europe au XVII siècle grâce à des récits de pères jésuites. Au XIX siècle, un ingénieur comme l'Américain John Finley démontre que, pour des ouvrages de grande portée, les ponts suspendus sont préférables aux ponts en arcs et plus économiques qu'eux. Sur ce même principe, Samuel Brown et Thomas Telford construisent les premiers ponts suspendus anglais, et le second, entre 1818 et 1826, celui sur le détroit de Menai, d'une portée de 176 mètres entre piles et d'une hauteur sous tablier de 31 mètres permettant le passage des navires militaires.

En France, Marc Seguin construit en 1824 sur le Rhône, entre Tain et Tournon, un pont dont l'originalité tient à son système de suspension par câbles en fil de fer. Moins coûteux et plus facile à construire pour de grandes portées, c'est ce système qui finira par prévaloir.

• Les ponts en treillis

Le développement des poutres en treillis est étroitement lié aux hasards des expériences qui jalonnent l'histoire des ponts lorsqu'on les libère des pesantes voûtes de pierre. Elles deviennent, avec la révolution industrielle, le symbole même de la construction métallique. Le premier matériau utilisé fut néanmoins le bois, en particulier aux Etats-Unis où leur emploi connut un réel succès. En combinant les principes de l'arche et du treillis, Lewis Werwag construit en 1812 un pont d'une portée de 102 mètres. Avec des contrevents en fer forgé pour le pont de New Hope (Pennsylvanie, 1813), il engage le processus de remplacement du bois par le fer dans les ponts à treillis. (...)

C'est au milieu du XIX siècle que la poutre en treillis apparaît en Europe, sous la forme notamment de poutres lenticulaires, dont les membrures supérieures et inférieures ont une forme parabolique. Isambard K. Brunel en fut l'initiateur et construisit sur ce principe, entre 1854 et 1859, le pont Royal Albert à Saltash (Grande-Bretagne). En Allemagne, August von Pauli réalisa de nombreux ponts du même type.

• Le Britannia Tubular Bridge, premier pont en tôle de fer

De la machine à vapeur est née la locomotive, qui est devenue opérationnelle en 1829 avec la « Rocket » de George et Robert Stephenson. Le chemin de fer exige des ouvrages permettant aux trains, vitesse et inertie jouant, de franchir d'un bond les vallées les plus larges. Il engendre un nouveau type d'ouvrage. On va parler désormais de viaduc. Le Britannia Tubular Bridge, construit par Robert Stephenson entre 1846 et 1850 sur le détroit de Menai pour relier, par voie ferroviaire, Chester à Holyhead, a été conçu pour résister aux charges, mais aussi aux vibrations occasionnées par le passage des trains. (...) Cet ouvrage est le premier à utiliser le fer pour l'ensemble de la structure. Il a bénéficié en effet de la

production de tôle de fer puddlé laminé désormais industrielle. Le chantier lui aussi un véritable modèle. Préfabriqué sur les berges, les tubes de fer sont acheminés par flottage entre les piles et hissés en position définitive par des vérins hydrauliques. (...)

• Les ponts cantilevers

Le principe du pont à console, encore appelé « cantilever » (porte-à-faux) peut être envisagé de deux manières selon que l'on se réfère à un modèle de pont poutre ou de pont en arche. (...)

Le pont sur le Firth of Forth représente la forme la plus aboutie et la plus originale du pont cantilever, par l'introduction dans sa partie supérieure du principe de haubanage. Ce pont construit en Ecosse, entre 1882 et 1910, par les ingénieurs John Fowler et Benjamin Baker, reste aujourd'hui encore exceptionnel par ses dimensions (portée gigantesque de 521 mètres) mais aussi par l'audace de sa conception. (...)

• Le système Roebling et le pont de Brooklyn

John Augustus Roebling est l'un des grands pionniers des ponts suspendus. Son génie est d'avoir fondé sa démarche sur la conception, la fabrication et la pose des câbles de suspension. Dans l'ouvrage, ils représentent l'essentiel. Ses deux brevets les plus importants concernent la mise en oeuvre des câbles. (...)

En 1847, alors qu'il ne jouissait pas encore d'une réelle notoriété, Roebling propose d'édifier un pont reliant New York et Brooklyn, en passant au-dessus de l'East River. Le projet, d'abord abandonné à cause des difficultés techniques qu'il représente, ne sera finalement repris qu'en 1867 alors que la réputation de Roebling est solidement établie. L'édification du pont durera seize ans. Avec sa travée principale de 489 mètres, prolongée de part et d'autre par des travées de 283 mètres et des piles de granit qui s'élèvent à 84,40 mètres au-dessus des eaux, ce pont – appelé désormais Brooklyn Bridge – détient, en 1883, un record mondial, qui ne sera battu qu'en 1931 par le pont George Washington construit par O.H. Ammann. (...)

Pour réaliser le chef-d'oeuvre que représente le pont de Brooklyn, la famille Roebling a payé un lourd tribut. En 1869, à la suite d'un grave accident survenu sur la chantier, John Augustus Roebling meurt du tétanos. A trente-deux ans, son fils Washington August devient à son tour ingénieur principal du projet. Victime des hautes pressions subies lors de ses descentes quotidiennes dans les caissons de fondations, il tombe gravement malade. C'est son épouse, Emily Warren Roebling, qui pendant onze ans va suivre le chantier et servira d'intermédiaire entre son mari invalide et les ouvriers.

• Les ponts en arc et en acier

A la fin du XIX siècle l'acier remplace le fer dans la construction des ponts. Sa remarquable résistance aux efforts de traction, de flexion, de cisaillement et de compression permet, quel que soit le type d'ouvrage envisagé, d'accroître les portées. (...)

La grande résistance de l'acier à tous les efforts mécaniques a permis également de surbaisser les arches. C'est notamment le cas du pont Alexandre III, construit à Paris, par Jean Résal et Amédée Alby pour les besoins de l'Exposition universelle de 1900. On y a utilisé des voussoirs en acier moulé, ce qui a permis de tendre l'arc unique (109 mètres) au maximum et d'abaisser le tablier au niveau des rues de Paris.

• Les coupoles métalliques du XIX siècle

La pierre a permis aux Romains de construire des coupoles de grandes dimensions mais très lourdes. En substituant au II^e siècle (après J.C.) la brique – plus légère – à la pierre, Hadrien a doté le Panthéon de Rome de l'une des plus belles coupoles de l'histoire de l'architecture. La quête d'une légèreté toujours plus grande trouve dans la charpente en bois un lieu d'expression idéal. (...) La production massive de métaux ferreux, telle qu'elle se développe avec la révolution industrielle, permet de franchir une étape supplémentaire : ainsi à Paris François-Joseph Belanger, assisté par les ingénieurs Jean-Baptiste Rondelet et François Brunet, conçut-il pour la Halle au blé une coupole de 39 mètres de diamètre terminée à son sommet par une vaste calotte vitrée. (...) La production à échelle industrielle de l'acier, qui résiste parfaitement bien à toutes les sollicitations, va permettre d'ultimes audaces. C'est ce dont témoignent les structures des constructions de Vladimir Choukhov à la fin du XIX siècle.

• Les grandes serres du XIX siècle

La construction des serres se développe dans les pays industrialisés en même temps que s'affirme leur autorité sur le reste du monde (empires français et britannique). Les serres, vastes espaces couverts où le matériau essentiel est le verre – capteur de chaleur – permettent de cultiver sous des climats qui ne s'y prêtent guère des plantes venues de pays chauds, en particulier des colonies. On recherchera dans la conception d'une serre aussi bien la grande portée que la transparence. La structure porteuse doit être à la fois fine et résistante. Les premiers jardins d'hiver et orangeries d'Europe datent du XVII^e siècle, mais c'est au cours du XIX^e siècle que l'intérêt pour les serres se développe. (...) Lorsqu'au milieu du XIX^e siècle les profilés laminés s'imposent sur le marché, ils trouvent dans les serres des champs d'application privilégiés. Néanmoins, le fer présente un désavantage non négligeable : il est sujet à la corrosion, et le milieu humide entretenu dans les serres la favorise. Il est pourtant utilisé pour les structures de toutes les grandes réalisations du XIX^e siècle. Le bois, lui, conserve ses adeptes. Ainsi, Joseph Paxton l'emploiera pour le célèbre Crystal Palace (1850–1851), qui utilise le bois pour les profilés dans lesquels est enchâssé le verre, même si le métal est employé pour l'ensemble de la structure. En 1849, la décision est prise d'organiser à Londres une grande exposition internationale destinée à célébrer l'unité des nations industrialisées à l'heure du libre échange. Un concours pour le bâtiment central est organisé, auquel 245 concurrents répondent. On fera appel en urgence à Joseph Paxton, célèbre pour ses serres de Chaxton, pour trouver une solution. Celui-ci confie l'étude du projet à l'entreprise Fox, Henderson and Company. L'étude de Paxton est publiée en juillet 1850, et l'exposition doit ouvrir en mai 1851. Sept semaines sont suffisantes pour réaliser les plans d'exécution. Bien avant qu'il soit terminé, les journaux célèbrent le Crystal Palace comme un miracle de la construction. De fait, tout repose sur une préfabrication poussée à l'extrême. Les dimensions de l'édifice sont gigantesques. Avec une longueur de 563 mètres pour une largeur de 124 mètres, il couvre une surface de 70 000 m² dans Hyde Park. Fondé sur un système d'unités modulaires standardisées et parfaitement adaptées à la préfabrication, le Crystal Palace met en jeu 3 300 colonnes et 2 224 poutrelles en fonte, 300 000 éléments de verre et 205 000 cadres de bois. 1 600 hommes seront employés sur un chantier dont l'organisation elle-même est exemplaire. A la fermeture de ce qui apparaît aujourd'hui comme la première exposition universelle, le

Crystal Palace est démonté et reconstruit par Fox Henderson au sud de Londres (Sydenham). C'est là qu'il est détruit par un incendie en 1936.

