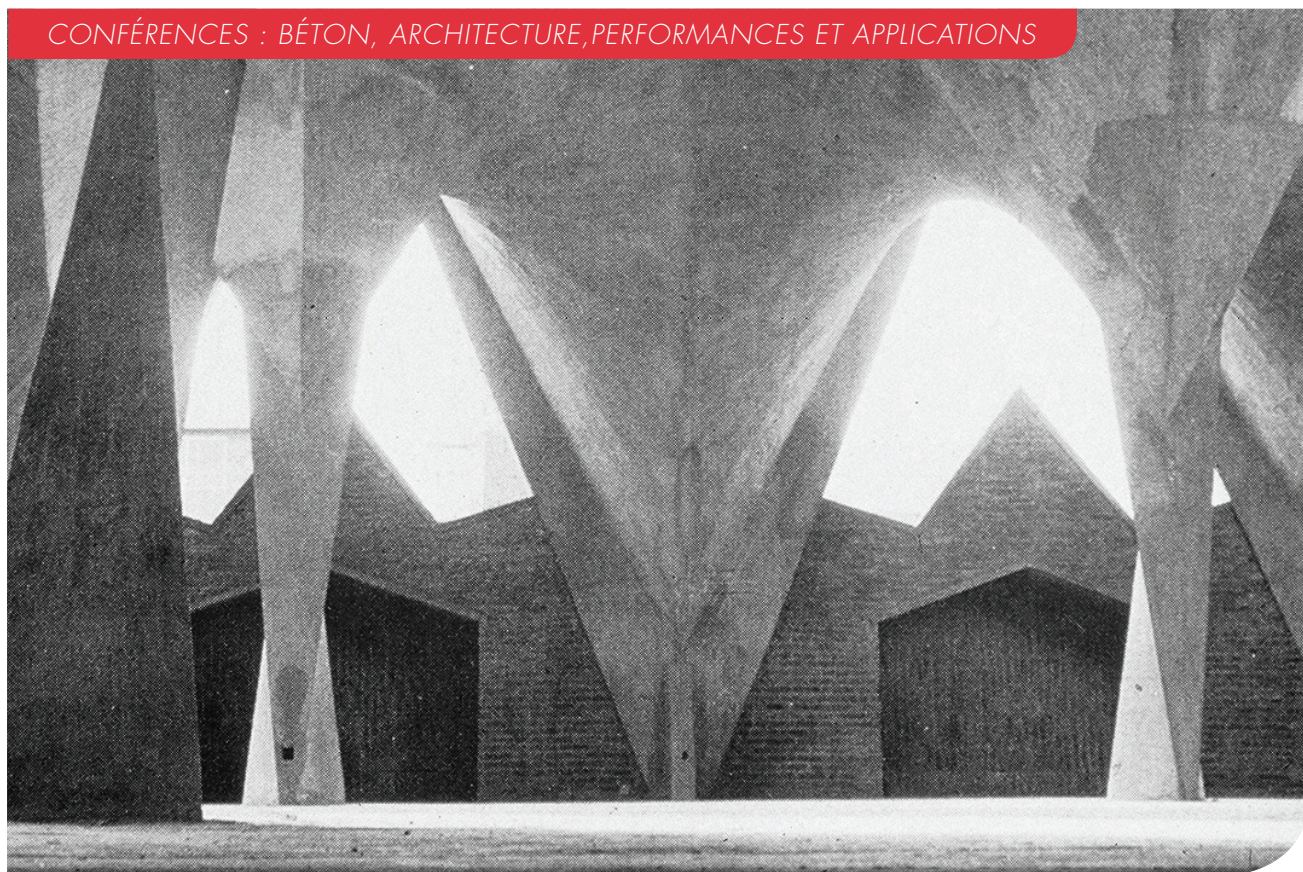


CAHIER DES MODULES DE CONFÉRENCE POUR LES ÉCOLES D'ARCHITECTURE

CONFÉRENCES : BÉTON, ARCHITECTURE, PERFORMANCES ET APPLICATIONS

Eglise de la Vierge miraculeuse, Mexico, 1954, Ingénieur F. Candela, DR.



HISTOIRE DU BÉTON

NAISSANCE ET DÉVELOPPEMENT, DE 1818 À NOS JOURS



HISTOIRE DU BÉTON : NAISSANCE ET DÉVELOPPEMENT, DE 1818 À NOS JOURS

Avant-propos

● Pour visualiser les trois grandes étapes de l'histoire du béton armé, l'architecte et historien Jacques Gubler propose un diagramme très simple : le béton des entrepreneurs qui commence un peu avant 1850, celui des ingénieurs avec la diffusion du matériau vers 1890, et enfin celui des architectes qui débute un peu avant 1900, lorsque les techniques sont bien connues et que des pionniers comme Anatole de Baudot, Auguste Perret et Henri Sauvage se mettent à explorer son potentiel esthétique.

Sommaire

Le béton des inventeurs et des entrepreneurs	6
Une double origine	6
Louis Vicat et l'invention du ciment	7
Composants matériels	7
Pierres artificielles	7
François-Martin Lebrun à Montauban	8
Les brevets de François Coignet (1814-1888)	8
Développement du béton François Coignet	8
Déboires de la pierre artificielle de François Coignet	9
Premier pont à New York en 1874	9
Du mortier armé au béton armé, histoire d'une idée	10
La barque de Joseph Lambot – 1849	10
Joseph Monier : des caisses horticoles de 1867 à la construction de maison en 1886	10
Développement du système Monier : de la rocaille à Wayss et Freytag	11
Une profusion d'inventeurs	11
Un développement qui commence aux alentours de 1890	12
Le béton Cottancin (1865-1928) : un système complexe mais unitaire	12
L'engagement d'Anatole de Baudot pour le système Cottancin	12
Les chantiers d'Anatole de Baudot	13
Les aléas du chantier de Saint-Jean-de-Montmartre	13
François Hennebique (1842-1921) : un système simple et efficace	14
Une stratégie de promotion radicale et l'invention du bureau d'étude	14
Un succès proche du monopole	15
Un succès auprès des architectes	16
Wayss et Freytag : le développement du « Monierbau »	16
Diffusion du matériau dans le tissu des petites entreprises	17
Une technique d'entrepreneur	18

Le béton des ingénieurs	19
Une invention paradoxale qui déroute la science	19
Une adhérence très discutée	19
La question des coefficients de dilatation	19
Comprendre le rôle respectif des deux matériaux	20
Outils de calcul	20
Normalisation	20
Une évolution technique permanente	21
Composition : l'enjeu des adjuvants	21
Faciliter la mise en œuvre	21
La préfabrication	22

Le béton des architectes	23
La maison Dom-ino : une rupture	23
Un imaginaire très libre	23
Intégration à la doctrine du rationalisme constructif	24
Le béton armé au service des monuments historiques	24
La scénographie structurelle de l'école rationaliste :	
Émile Dubuisson et François le Cœur	25
Auguste Perret (1874-1954) entrepreneur et architecte	26
L'ossature comme expression esthétique	27
La mise en scène de la structure	27
Le modèle des silos	28
Henri Sauvage rue de Trétaigne	28
Un principe qui se développe dans les nouveaux programmes	29
« L'esthétique du calcul » ou le « vrai langage » du béton	29
Les ouvrages d'art : franchir plus avec moins de matière	30
Les coques, bâtiments High-tech des années 30 à 50	30
Une démarche intuitive et inspirée, mais attentive aux questions	
de mise en œuvre	31
Libertés formelles	31
Une nouvelle hiérarchie architectonique	32
Cubisme et purisme	32
Décomposition neoplasticiste de De Stijl	32
Expressionnisme formel	33
Des formes libres mais difficiles à mettre en œuvre	34
Textures et vérité constructive	34
La mise en œuvre comme enjeu esthétique	35
Poésie brutaliste	36
Les grands ensembles ou le béton minimum	36
Première critique	37
Une voie alternative : l'habitat intermédiaire	37
Retour à l'urbain	38
Continuités plastiques contemporaines	39

Bibliographie 43

Le béton des inventeurs et des entrepreneurs

Une double origine

Le béton armé est un matériau particulier, fruit d'une invention dont l'origine est double: d'un côté, c'est une production industrielle consistant en l'assemblage de deux produits déjà transformés, l'acier et le ciment; de l'autre, une production intellectuelle, née de l'idée d'associer ces deux matériaux très dissemblables.