• De Bogardus à l'Ecole de Chicago

Entre 1850 et 1880, James Bogardus édifie un peu partout aux Etats-Unis grands magasins, entrepôts, bâtiments administratifs. L'immeuble le plus connu de Bogardus – singulier à l'époque par sa grande surface de verre qui habillait la façade – fut édifié à New York, en 1854, pour la maison d'édition Harper and Brothers. De la pratique du « balloon-frame » jointe à l'expérience de Bogardus, naîtra pour une large part l'esprit de l'Ecole de Chicago. (...)

En 1871, le centre de Chicago, grand marché de produits agricoles, est détruit par un gigantesque incendie. Sa reconstruction, qui débute en 1875, s'inscrit dans la période où l'agriculture américaine passe du stade artisanal au stade industriel. L'ossature métallique, lorsqu'elle devient système porteur d'un bâtiment, permet de construire en hauteur en ménageant à chaque étage de larges baies vitrées. L'intervention de l'ascenseur permet en outre de la limite des cinq étages qui était de règle dans les immeubles où l'on ne disposait que de l'escalier. (...)

Un nouveau vocabulaire architectural va apparaître, qui ouvre sur le rationalisme, celui-là même que le Mouvement moderne développera dans les années vingt et trente. Pour l'heure, il est celui de l'Ecole de Chicago.

• Les grands ponts américains des années trente

Dans les années trente, les buidings américains – tout en restant fidèles aux grands principes constructifs établis par l'Ecole de Chicago – dépassent en hauteur tout ce qu'on avait imaginé jusque-là. Les ponts ne sont pas en reste. Au « toujours plus haut » fait écho le « toujours plus long ». L'acier autorise l'audace, excite l'imaginaire, et ce qui était pure utopie devient envisageable : la démesure est réalisable, par exemple franchir un fleuve trop large ou une vaste embouchure. Au-delà des considérations techniques, on se prend à composer l'esthétique d'un paysage, qui intervient au même titre que la rationalisation du chantier. (...). Le rôle de l'ingénieur devient dès lors primordial. Othmar H. Ammann s'impose alors. Fort d'une réputation acquise lors de l'édification du pont de Hell's, il va construire simultanément le pont en arche de Bayonne et le pont suspendu George Washington, l'une des réalisations les plus remarquables du XX siècle. Il sera également l'un des experts dont Joseph Strauss s'entourera pour la construction du pont suspendu du Golden Gate.

Malgré les progrès techniques accomplis depuis le début du XIX siècle dans la construction des ponts suspendus de grande portée, l'idée d'un pont de ce type permettant de franchir 1 966 mètres est, à la fin des années vingt, de l'ordre de l'utopie. C'est pourtant à cette tâche que l'ingénieur Joseph Baerman Strauss et les conseillers qu'il a réunis autour de lui vont s'attaquer pour rendre possible la traversée du Golden Gate par la route. (...)

Les ingénieurs réunis en équipe autour de lui sont parmi les plus prestigieux du moment parmi lesquels Leon Salomon Moiseiff et Othmar H. Ammann. (...)

Le pont, commencé en 1933 est achevé en 1937. Ses 1 280 mètres font du Golden Gate, et pour longtemps, le plus long pont suspendu au monde.

• Le temps des gratte-ciel

Avec l'invention par Elisha G. Otis de l'ascenseur antichute et l'utilisation des ossatures métalliques, les bâtiments vont voir croître le nombre de leurs étages, ce qui deviendra une spécialité américaine. Avec William Le Baron Jenney, l'Ecole de Chicago a fixé dans les années 1880 les règles de la construction en hauteur, qui seront en usage jusque dans les années cinquante : un squelette métallique pour l'ensemble de la construction, auquel on accroche des façades autoporteuses qui n'ont plus qu'un rôle d'habillage. (...)

Au tournant du XX siècle s'organise, entre les firmes installées à New-York, une véritable compétition autour de la hauteur des buildings. Ainsi la première décennie s'achève-t-elle par la construction de l'immeuble Woolworth (1911-1913) qui, en 1913, culmine avec ses 241 mètres de hauteur pour 55 étages. Les années vingt sont pour les gratte-ciel l'époque des grands records : l'Empire State Building, construit entre 1929 et 1931, établit un record durable avec ses 378 mètres et ses 85 étages. (...)

• La tour Eiffel

En juillet 1884, les deux principaux collaborateurs de l'entreprise Eiffel, Emile Nouguier et Maurice Koechlin, imaginent une très haute tour métallique qui serait le point de mire de l'Exposition universelle de 1889. Le projet sera retenu par les organisateurs de l'Exposition, qui lancent en 1886 un concours concernant l'ensemble de la manifestation, en y incluant une tour de 300 mètres. Avec le début du chantier commence une polémique qui réunit contre la tour quelques grands noms du monde artistiques. La critique se calmera néanmoins, au fur et à mesure que la tour s'élève, le chantier forçant l'admiration. (...)

• La légèreté selon Choukhov

Ingénieur mécanicien diplômé de l'Ecole supérieure technique de Moscou, Vladimir Choukhov devient rapidement ingénieur en chef du bureau technique d'urbanisme de cette ville. Son activité s'exerce dans de nombreux domaines, notamment celui de l'industrie pétrolière. (...)

En 1921, il réalise son chef-d'oeuvre : l'antenne radio Chabolovka de l'émetteur du Komintern à Moscou. Elle est constituée d'un empilage d'hyperboloïdes de révolution en treillis, de diamètres décroissants de la base au sommet. Antérieurement, Choukhov avait déjà utilisé cette technique pour édifier de hautes tours (phares et châteaux d'eau).

L'art de l'ingénieur

Le Béton armé, Galerie sud

Un parcours dans l'exposition

• Les origines du béton

Les ouvrages en béton ou en béton armé puisent à la même source industrielle : la cimenterie. En effet, c'est le ciment qui permet au mélange de mortier, de cailloux et de fer de se concrétiser dans une forme stable et résistante. Le béton est connu des Romains. Il est décrit par Vitruve, Plin, et même par Saint-Augustin (c'est le matériau de la "Cité de Dieu"). Puis sa recette disparaît avec l'Empire. Au XIII^e siècle, il suscite la curiosité des constructeurs, des savants, des ingénieurs, qui se penchent sur la nature du supposé "secret" antique de sa fabrication. L'ingénieur des Ponts et Chaussées Vicat découvre bientôt le moyen de produire artificiellement une chaux de bonne qualité (1818). Le siècle de l'Industrie succède à celui de l'Encyclopédie, et l'artisanat du four à chaux cède la place à la grosse infrastructure des fours rotatifs, qui peuvent produire jusqu'à plusieurs milliers de tonnes de produit par jour. Peu à peu, ce matériau utilisé et expérimenté par les industriels, devient un matériau pour les constructeurs. Parmi eux, François Lebrun et François Coignet développent des procédés originaux, comme, par exemple, le "béton aggloméré". Coignet construit ainsi de nombreux ouvrages (aqueduc de la Vanne, phare de Port-Saïd). Il apparaît aujourd'hui comme un véritable précurseur dans l'emploi du béton, qu'il pensera même à renforcer de tiges métalliques dans certaines de ses réalisations. Sans le savoir, il invente le béton armé.