La première histoire du béton armé est donc la gestation d'une idée, celle de l'association fer/béton, qui n'apparaît pas d'un seul coup, ni sous une forme unique, mais qui émerge progres-

sivement, comme un faisceau de recherches convergentes. Pendant plusieurs décennies, alors même que les composants matériels du béton sont déjà au point, les architectes et les ingénieurs ont du mal à faire le saut conceptuel nécessaire à la compréhension de l'association de deux matériaux tellement dissemblables. Cela explique que les architectes et les ingénieurs soient restés, pendant près d'un demi-siècle, absents de la première histoire du béton qui repose tout d'abord sur des stratégies d'inventeurs et d'entrepreneurs. Cette genèse n'est pas sans intérêt car, à travers les inventions, les brevets et les techniques des inventeurs, leurs intuitions ou leurs erreurs, on pénètre dans l'intimité du matériau, ce qui permet de mieux en saisir les potentialités.



Vicat, Pont de Souillac.

Louis Vicat et l'invention du ciment

Le béton est le mélange d'un liant hydraulique (ciment), de granulats (graviers) et d'eau. L'eau provoque une réaction chimique de prise avec le ciment qui, en durcissant à l'air, lie tous les composants en un ensemble homogène et monolithique.

Mortiers et chaux étaient utilisés depuis des millénaires. Les Chinois, les Égyptiens, les Mayas construisaient avec des mortiers à base d'une chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau. Les Romains fabriquaient des liants hydrauliques, comme en témoigne Vitruve dans ses *Dix livres d'architecture*. Il leur revient d'avoir découvert au début de notre ère qu'en ajoutant au mortier de la terre de Pouzzole (pouzzolane) issue de cendres volcaniques, le mortier pouvait prendre sous l'eau. Mais ce principe est resté longtemps inexpliqué et fut un peu oublié jusqu'à ce que, à la fin du XVIII^e siècle, plusieurs ingénieurs le redécouvrent et cherchent à le comprendre expérimentalement.

Dans cette quête, parallèlement aux travaux de John Smeaton, c'est Louis Vicat (1786-1861) qui découvre les propriétés des mortiers de ciment. En charge du pont de Souillac en Dordogne, il travaille sur la mise au point de ce nouveau mortier et parvient à isoler une cendre artificielle composée de calcaire et de silice qui devient ciment. Il expérimente ensuite son emploi dans les piles du pont de Souillac puis, en 1818, élabore la théorie de l'hydraulicité qui précise les proportions des différents composants nécessaires à la constitution du ciment artificiel lors de la cuisson. En 1828, Louis Vicat réalise un pont suspendu en ciment, au-

dessus de la Corrèze, à Argentat, qui démontre la qualité de son matériau. Dans les années qui suivent, Vicat parcourt la France afin de découvrir plus de trois cents carrières capables de fournir ces chaux hydrauliques et en publie les listes dans les *Annales des Ponts et Chaussées*.

Composants matériels

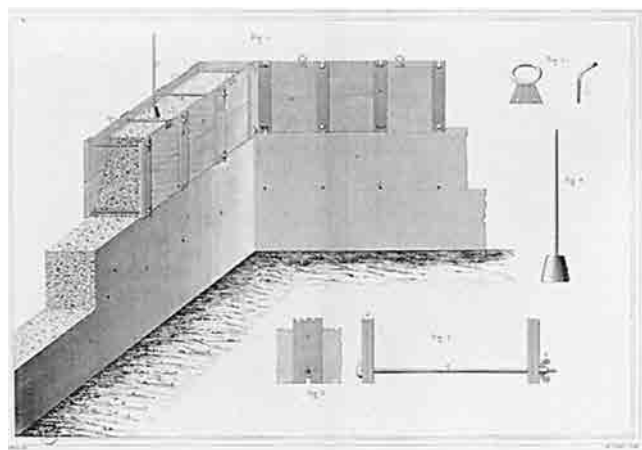
C'est ainsi que se met en place la base d'une production industrielle de ciment artificiel. En 1824, l'Écossais Joseph Aspdin dépose un brevet pour le Ciment Portland qui améliore la qualité de cette « pierre artificielle ». En France, un polytechnicien, Pavin de Lafarge, installe des fours à chaux au Teil, en 1833, et la première usine de ciment est créée par Dupont et Demarle à Boulogne-sur-Mer en 1848. Le premier composant du béton est donc opérationnel à la fin de la première moitié du XIX^e siècle

Parallèlement, la production de l'acier s'organise. À l'origine, les fourneaux sont dispersés dans les forêts à proximité des gisements de minerai de fer et traités au charbon de bois. La production reste faible jusqu'à ce qu'en Angleterre on commence à utiliser la houille puis le coke dans des hauts fourneaux. La véritable production industrielle débute avec l'invention du four Bessemer en 1855, qui permet la fusion de minerais de faible teneur.