• Les brevets

Le béton armé (ou le ciment armé) est inventé dans la seconde moitié du XIX^e siècle, en pleine révolution industrielle, à une époque où, parallèlement aux développements de la production, l'instrument juridique de la protection industrielle se modernise. La loi du 5 juillet 1844 actualise celle du 7 janvier 1791 et, désormais, le brevet d'invention définit une sorte de contrat d'exclusivité pour l'inventeur, à condition qu'il assure la promotion commerciale de son procédé. Dans ce contexte, le ciment armé est plus qu'une simple astuce technique de chantier. Ses promoteurs, de plus en plus nombreux durant la dernière décennie du siècle, cherchent tous à exploiter leur idée en invoquant d'innombrables applications. Le premier d'entre eux, Joseph Monier, n'aura de cesse de découvrir des usages originaux pour son procédé de construction en fer rond et ciment. Aussi, n'est-il pas étonnant de constater qu'en France, entre 1855 (brevet Lambot, le premier) et 1906 (date d'application de la "Circulaire" réglementant de façon générale l'emploi du béton armé), trois cents brevets soient déposés. Le phénomène est identique en Allemagne et aux Etats-Unis. Toutes les semaines pratiquement, on réinvente le béton armé.

• Dans la légende du béton armé

Deux objets bien modestes sont devenus de véritables icônes dans la légende du béton armé : la barque de Joseph Lambot et la niche à chien de Konrad Freytag. On ne peut parler d'ouvrages, bien que de tels objets appliquent sciemment la technique constructive du ciment armé, une carcasse métallique enrobée d'une matière "plastique". (...)

Ces deux témoins sont symboliques à plusieurs titres. La barque du garde-chasse Lambot, montrée lors de l'exposition industrielle de Paris en 1849, a été brevetée par son inventeur en 1855. C'est le premier enregistrement légal de l'invention. Quant à la niche de Freytag, elle a à peu près la même importance que la caisse horticole de Monier (1867), à laquelle l'entrepreneur allemand emprunte l'idée : simple boîte qui a l'avantage d'être solide et imputrescible et peut donc répondre à tous les usages. (...)

Comment expliquer le succès posthume de ces "bagatelles" ? Autour des années 1900, le béton armé est une technique en pleine expansion, déjà concurrente de la construction métallique. Deux grandes firmes à l'époque se disputent le marché à l'échelle de la planète : la française Hennebique et l'allemande Wayss & Freytag. Propagandistes acharnées, elles se disputent même leur mythologie fondatrice. La barque et la niche deviennent ainsi de véritables trésors archéologiques.

• Les fondations

Bien avant de se manifester sous la forme d'ouvrages édifiés, le béton sert à fonder les constructions. Armé, le béton accentue cette propension à la fondation ou au soutènement. Ainsi, les traditionnels pieux en bois sont-ils bien vite délaissés au profit de ces nouvelles aiguilles imputrescibles et très résistantes que préconisent les premiers systèmes de béton armé. (...)

Considère est l'ingénieur qui aura le plus contribué à la mise au point de cet élément de construction. Son armature en forme de frette hélicoïdale donne au pieu un gage de résistance extraordinaire que les entreprises du monde entier emploieront rapidement à partir du début du siècle.

• Les franchissements

Le pont représente sans doute un des débouchés les plus importants dans l'emploi du béton armé. (...). Le pont exploite les potentialités mécaniques variées que permet le béton armé, jouant de ses capacités de résistance à l'extension et à la compression. C'est l'occasion pour les ingénieurs de mettre à profit leur intuition et leur imagination. Ainsi Robert Maillard, sans doute l'ingénieur le plus créatif en matière de ponts, saura-t-il jouer de toutes les subtilités formelles et structurelles du matériau. (...)

On cherche à battre des records de portée, d'ouverture, de minceur mais également de coût. Les Français et les Allemands se distinguent, associant des compétences d'ingénieur et des performances d'entreprise. C'est le cas du pont du Gmündertobel à Teufen, en Suisse (Emil Mörsch, 1907), ou du pont du Risorgimento à Rome (Hennebique, 1909). (...)

La construction des ponts en béton armé va se développer en France à partir des années vingt. (...). Des ingénieurs hors du commun, comme Eugène Freyssinet et Albert Caquot, vont marquer l'histoire de la construction des ponts en béton armé. En Allemagne, parallèlement à une industrie métallurgique très forte, de grandes entreprises de travaux publics, et de grands ingénieurs, comme Franz Dischinger, vont mettre en oeuvre des ouvrages en béton armé. Robert Maillard en Suisse, et Eduardo Torroja, en Espagne, vont introduire des solutions

formelles. Les portées dépassent alors couramment les 100 mètres pour atteindre les 188 mètres au pont Albert-Loupe à Plougastel en 1930.

• L'industrialisation

A partir de 1900, l'essor du béton armé connaît une phase d'accélération sans précédent et un net développement dans le domaine des travaux publics. Une fois franchi le stade de l'invention, il est l'objet d'innombrables perfectionnements qui engendrent dans le bâtiment des pratiques constructives nouvelles et ouvrent la voie à une véritable industrie. La production et la diffusion d'éléments préfabriqués se généralisent en effet dans ce secteur. (...)

Toutefois, l'idée de l'industrialisation trouvera avant la Première Guerre mondiale sa forme la plus fantasmagique, peut-être, avec les maisons en béton coulé d'une seule pièce (jusqu'à la baignoire!), dont l'inventeur américain Thomas Edison, passé à l'industrie cimentière, étudie la production en série. Ce procédé de "maisons moulées" est introduit en Europe par Harms & Small. Au lendemain de la guerre, la Société française des constructions et maisons moulées passera à côté de la reconstruction tandis que, bien loin des projets edisoniens, l'architecte Henri Deneux, avec la probable collaboration de l'ingénieur Bernard Lafaille, accomode les principes de la préfabrication à la restauration de la charpente bombardée de la cathédrale de Reims.

• La précontrainte

Le véritable inventeur de la précontrainte est Eugène Freyssinet, qui en dépose les brevets en 1928. Le mot "précontrainte" est un néologisme forgé par Eugène Freyssinet en 1933 pour désigner son invention. Le béton précontraint est un béton traversé de câbles (parfois de barres) sur lesquels on exerce une traction en appuyant sur le béton ; les câbles sont donc tendus et le béton est comprimé au moyen de vérins hydrauliques avec une force légèrement supérieure à l'ensemble des charges (contraintes) qu'ils auront à subir. (...)

Les câbles de précontrainte peuvent aussi être placés à l'extérieur du béton. La précontrainte extérieure se répand largement à partir des années soixante-dix. La construction des ponts en béton y gagne progressivement en efficacité.

• Les couvertures en voile mince (coques)

Les voiles minces en béton armé mettent en oeuvre un principe appelé « résistance de forme » qui, par son nom, décrit le simple fait que, sans augmenter la quantité de matériau employée, on obtient par simple courbure ou pliage, un accroissement de la résistance. C'est ce principe qui sera utilisé par les grands constructeurs de coques. (...)

Dès 1910, Simon Boussiron utilise des voûtes minces de 8 cm d'épaisseur pour couvrir des halles de chemin de fer de 10 mètres à Bercy. Les portées augmentent dès les années 20 où elles atteignent, puis dépassent les 40 mètres pour abriter des avions. Les formes se diversifient. Après les « voûtes traditionnelles », on construit des voiles en forme de tronc de cône pour couvrir les halles d'usine, en dressant une paroi vitrée à la verticale (sheds), des voiles de forme sphérique dans diverses coupes, puis à double courbure ou en selle de cheval. Eugène Freyssinet atteint 59 mètres à Orly en 1924 pour abriter des dirigeables. (...) Eduardo Torroja en Espagne, Pier Luigi Nervi en Italie, Felix Candela au Mexique se sont illustrés dans ces structures aériennes. La précontrainte permet d'augmenter les portées : Nicolas Esquillan dépassa les 100 mètres aux hangars de Marignane en 1952 et en 1958 atteignit au Cnit à Paris-La Défense ce qui reste toujours le

record mondial : 206 mètres en façade et 238 mètres sous les arêtes de noue. (...)

• Les coupoles

Le premier voile mince de révolution fut construit par Franz Dischinger sur le toit d'une usine Zeiss à Iena pour tester l'appareil de projection de planétarium. Cette première coupole de type « coque » est achevée en 1923. Son ossature porteuse est le treillis Zeiss. Une troisième coupole sera réalisée par Dischinger pour le planétarium d'Iena en 1925-26. Le procédé Zeiss-Dywidag de construction des coques ouvre un nouveau chapitre dans la construction des toitures massives. Différents ingénieurs vont s'illustrer dans ce type d'ouvrages, tant en France qu'à l'étranger. Par exemple, aux Etats-Unis, Eero Saarinen construit l'auditorium Kresge en 1955 et le terminal TWA en 1956-62. (...)

• Les voiles double courbure

De toutes les formes que nous pouvons donner à une coque, la plus facile et la plus pratique à réaliser est celle d'un paraboloïde hyperbolique, appelé aussi « selle de cheval ». Sa paternité fait l'objet d'une âpre controverse. William Deitrick et Fred Severud construisent en 1953 à Raleigh, en Caroline du Nord, un stade-halle de foire sur les plans de Mathew Nowicki, considéré par certains comme l'inventeur de ces structures. De son côté, Bernard Lafaille publie ses premiers travaux en 1934, mais il n'a l'occasion de réaliser sa première selle de cheval qu'en 1955 pour couvrir la cathédrale de Royan. C'est finalement l'architecte espagnol Felix Candela qui en réalise le plus grand nombre. (...)

• Les résilles, nervures et pliages

Contrairement aux franchissements simples, les résilles et les structures plissées font participer l'ensemble de la surface porteuse à la résistance aux efforts. (...) La forme géométrique idéale peut être difficile à réaliser dans la pratique : les ondes des hangars d'Orly (Eugène Freyssinet, 1924) qui donnent l'aspect d'un voile plié, sont l'aboutissement d'un compromis entre la forme idéale et les difficultés d'un coffrage. Pour les hangars d'Orvieto (1935-40), Pier Luigi Nervi réalise des résilles planes et courbes en ferro-ciment qui forment une double série d'arcs se croisant à angle droit, ordonnés selon les plans à 45° par rapport à l'axe du hangar. De façon générale, les entreprises allemandes préfèrent poser leurs voiles minces sur des arcs ou des nervures. Le béton armé, qui se prête au coulage et à la réalisation de continuités entre les diverses membrures, sera le matériau privilégié de ces procédés constructifs.

• Les barrages en voûte mince

Pour des raisons qui tiennent au relief, une grande partie des barrages construits en France sont des barrages-voûtes, ce qui est exceptionnel, le nombre des barrages rigides dans le monde étant de 6 000 environ pour 30 000 barrages souples. Géométriquement, les barrages-voûtes se présentent comme des arcs calés sur les rives. Mécaniquement, ce sont des structures hyperstatiques, c'est-à-dire dont les diverses parties sont solidaires du fait de l'harmonisation des déformations élastiques respectives. Les plus anciens se trouvent en Iran et datent de la fin du XIII^e siècle. De petits ouvrages ont été construits au XVII^e siècle en Espagne et en Italie mais le premier barrage-voûte, calculé comme tel, a été dessiné et réalisé en France près d'Aix-en-Provence par François Zola, le père du romancier, en 1836.

(...) La forme « moderne » se dégage à Marèges sur la Dordogne (1935), premier barrage d'André Coyne qui deviendra le spécialiste du genre avec d'autres Européens comme l'Italien Semenza ou le Suisse Stucky.

• Les voussoirs

L'utilisation du voussoir préfabriqué, dont les premiers développements remontent aux années cinquante, a donné des ailes à la construction des ponts et des viaducs, en France et dans le monde. Ces cellules en béton présentent des caractéristiques d'adaptation étonnantes et sont, pour les ingénieurs, une source d'inspiration et d'innovation constante. L'histoire des premiers ouvrages reste marquée par quelques grandes dates qui se confondent avec celles du groupe Campenon Bernard, père fondateur du voussoir préfabriqué.

L'ancêtre du pont à éléments préfabriqués est signé Eugène Freyssinet. Il s'agit du pont de Luzancy (Seine-et-Marne), réalisé en 1948. Il faut attendre 1962 avec le Pont de Choisy-le-Roi pour voir émerger le premier pont à voussoirs. Cet ouvrage dont la paternité revient à Jean Muller et qui utilise exclusivement des voussoirs préfabriqués, entérine définitivement les principes et méthodes de construction. (...)

L'apogée de la technique est atteinte avec le pont de Saint-Cloud en 1972, et la procédé, désormais classique, s'étend dans le monde entier, entraînant de nombreuses innovations techniques dont témoignent des ouvrages aussi différents que le pont de San Antonio au Texas, ou le pont d'Arcins à Bordeaux.

L'art de l'ingénieur

Les structures légères, Forum haut

Un parcours dans l'exposition

•Quelques-uns des objets installés dans le Forum

Le Radôme de Richard Buckminster Fuller pour la Federal Aviation Authority installé à Benton, Pennsylvanie, en 1957 : Fuller vend à l'armée américaine une variante de son système de dôme géodésique breveté en 1954. La structure est constituée d'éléments en forme de losange qui sont liés entre eux par des noeuds hexagonaux et pentagonaux. Les panneaux sont en polyester et en fibre de verre renforcée.

Le REP, type D de Robert Esnault-Pelterie, 1910 : La structure originale de cet avion monoplane est présentée ici, comme au Musée de l'Air, complètement désentoilée. Mise à nue, la structure de l'appareil montre le sens inné de la résistance des matériaux chez les concepteurs de tels engins volants. Toutes les mêmes préoccupations se retrouvent dans les recherches poursuivies par ceux, ingénieurs, architectes et autres inventeurs qui, depuis le début du siècle ont fait de la légèreté des structures de grandes dimensions l'objectif majeur.

Travées du Pavillon du Centenaire de l'Aluminium de Jean Prouvé, avec Michel Hugonet, 1954 : La toiture du pavillon est une structure légère, inspirée de celle d'une aile d'avion. Les trois travées originales exposées ici font partie du pavillon démontable installé sur les quais de la Seine en 1954. La surface de cette aile géante était alors de 2 250 m², pour 170 mètres de long.

•Les structures déployables

L'architecte espagnol Emilio Pérez Piñero a ouvert la voie dans le domaine des structures déployables en proposant un théâtre ambulant dont la couverture était pliable. Pliée, elle occupait un volume minimal et pouvait être transportée aisément. Sur le site, un mécanisme permettait de la déployer pour constituer une couverture de grande portée. (...)

•Les structures tendues

Comment construire des structures légères de grande portée qui puissent résister simultanément aux effets descendants (comme la neige) et à ceux ascendants (du vent)? Deux types de solutions ont été trouvées. L'une est fondée sur le principe des roues de bicyclette : les rayons sont tendus entre la jante et le moyeu. Particulièrement performant, ce principe est appliqué notamment par Le Ricolais avec sa roue à moyeux multiples. L'autre solution repose sur l'association de deux ensembles de câbles de forme courbe. (...). Lafaille et Sarger introduisent l'association des câbles sous la forme d'un réseau à double courbure inverse. (...)

Un nouveau pas décisif a été franchi par Frei Otto, avec des résilles de câbles à double courbure inverse qui sont maintenues attachées à des têtes de mats, à des cerces, à des opercules et à des câbles de rive. Le filet présenté dans l'exposition en est un exemple typique.

•Les structures autotendantes

Parmi les rêves que poursuivaient Buckminster Fuller, il lui en était un qui lui tenait particulièrement à coeur : comment "avoir des flots de compression dans un océan de traction" ? C'est le jeune sculpteur Kenneth Snelson qui lui offre, en 1948, la réponse en développant progressivement un nouveau système structural qui suscite surprise et fascination. Dans ce système, des tubes sans aucun contact mutuel sont maintenus en suspension par un réseau arachnéen de câbles. Fuller s'empare de l'idée et invente un nouveau mot "tensegrity" qui est la contraction des mots "tensional" et "integrity". Des brevets sont déposés quasi simultanément, aux Etats-Unis et en France par David Georges Emmerich, qui utilise le mot "autodendant" (...)

Longtemps considérés comme des oeuvres d'art et non des ouvrages, ces systèmes ont été délaissés par les ingénieurs. Ils ont maintenant livré leurs secrets mécaniques et suscitent à nouveau l'intérêt des constructeurs.

•Les structures hybrides

De multiples facteurs bouleversent la pensée structurale dans les quarante dernières années de ce XX siècle. La production de nouveaux matériaux composites, souples et rigides, d'acier à hautes performances, conduit les concepteurs à envisager de nouvelles solutions caractérisées par la liberté formelle et la transparence. (...)

Les domaines de compétences requises pour élaborer de nouvelles structures sont multiples : géométrie, mécanique, informatique, technologie. Horst Berger, Frei Otto et Peter Rice emploient l'ensemble des outils à leur disposition. Ils animent des équipes et suscitent les recherches qui vont peu à peu composer l'éventail des solutions technologiques en termes d'attaches des résilles et des membranes.

•Les structures gonflables

L'origine des systèmes gonflables peut être trouvée dans des domaines intendus : on connaît par exemple les outres de peaux gonflées d'air et utilisées par les nageurs romains pour franchir de longues distances. Plus près de nous, les ballons dirigeables sont un exemple de réalisation qui reprend le principe des ballons de notre enfance. Les premières réalisations de membranes textiles gonflables sont exemplaires. Parmi elles, on citera le radôme de Pleumeur-Bodou.