Ainsi, au milieu du XIX^e siècle, les conditions matérielles sont réunies pour l'invention du béton puis du béton armé.

Pierres artificielles

Encore une fois, il faut souligner que les recherches sur une « pierre artificielle » ne sont pas l'œuvre d'un homme seul, mais constituent un faisceau convergent en cours dès les premières décennies du siècle. En 1807, Fleuret invente une « pierre artificielle » qu'il décrit dans son *Art de composer des pierres factices aussi dures que le caillou*. Mais ce n'est qu'après la théorisation de Vicat que le mortier de ciment se diffuse.



Mur en « pierre artificielle » coulé dans une banche, 1807.

Notons en outre que le béton ne naît pas ex-nihilo, mais s'intègre dans une famille technique très ancienne, celle du pisé: ce béton – non encore armé – est coulé dans des banches et pilé selon des procédés similaires à celui du pisé banché employé dans de nombreuses régions.

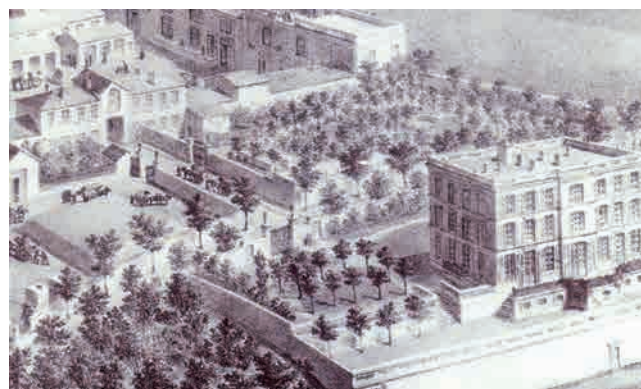
François-Martin Lebrun à Montauban

Les premiers développements du béton se font dès les années 30. C'est ainsi que dans les années 1830, l'architecte François-Martin Lebrun de Montauban construit une maison de trois étages en béton à Albi, un temple protestant à Corbarieu, puis un pont à Grisolles, près de Montauban. Cet architecte rédigea d'ailleurs deux traités sur cette technique: *Méthode pratique pour l'emploi du béton*, en 1835, puis *L'art de bâtir en béton*, en 1843.

Les brevets de François Coignet (1814-1888)

Mais c'est avec François Coignet qui, en 1854, dépose un brevet pour du « béton économique » que le béton va connaître son premier essor.

Coignet vient de Lyon, ville dans laquelle le mortier banché est une technique traditionnelle. Reprenant l'entreprise de produits chimiques de son père, il fonde une filiale à Saint-Denis en 1851. La construction des nouveaux locaux est l'occasion de la découverte du « béton aggloméré », mortier pilonné dans des coffrages qui forme une masse dure comme de la pierre qu'il appelle « pierre sans fin ». À la suite de ce premier brevet, Coignet agit en industriel cherchant à capter les marchés et à circonscrire la concurrence: entre 1855 et 1859, il dépose une série de brevets (bétons hydrauliques, bétons plastiques, pierre factice, etc.). Sa démarche fut parfois critiquée dans le milieu du bâtiment car certains remarquent qu'il fait parfois breveter



François Coignet, maison à Saint-Denis.

des pratiques courantes de la construction. Mais elle est efficace puisque, diffusés grâce à des publicités, ses brevets sont connus en Grande-Bretagne, aux États-Unis, en Australie. Il parvient même à en parler à l'empereur Napoléon III. Le nouveau matériau gagne alors une audience élargie, comme en témoignent plusieurs médailles aux expositions universelles.