On trouve des exemples récents tout à fait originaux : c'est le cas de certains pavillons réalisés pour l'Exposition universelle de 1970 à Osaka, tel le pavillon Fuji ou le pavillon des Etats-Unis. C'est aussi le cas de la couverture des arènes de Nîmes, qui présente en outre l'intérêt de pouvoir être montée pour la saison d'hiver et démontée pendant la période estivale.

•Les structures spatiales

Les structures spatiales ou tridimensionnelles ont bénéficié de la conjonction de plusieurs facteurs : la nécessité de couvrir de grands espaces sans points d'appui intermédiaires pour abriter des avions dont la taille augmentait, le souci d'utiliser toutes les ressources de la préfabrication en usine, le développement de nouvelles méthodes de calcul. Si Graham Bell fait figure de précurseur, nombreux sont les ingénieurs qui les étudient depuis le début des années soixante.(...)

La légèreté est le fruit d'une conception qui permet d'utiliser la matière dans les meilleures conditions, c'est-à-dire en compression ou en traction simple. Les formes réalisées sont variées : grilles planes, voûtes cylindriques, coupes et toutes formes dérivées. (...). Délaissant la chimère d'un noeud universel qui pourrait résoudre tous les problèmes, les ingénieurs ont développé des dizaines de systèmes, dont certains se sont imposés en raison de leur aptitude à répondre à de nombreux critères, tant économiques que techniques.

L'art de l'ingénieur

L'Actualité des ingénieurs, Forum Bas (Galerie 27)

Un parcours dans l'exposition

• Le calcul, antécédents

Ce que cherche un ingénieur, lorsqu'il calcule, c'est à justifier ou à dimensionner un objet qu'il conçoit. Les physiciens ont laissé à l'ingénieur de merveilleuses théories générales qui lui permettent de poser à coup sûr les équations de son problème. Malheureusement, elles sont trop souvent complexes à résoudre, car elles relèvent du calcul intégral. Pour trouver une solution, il faut les simplifier. En général, on les réduit à des problèmes filaires : ainsi les problèmes d'hydraulique sont ramenés à des tuyauteries, les structures sont modélisées avec des poutres et des barres. Des traités présentaient ces méthodes de simplification et de résolution de problèmes types. En outre, le calcul pouvait être simplifié par l'utilisation des tables et d'abaques, qui synthétisaient des résultats déjà effectués, et par l'utilisation de la règle à calcul et plus tard des calculateurs mécaniques. (...)

La règle à calcul, inventée au XVII^e siècle, et très utilisée à partir du XIX^e siècle, est restée pendant des décennies le symbole de l'ingénieur. Elle permet d'effectuer facilement des opérations, avec une précision certes limitée, mais généralement suffisante dans la plupart des domaines techniques. C'est à l'aide de la règle coulissante et avec une mesure directe que l'on réalise l'addition. Le calcul des multiplications, exposants, racines carrées se fonde sur l'utilisation d'échelles logarithmiques. Les logarithmes ont été inventés par Napier (Neper) au début du XVII^e siècle et ont été d'abord utilisés par les astronomes. Ils sont un moyen de simplification considérable du calcul. En effet, l'utilisation de ces tables permet de ramener les multiplications à des additions, le calcul des puissances à des multiplications et l'extraction des racines carrées à une division par deux.

• L'outil informatique

Le cadre de travail de l'ingénieur, jadis très rudimentaire et principalement mental, s'est considérablement transformé et élargi avec l'irruption de l'ordinateur. (...)

La conception assistée par ordinateur a modifié profondément la façon de concevoir des objets techniques. Le logiciel est devenu « convivial » : le processus de calcul, rejeté dans les tréfonds du microprocesseur, est devenu opaque et le concepteur peut maintenant manipuler directement l'objet affiché à l'écran. Le réalisme et l'extrême finesse des modèles informatiques le font ainsi s'apparenter de plus en plus à une expérience virtuelle. L'attitude des ingénieurs devient plus expérimentale, se rapprochant de celles de créateurs comme Frei Otto ou Antonio Gaudi. Les modèles informatiques sont même parfois plus riches et plus sensibles qu'une expérience en laboratoire. En effet, l'ordinateur permet de déformer à outrance les objets virtuels en les amenant jusqu'à la rupture. Surtout, il permet d'avoir accès à certains détails de leur structure interne, tels le niveau des contraintes mécaniques ou le champ des températures à l'intérieur d'un solide. Mais cette formidable augmentation de la puissance de calcul a aussi un revers : le risque, à terme, que les ingénieurs se dispensent de l'analyse physique des phénomènes. Les logiciels de calcul n'utilisent

finalement que des équations fondamentales, or, avant l'avènement de l'ordinateur, les ingénieurs avaient inventé de nombreux concepts intermédiaires pour rendre leurs analyses possibles. L'informatique ne doit pas pour autant devenir le seul outil d'analyse de l'ingénieur.

• Les tunnels

Avec le développement du trafic automobile au XX siècle, les tunnels se caractérisent par une plus grande section, pour plusieurs voies de circulation. (...) Les innovations les plus importantes s'appliquent surtout aux engins de forage, avec l'apparition des micro-tunneliers japonais, dirigés depuis la surface et guidés par laser. En 1988, le tunnel de Seikan, reliant les îles de Hokkaido et de Honshu a été mis en service : il dépasse en longueur le tunnel sous la Manche. La construction de ce dernier a bénéficié de nouvelles techniques, dont celle de l'engin tunnelier, mesurant plus de 100 mètres de longueur. Ce dispositif fore, extrait la terre et pose les voussoirs en béton, produits par un gigantesque chantier de préfabrication installé en surface.

• Les plates-formes offshore

Les deux grandes catégories de plates-formes offshore se distinguent aujourd'hui par la nature de leurs fondations : supports gravitaires ou supports en treillis acier tubulaires. Le principe des supports gravitaires a fait le succès des plates-formes en béton. Parmi les 20 000 plates-formes existantes, une petite trentaine seulement est en béton. La plate-forme Hibernia, fabriquée et installée au Canada, a été conçue pour résister aux chocs des blocs de glace. Les supports en treillis acier tubulaires sont issus des superstructures simples, supportées par des piles sans contreventement dans des zones calmes. (...) Certaines plates-formes peuvent atteindre 400 mètres de hauteur et peser 45 000 tonnes.

• Les barrages

On distingue aujourd'hui deux grandes familles de barrages. Les barrages souples, c'est-à-dire en remblai, sont les plus nombreux : on en compte environ 30 000 dans le monde. Celui d'Aoulouz (Maroc, 1990) est en béton compacté au rouleau. Ce matériau nécessite un dosage en ciment inférieur à celui du béton traditionnel et permet un gain de temps considérable. (...) Le deuxième type est celui des barrages rigides, aujourd'hui en béton : on en dénombre environ 6 000. (...)

• Les tours de transmission

L'idée d'Eiffel - concevoir une structure de grande hauteur sous la forme d'une console verticale - constitue un précédent de première importance pour la construction des tours de transmission au XX siècle. Les tours construites ultérieurement dans le seul but de servir de relais de transmission, par exemple celle de Berlin (1926), seront conçues à l'image de la tour Eiffel. La tour radio Chabolovka à Moscou (1919-22), conçue par Choukhov proposera une innovation, avec le principe d'une structure conique en treillis, atteignant une hauteur de 150 mètres. Dans les années cinquante, la conception des tours de transmission connaît une période de grande expérimentation, le béton s'attirant la faveur des concepteurs pour des raisons d'esthétique, mais aussi de résistance, de durée de vie et d'entretien. La première tour de transmission construite en béton est la tour de télévision de Stuttgart (1954) de Fritz Leonhardt. (...) La plus spectaculaire est la tour Ostankino à Moscou (1959-67) : elle était encore récemment, avec ses

536 mètres, le plus haut édifice au monde. La tour de télécommunication de Barcelone (Ove Arup & Partners, ingénieurs ; Norman Foster & Partners, architectes, 1988-92) marque un nouveau départ dans la conception des tours de transmission.

• Les tours habitables

Les gratte-ciel des années cinquante adoptent des solutions structurelles dictées par la nouvelle demande pour des espaces intérieurs sans pilier ni cloisonnement. Dans les années soixante, Fazlur R. Khan et Myron Goldsmith développent le principe du tube creux : des murs extérieurs continus d'une grande intégrité structurelle, se comportant comme une console rigide face aux efforts dûs au vent. La première structure en tube creux conçue par Khan est l'immeuble Chesnut-DeWitt (Chicago, 1965) à ossature en béton. Cette réalisation est suivie des deux tours du World Trade Center (Leslie E. Robertson, New York, 1973). (...) Les immeubles construits récemment, qui atteignent des hauteurs extrêmes, reposent sur un large éventail d'expérimentations structurelles. La tour de la Bank of China (Hong-Kong, 1990), conçue pour résister à des efforts d'une intensité extraordinaire, qu'ils soient sismiques ou dûs au vent, utilise une ossature tridimensionnelle soutenue par des piliers massifs logés dans les angles. Dans le projet de la Tour sans fin (Paris-La Défense, 1989), formée d'un tube percé composé de deux demi-cylindres en béton, la rigidité est apportée par des contreventements d'une hauteur de douze étages.

• Les ponts suspendus

En 1940, le pont suspendu de Tacoma aux Etats-Unis, conçu par Leon Moiseiff, s'effondre. Cette catastrophe a permis de mieux cerner le comportement aéro-élastique des ponts à câbles, de démontrer l'insuffisance des calculs statiques et d'augmenter progressivement leur élancement longitudinal. Les recherches qui ont suivies ont permis l'élaboration de trois types, aujourd'hui regroupées dans deux tendances dominantes, l'école américaine et l'école européenne. (...) L'école européenne est caractérisée par un tablier aérodynamique de Freeman Fox & Partners, profilé comme une aile d'avion, et qui a suivi les recherches de Fritz Leonhardt (projet de pont sur le Tage, 1959). Il sera utilisé pour la première fois en 1966 pour le pont sur la Severn en Angleterre (988 mètres), et tout récemment pour le pont du Grand Belt, de 1 600 mètres de portée, au Danemark (en cours de réalisation, achèvement prévu en 1998). Le nouveau record du monde reviendra bientôt au Japon (1997) avec le pont du détroit d'Akashi, d'une portée de 1 900 mètres, qui adopte une solution en treillis. Des portées encore plus grandes ont été envisagées pour le détroit de Messine en Italie, et pour le détroit de Gibraltar. Elles atteindraient 3 500 mètres. Si ces ouvrages sont un jour construits, des fibres de carbone pourraient remplacer les câbles en acier, afin d'alléger le poids de l'ensemble.

• Les ponts haubanés

Quelques ingénieurs ont imaginé des structures haubanées dès le XVII siècle mais il faut attendre 1920 pour que soient construits, par E. Torroja, un véritable pont à haubans : l'aqueduc de Tampul. Les publications de l'ingénieur F. Dischinger, en 1938 et 1949, définissent des solutions plus rationnelles. Toujours en Allemagne, vers 1950, les ponts à haubans vont trouver leur plein développement, sous l'influence notamment de F. Leonhardt, avec les trois ponts de Düsseldorf. (...) Une deuxième génération apparaît, caractérisée par des haubans plus nombreux, et mieux répartis sur toute la longueur du tablier. (...)

Ces dernières années, l'évolution s'est accélérée. Le pont de Normandie constitue un bond en avant, il est le premier pont à haubans à entrer dans le domaine des très grandes portées, réservé jusque-là aux ponts suspendus. On voit également l'émergence d'une nouvelle solution structurelle : les ponts à haubans à travées multiples. Ce sera probablement un domaine de développement prometteur.

• La maîtrise de l'environnement intérieur

Le principe d'une architecture adaptée aux conditions climatiques n'est pas nouveau.

Nombre d'exemples d'architectures vernaculaires témoignent de l'importance et de la vitalité de cette pensée. Depuis quelques années, la quête d'économies d'énergie toujours plus importante et la recherche d'un confort intérieur mieux adapté aux exigences des usagers ont conduit ingénieurs et architectes à développer des projets fondés sur l'idée d'une architecture dite bioclimatique. (...)

Depuis quelques années, la puissance du calcul par ordinateur a permis de représenter par des maquettes informatiques les mouvements d'air, et de minimiser les pertes d'énergie. Un autre axe de recherche porte actuellement sur l'étude de nouveaux systèmes de façades, comme par exemple la création d'une double peau autour d'un édifice entièrement vitré, pour constituer une couche d'air isolante et mieux maîtriser la ventilation naturelle. (...) Le but de ces recherches est d'aboutir à un principe de "fenêtre intelligente" contrôlant à la fois la luminosité et la température des pièces, tout en minimisant les coûts de chauffage et de climatisation.

Les recherches structurales de Buckminster Fuller eurent pour objectif la conception de couvertures toujours plus légères et plus élancées, mais aussi de ménager des espaces protégés pour le bien de tous, et de recréer un environnement parfaitement maîtrisé. En 1960, l'Américain envisage de couvrir une partie de l'île de Manhattan par un dôme géodésique de 3,6 km. (...). C'est aussi à cette époque que Frei Otto combine économies de matière et d'énergie.

Cette culture d'une technique protectrice et respectueuse de son environnement trouve aujourd'hui dans certains projets et réalisations un écho des plus favorables. L'équipe de Renzo Piano et de Peter Rice imagine pour le pavillon itinérant IBM une voûte transparente démontable, dans laquelle lumière, température et ventilation font l'objet d'une étude poussée. (...). La toiture de l'aéroport de Kansai trouve son profil incurvé dans une étude sur une répartition optimale de l'air pulsé. Le rôle des ingénieurs chargés d'étudier les fluides prend dans certains projets une dimension majeure, leurs analyses guidant les logiques de conception. (...)

• Les cultures constructives aujourd'hui

Dès les années soixante, certains architectes et ingénieurs vont chercher à redéfinir l'usage des matériaux traditionnels de la construction, comme le bois, la brique ou l'acier. C'est dans des personnalités comme l'Uruguayen Eladio Dieste ou l'Allemand Frei Otto que ces travaux trouvent leur origine. Le premier, par un principe de terre cuite armée, parvient à couvrir de grands espaces au moyen de coques, constituées d'une double épaisseur de briques. Frei Otto, poussé par l'étude des structures naturelles développe avec d'autres des méthodes d'optimisation des matériaux. Il réalise ainsi avec Edmund Happold et Ove Arup la Halle de Mannheim (1971), dont la couverture est faite d'un treillis en bois léger, atteignant 80 mètres de portée. (...)

L'augmentation de la puissance du calcul informatique permet à présent de créer des maquettes virtuelles pouvant subir toutes sortes d'expérimentations. Ces recherches conduisent à un allègement des

structures de plus en plus important. La charpente de la future aérogare de Roissy ou encore les résilles de la médiathèque de Sendai illustrent la diversité de ces recherches.

• **Les nouveaux produits verriers**

L'invention du verre date de l'Antiquité, mais les évolutions les plus significatives sont apparues depuis que la société Pilkington a mis au point, vers 1960, le procédé de production du verre plat par coulée continue. La nécessité d'avoir une isolation thermique toujours plus performante a conduit les chercheurs à développer successivement le double vitrage avec lame d'air déshydratée, puis la technologie des dépôts d'oxyde métalliques en très faible épaisseur sur la surface du verre. (...) Si l'isolation thermique renforcée a permis de concevoir de grandes surfaces vitrées, une protection solaire efficace en est le corollaire. (...) En vue de répondre à des besoins particuliers, des recherches sur la composition du vitrage, des traitements de masse ou de surface, ont permis de développer des verres très spécifiques résistants au choc thermique ou au feu, chauffants, décoratifs, ayant une transmission sélective selon l'angle d'incidence, présentant un affaiblissement acoustique amélioré ou une résistance mécanique supérieure.