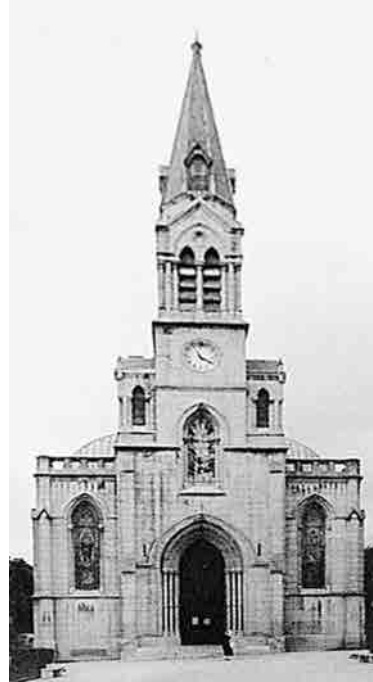
En 1861, l'entrepreneur publie un livre, *Bétons agglomérés appliqués à l'art de construire*, dans lequel il annonce que la révolution dans l'art de bâtir engendrée par le nouveau matériau va permettre de combattre l'injustice et la misère grâce à deux de ses qualités: l'hygiène et l'économie. Ainsi, pour François Coignet, le béton est universel et n'a aucune contrainte, il doit permettre des constructions sûres, saines et rapidement bâties. Sur le plan technique, l'argument essentiel qu'il développe est le monolithisme du matériau.

Développement du béton François Coignet

Bien que son béton « aggloméré » ne soit pas encore armé, il utilise déjà l'association béton/métal, probablement sans entrevoir l'importance de cette tentative. Ainsi, pour réaliser les planchers de la maison qu'il se fait construire à Saint-Denis (72, rue Charles Michel) en 1852, sur les plans de Théodore Lachez, il noie les poutrelles métalliques dans le béton.



François Coignet, immeuble
rue Miromesnil, Paris, 1867.



François Coignet,
église du Vésinet,
1862.

Il conduit par ailleurs de nombreux chantiers : la maison du chef de gare à Suresnes en 1852, la poulerie du jardin d'acclimatation dans le Bois de Boulogne, le phare de Port-Saïd (haut de 55 m) en Égypte, une seconde maison à Saint-Denis (rue des Poissonniers) en 1856, puis un immeuble de six étages, rue Miromesnil à Paris, en 1867. Mais à l'époque, le béton est avant tout un matériau d'infrastructure. L'entreprise Coignet vit essentiellement grâce aux commandes de travaux publics. Elle réalise principalement des kilomètres d'égouts et d'importants travaux d'adduction d'eau. Vers 1876, elle bâtit aussi les murs de soutènement du cimetière de Passy ou encore les rampes du Trocadéro de l'architecte Davioud, et réalise une digue expérimentale à Saint-Jean-de-Luz.

Déboires de la pierre artificielle de François Coignet

Coignet cherche à convaincre les architectes d'utiliser son procédé. Mais les résultats ne sont pas toujours à la hauteur des espérances. Sa première réalisation architecturale importante est l'église du Vésinet en 1862. Son architecte, Louis-Auguste Boileau, se voit imposer l'emploi du béton par Alphonse Pallu, promoteur moderniste de la cité-jardin du Vésinet. Loin de chercher à mettre en valeur le nouveau matériau, jusque-là utilisé pour les canalisations et les égouts, l'architecte donne à ses façades l'aspect noble de la pierre en imitant les joints de la maçonnerie grâce à des baguettes

clouées sur les coffrages. Or, peu de temps après son séchage, la façade se couvre d'efflorescences qui se transforment en taches grisâtres, trahissant ainsi l'illusion recherchée du matériau. Furieux, l'architecte dénoncera désormais auprès de ses pairs les défauts, réels ou imaginaires, du matériau et prônera son boycottage. Il publie même un article virulent dans le *Moniteur des architectes* dont il restera des traces. Même si Coignet tente de se défendre en expliquant que sa maçonnerie n'est pas plus perméable que bien des murs de pierres et qu'il suffit de l'enduire, cette aventure ne fera qu'augmenter la défiance des architectes vis-à-vis de ce nouveau matériau.

Il est vrai que Coignet est peu précis dans ses dosages, qui se font empiriquement, et nombre de ses ouvrages se fissurent ou sont très poreux. Pourtant, des ouvrages importants, comme celui du mur de soutènement du cimetière de Passy montrent que ce nouveau matériau assure une bonne tenue dans le temps, propriété que souligne *La Semaine des constructeurs*, en 1876.