L'art de l'ingénieur

Constructeur, entrepreneur, inventeur

Légendes des photographies disponibles pour la presse :

L'art de l'ingénieur : Le fer Galerie Nord

1-Pont de Coalbrookdale sur la rivière Severn, 1775-1779

Premier pont en fonte de fer

Abraham Darby III et John Wilkinson, ingénieurs

Thomas Farnolls Pritchards, architectes

Huile sur toile de William Williams, 1780

Mention obligatoire : The Ironbridge Gorge Museum, Telford, Grande Bretagne

2-Le Britannia Tubular Bridge sur la détroit de Menai, Pays de Galles, 1846-1850

Premier pont à caisson en fer puddlé pour le chemin de fer

Robert Stephenson, ingénieur

Lithographie rehaussée à l'aquarelle de G. Hawkins

Mention obligatoire : The Ironbridge Gorge Museum, Telford, Grande Bretagne

3-Pont de Brooklyn (East River bridge) entre New York et Brooklyn, 1869-1882

Pont suspendu

John A. Roebling et Washington A. Roebling, assistés par Emily Warren Roebling

Photographie : Irving Underhill

Mention obligatoire : Rensselaer polytechnic Institute, Troy, New York

4-5-Pont sur le Firth of Forth près d'Edimbourg, Ecosse, 1888

Pont cantilever en acier

Benjamin Baker et John Fowler, ingénieurs

Photographies : Evelyn Carey

Mention obligatoire : National Library of Scotland, Edimbourg, Ecosse

6-Pont Alexandre III sur la Seine, Paris, 1896-1900

Vue du pont roulant de montage et arc en acier de construction d'après l'Album de photographies de chantier "Travaux du Pont Alexandre III : 1897-1900"

Louis-Jean Victor, Aimé Résal et Amédée Alby, ingénieurs

Mention obligatoire : Mairie de Paris, Direction de la voirie

7-Pont de Bayonne (dit Kill van Kull) entre Bayonne, New Jersey et Port Richmond, Staten Island, New York, 1927-1930

Grand pont américain en arc en acier des années 30

Othmar H. Ammann, ingénieur

Mention obligatoire : Port Authority of New York and New Jersey, New York

8-Pont du Golden Gate, San Francisco Bay, Californie, 1933-1937

Grand pont suspendu américain, vue de la pose des cables

Joseph B. Strauss et Charles Ellis, ingénieurs

Mention obligatoire : Archives, Golden Gate Bridge Highway and Transportation District, San Francisco

9-Palm House, Kew Gardens, Surrey, 1844-1848

L'une des premières serres à structure métallique : le fer au service du verre

Richard Turner et Decimus Burton, ingénieurs-concepteurs

Mention obligatoire : Royal Botanic gardens, Kew, Surrey,,Angleterre

10-Le Crystal Palace, Hyde Park, Londres, 1838

Vue extérieure de la façade principale de ce chef-d'oeuvre de la préfabrication

Joseph Paxton, concepteur-architecte

Fox Hendersons, constructeur

Peinture sur verre, anonyme

Mention obligatoire : Madame Françoise Jollant-Kneebone, Paris

11-Gare de Paddington, Londres, 1838

Shed en construction

Isambard Kingdom Brunel, ingénieur

Mention obligatoire : National Railway Museum/ Science Museum, Science & Society

Picture Library, Londres

12-La Tour de 300 mètres (Tour Eiffel), 1887-1889

Chef-d'oeuvre des ingénieurs Gustave Eiffel, Maurice Koechlin et Emile Nougier

Stephen Sauvestre, architecte

La tour en construction

Photographie de Blanchard

Mention obligatoire : Bibliothèque Historique de la Ville de Paris

13-La Tour de Radio Moscou (Sabolovka), 1919

La légèreté de la construction en acier

Vladimir Choukhov, ingénieur

Vue de la tour complète

Mention obligatoire : Musée des recherches d'Architecture Schtchoussev, Moscou

14-15-Empire State Building, New York, 1929-1931

Gratte-ciel américain à l'heure des records de hauteur (378 m)

Gunvald Aus , ingénieur

Cass Gilbert, architecte

Photographie : Lewis Hine/ E.S.B. Progress Photos "A Break fromWork"

Mention obligatoire : Avery Library, Columbia University, New York

L'art de l'ingénieur : Le béton armé

Galerie Sud

- 1-F. Coignet : Aqueduc de la Vanne, 1869
Vallée de l'Yonne, près de Pont-sur-Yonne
Mention obligatoire : S.A. Coignet, Paris
- 2-J. Monier : Passerelle pour l'Exposition industrielle
d'Allemagne du nord, 1890, Brême.
Mention obligatoire : Archives d'Etat de Brême, Allemagne
- 3-Mouchel : Royal Liver Building, 1908-1909, Liverpool
Mention obligatoire : Mouchel Londres
- 4-Edison : Système Edison, maison moulée, 1912-1913,
Etats Unis et Saint-Denis
Photographie : Roger Viollet
©: Roger Viollet, Paris
- 5-Max Berg : Halle de Breslau, 1911-1913, Wroclaw, Allemagne
Mention obligatoire : Bibliothèque Universitaire de Breslau, Allemagne
©: DR
- 6-Eugène Freyssinet : Pont de Tonneins sur la Garonne, 1921-1922
Tonneins, France
Mention obligatoire : DDE Tonneins, France
©: DR
- 7-Eugène Freyssinet : Pont Albert Louppe sur l'Elorn, Plougastel, 1924-1930, France
Mention obligatoire : Collection particulière
©: DR
- 8-Eugène Freyssinet : Pont Albert Louppe sur l'Elorn, Plougastel, 1924-1930, France
Mention obligatoire : Collection particulière
©: DR
- 9-Robert Maillard : Pont sur le Schwandbach, 1933, Suisse
Mention obligatoire : Collection particulière
©: DR
- 10-Albert Caquot : Pont du Sautet (Chute du Sautet), 1927-1928, France
Mention obligatoire : Archives de l'Institut français d'architecture, Fonds Considère,
Paris
©: DR
- 11- Albert Caquot : Pont du Sautet (Chute du Sautet), 1927-1928, France
Mention obligatoire : Archives de l'Institut français d'architecture, Fonds Considère,
Paris
©: DR
- 12-Ricardo Morandi : Viaduc sur le torrent Fiumarella, Catanzaro, 1958-1962, Italie
Mention obligatoire : Archives Morandi, Rome

13–Jean Muller : Pont d'Oléron, 1964–1966, France
Photographie : Roger Viollet
©: Roger Viollet, Paris

14–Robert maillard : Halle du ciment, 1938–1939, Exposition nationale suisse, Zurich
Mention obligatoire : Bibliothèque de l'ETH, Zurich
©: DR

15–Eugène Freyssinet : Halle de la gare de Reims, 1927–1930, France
Mention obligatoire : Caisse nationale des monuments historiques et des sites, Paris
©: Deneux/Archi. Photo. Paris/Spadem

16–Nicolas Esquillan : Hangard d'avion de Marignane, 1949–1952, France
Mention obligatoire : Archives de l'Institut français d'architecture, Fonds Boussiron,
Paris
©: DR

17–Nicolas Esquillan : Hangard d'avion de Marignane, 1949–1952, France
Mention obligatoire : Bernard Marrey, Paris
©: DR

18–Nicolas Esquillan : Hangard d'avion de Marignane, 1949–1952, France
Mention obligatoire : Archives de l'Institut français d'architecture, Fonds Boussiron,
Paris
©: DR

19–Nicolas Esquillan : Hangard d'avion de Marignane, 1949–1952, France
Mention obligatoire : Bernard Marrey, Paris
©: DR

20–Nicolas Esquillan : Hangard d'avion de Marignane, 1949–1952, France
Mention obligatoire : Bernard Marrey, Paris
©: DR

21–Felix Candela : Chapelle San José Obrero, 1959, Monterrey, Mexico
Mention obligatoire : Avery Library, Colombia University, New York
©: DR

22–Felix Candela : Chapelle ouverte de Lomas, 1958–1959, Cuernavaca, Mexico
Mention obligatoire : Institut Juan de Herrera
©: DR

23–Felix Candela : Chapelle ouverte de Lomas, 1958–1959, Cuernavaca, Mexico
Mention obligatoire : Institut Juan de Herrera
©: DR

24–Felix Candela : Chapelle de Saint Vincent de Paul, 1957–1960, Coyoacan
Mention obligatoire : Institut Juan de Herrera
©: DR

25–Pier Luigi Nervi : Stade Municipal de Florence, 1929–1932, Italie
Photographie : Giorgio Vasari
Mention obligatoire : Archives de Parme, Italie

26- Eugène Freyssinet : Hangars à dirigeables d'Orly, 1921-1924, France
Photographie : Frederic Gadner
Mention obligatoire : Musée Albert Kahn

27- Eugène Freyssinet : Hangars à dirigeables d'Orly, 1921-1924, France
Photographie : Frederic Gadner
Mention obligatoire : Musée Albert Kahn

28- Eugène Freyssinet : Hangars à dirigeables d'Orly, 1921-1924, France
Mention obligatoire : Collection particulière
©: DR

29- Coyne et Bellier : Barrage du Vouglans sur l'Ain, 1957-1968, France
Mention obligatoire : Photothèque EDF
©: DR

30- Coyne et Bellier : Barrage de Daniel Johnson sur la Manicouagan, 1959-1968,
Canada
Mention obligatoire : Coyne et Bellier
©: DR

31- Coyne et Bellier : Barrage de Daniel Johnson sur la Manicouagan, 1959-1968,
Canada
Mention obligatoire : Coyne et Bellier
©: DR

32- Coyne et Bellier : Barrage de Daniel Johnson sur la Manicouagan, 1959-1968,
Canada
Mention obligatoire : Coyne et Bellier
©: DR

33- Coyne et Bellier : Barrage de Kariba sur le Zambeze, 1959, Zambie
Mention obligatoire : Coyne et Bellier
©: DR

L'art de l'ingénieur : Actualité des ingénieurs

Forum bas

1-Honshu Shikoku Bridge Authority : Pont de l'Akashi Kaikyo, 1990-1998, Japon
Mention obligatoire : Honshu Shikoku Bridge Authority
©: DR

2- Honshu Shikoku Bridge Authority : Pont de l'Akashi Kaikyo, 1990-1998, Japon
Mention obligatoire : Honshu Shikoku Bridge Authority
©: DR

3-Cowi Consult Ing. : Pont du Grand Belt, achèvement prévu pour 1998
Mention obligatoire : Storebaelt
Photographie : Jan Kofod Winther
©: DR

4-Michel Virlogeux : Pont de Normandie, 1988-1995, Le Havre, Seine-Maritime, France
©: Magnum, photographe : Jean Gaumy

5-Leslie Robertson ingénieur, I.M. Pei architecte : Bank of China Tower, Hong-Kong, 1989
Source : John Nye
©: DR

6-Ove Arup and Partners ing., Sir Norman Foster, architecte : Tour de Télécommunication, Barcelone, Espagne, 1992
Mention obligatoire : Photothèque Ove Arup and Partners

7-Ove Arup and Partners (Tom Barker) ing., Renzo Piano & Nori Okabe, architectes :
Aéroport de Kansai, Japon, 1991-1996
Mention obligatoire : Photothèque Ove Arup and Partners

8- Ove Arup and Partners (Tom Barker) ing., Renzo Piano & Nori Okabe, architectes :
Aéroport de Kansai, Japon, 1991-1996
Mention obligatoire : Photothèque Ove Arup and Partners

9- Ove Arup and Partners (Tom Barker) ing., Renzo Piano & Nori Okabe, architectes :
Aéroport de Kansai, Japon, 1991-1996
Mention obligatoire : Photothèque Ove Arup and Partners
©: Osamu Murai

10- Ove Arup and Partners & Anthony Hunt and Associates, ing., Nicholas Grimshaw & Partners, architects : Eden Project, 1995, Cornouailles, Grande Bretagne
Source : Michael Dyer Assoc. Ltd
©: DR

11-Eladio Dieste, ing. : Eglise d'Atlantida, 1958, Paraguay
Mention obligatoire : Instituto de Historia de Arquitectura/Facultad de Arquitectura
Montevideo, Uruguay
©: DR

12- Eladio Dieste, ing. : Eglise d'Atlantida, 1958, Paraguay
Mention obligatoire : Instituto de Historia de Arquitectura/Facultad de Arquitectura
Montevideo, Uruguay

13-Shigeru Ban, ing. ; The Design Joint Venture Group, architects : Piste de skate de
Nagano, Japon, 1996
Source : Kajima corporation
©: DR

14- Shigeru Ban, ing. ; The Design Joint Venture Group, architects : Piste de skate de
Nagano, Japon, 1996
Source : Kajima corporation
©: DR

15-Schlaich, Bergermann und Partner : Lentille solaire, 1985
Source : Schlaich, Bergermann und Partner
©: DR

L'art de l'ingénieur : Les structures légères Forum

- 1- Fred Severud: State fair Arena, halle de Raleigh, 1953
W. Deitrick et Matthew Nowicki, architectes
Photographies : Université de Raleigh
©: DR
- 2-Stéphane du Chateau : Piscine du Stade français, 1961-1962
©: DR
- 3-Frank Newby & Samuely : la volière du Zoo de Londres, 1965
architecte : Cedric Price
Photographie : Samuely
©: DR
- 4- Frank Newby & Samuely : la volière du Zoo de Londres, 1965
architecte : Cedric Price
Photographie : Samuely
©: DR
- 5-Frei Otto : Pavillon allemand à l'Exposition Universelle de Montréal, 1967
©: DR
- 6-Frei Otto : Institut of lightweight Structures, 1966
©: DR
- 7- Frei Otto : Institut of lightweight Structures, 1966
©: DR
- 8- Mamoru Kawaguchi : Pavillon Fuji à l'Exposition Universelle d'Osaka, 1970
Yutaka Murata, architecte
Mention obligatoire : Taiyokogyo corporation
©: DR
- 9-Mamoru Kawaguchi : Pavillon Fuji à l'Exposition Universelle d'Osaka, 1970
Yutaka Murata, architecte
Mention obligatoire : Taiyokogyo corporation
©: DR
- 10-Nikken Sekkei/Takenaka Corporation : Tokyo "Big Egg" Dome, Japon, 1988
Mention obligatoire : Taiyokogyo corporation
©: DR
- 11-Magi Dome
Mention obligatoire : Taiyokogyo corporation
©: DR
- 12-Masao Satoh/Kajima Design (Shigeru Ban) : Izumo Dome Stadium
Mention obligatoire : Taiyokogyo corporation
©: DR
- 13-Matthys Levy & Weidlinger Associates : le stade Georgia Dome, Atlanta, 1992
Photographie : Matthys Levy
©: DR

14-Buckminster Fuller : Voiture Dymaxion, 1934
Mention obligatoire : National Automobile Museum, Reno, USA

L'art de l'ingénieur

Générique de l'exposition

Commissariat et Scénographie :

Raymond Guidot et Alain Guiheux, Paris
José A. Fernandez Ordonez, Madrid

Coordination de l'exposition :

Marthe Ridart

Chargés de recherche :

Concetta Collura : Le Béton
Caroline Maniaque : Les Structures tridimensionnelles
Rémi Rouyer : L'Actualité des ingénieurs
Barbara Shapiro-Comte : Le Fer

Architectes d'opérations :

Michel Antonietti et Nathalie Crinière

Comité scientifique :

Bill Addis, Gerhard Auer, Gwenaél Delhumeau, Bernard Marrey, René Moltro,
Frank Newby, Frei Otto, Antoine Picon, Cyrille Simonnet, Guillermo Wieland.

Dictionnaire des ingénieurs :

Publication réalisée sous la direction d'Antoine Picon, coéditée par
les Editions du Centre Georges Pompidou et les Editions Le Moniteur

Réalisations audiovisuelles :

Bernard Clair-Renaud et Georges Meguerditchian

Installations audiovisuelles :

Harouth Bezdjian

Programmation cinéma :

Odile Vaillant

Informations pratiques

Tarif d'entrée de l'exposition : 45 frs

Tarif réduit : 30 frs

Forfait spécial : L'art de l'ingénieur + L'Atelier Brancusi + Made in France : 55 frs

Horaires du Centre Georges Pompidou

Du lundi au vendredi : 12h00-22h00 ; samedi et dimanche : 10h00-22h00

Fermé le mardi

Accès : L'entrée du Centre Georges Pompidou se fait uniquement par la Piazza.

Métros : Châtelet, Les Halles, Rambuteau, Hôtel de Ville

Réservation possible à partir du 15 avril 1997 pour les manifestations de l'été sur 3615 Beaubourg (1,29 frs ttc la minute)

Direction de la communication

Attachée de presse : Emmanuelle Toubiana

Tél. : 01 44 78 49 87 / Fax : 01 44 78 13 02

Editions du Centre Georges Pompidou

Attachée de presse : Danièle Alers

Tél. : 01 44 78 41 27 / Fax : 01 44 78 12 05

Pour toute information complémentaire :

3615 Beaubourg

Sur Internet : <http://www.cnac-gp.fr>

Les principales expositions au Centre Georges Pompidou

Fernand Léger-exposition rétrospective

29 mai-29 septembre 1997, Grande Galerie, Etage 5

Kisho Kurokawa, architecte

Le Métabolisme, 1960-1975

18 juin-29 septembre 1997, Salle architecture, Musée, Etage 3

Jean-Jacques Rullier

18 juin-4 août 1997, Galerie d'art graphique

Les péchés capitaux : La luxure

9 juillet-4 août 1997, Galerie du Musée, Etage 4

Didier Trenet

20 août-29 septembre 1997, Galerie d'art graphique

Les péchés capitaux : L'orgueil

20 août-29 septembre 1997

Bruce Nauman

10 décembre 1997-9 mars 1998

Important

Nous rappelons qu'à partir du 30 septembre 1997, le Centre Georges Pompidou sera partiellement fermé au public. Certains espaces resteront néanmoins ouverts : la galerie sud, entre autres, qui présentera l'exposition Bruce Nauman à partir de la mi-décembre 1997. Une conférence de presse organisée mi-septembre 1997 donnera toutes les informations relatives à la programmation générale du Centre Georges Pompidou jusqu'à sa réouverture complète fin 1999.