Premier pont à New York en 1874

C'est à New York que Coignet verra son béton utilisé avec succès pour un ouvrage noble : le pont de Cleftridg, dans le parc de Brooklin, édifié par Calvert Vaux et John C. Goodridge. En effet, l'ouvrage se révèle à la fois très économique et de bonne facture esthétique.

Du mortier armé au béton armé, histoire d'une idée

Parallèlement à la naissance du béton, germe l'idée de son armature : associer des tiges d'acier au mortier, puis au béton, pour le renforcer.

Dans les histoires de l'architecture traditionnelles, l'invention du béton armé peut paraître soudaine et miraculeuse. Elle découle de la « barque impu- rescible » de Joseph Lambot en 1847 puis de la caisse horticole de Monier en 1867. Pourtant la gloire de ces deux objets est largement posthume : ce n'est que vers la fin du XIX^e siècle, alors que le béton armé est devenu un matériau économiquement significatif, que des entreprises mettent en avant ces racines, peut-être parce que leur côté anecdotique ne peut nuire à l'originalité des systèmes qu'elles exploitent.

La réalité est plus complexe. De la même manière que l'invention du béton non armé est liée à l'histoire des mortiers et à la mise en œuvre des pisés, l'idée d'armer le béton s'inscrit dans une tradition constructive plus ancienne. C'est ainsi que l'introduction d'armatures métalliques dans la maçonnerie existait déjà dans l'architecture gothique et classique : on plaçait des tiges de métal terminées à chaque bout en Y, dans les lits de pierres pour les empêcher de s'écarter. C'est aussi le cas par exemple des façades du Louvre de Perrault ou de celles dessinées par Jacques Ange Gabriel pour la place de la Concorde à Paris.

À la fin du XVIII^e siècle, l'introduction d'armatures dans le mortier est dans l'air et de nombreuses propositions voient le jour. Ainsi, en 1774, Lorient suggère d'incorporer le fer dans le mortier. En 1792, Loudon recommande l'utilisation d'un plancher composé d'un treillis de tiges de fer noyé dans du ciment, idée est reprise par Fleuret vers 1807, puis par Raucourt en 1824. Vers 1830, Labrousse, l'architecte de la Bibliothèque nationale, utilise une combinaison de plâtre sur un treillis métallique pour réaliser la voûte de la bibliothèque Sainte-Geneviève. En 1844, Fox et Barret font breveter un système dans lequel des solives de



Joseph Lambot, barque en ciment armé, 1849.

fonte sont noyées dans un béton de chaux. Coignet aussi utilisera ce principe.

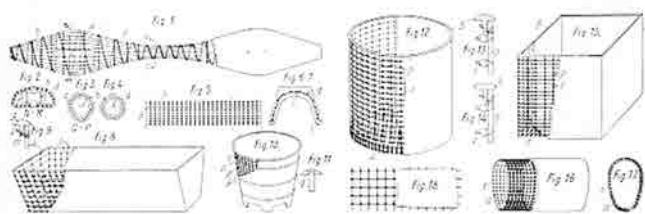
La barque de Joseph Lambot – 1849

C'est un peu en marge de cette recherche directement liée à la construction, que le jeune ingénieur Joseph Lambot construit en 1849 sa fameuse barque imputrescible en fer et ciment, dont il dépose le brevet en 1855 en vue de sa présentation à l'Exposition Universelle de cette même année. Il précise que cette solution technique peut aussi être employée pour des « madriers, caisses à eaux et à oranger ». Mais, au milieu des 20 000 exposants son « bateau-ciment » passe inaperçu. Il ne réalisera qu'une bouée, dont la commande fut passée par le préfet maritime de Toulon.

Joseph Monier: des caisses horticoles de 1867 à la construction de maisons en 1886

Joseph Monier, qui dépose un brevet pour un « système de caisses-bassins mobiles en fer et ciment applicable à l'horticulture » en 1867, a plus de succès.

Comme Lambot, Monier ne comprend pas, dans un premier temps, l'enjeu « matériau de construction » de son invention : son brevet est inscrit dans



Joseph Monier, objets en ciment armé, 1880.

la catégorie « Agriculture, meunerie et boulangerie » et se focalise sur cet objet : un réseau métallique pour caisses et bassins portatifs. Monier développe ensuite pendant 20 ans son invention à travers plusieurs additifs au brevet et en multiple usages : tuyaux, bassins, passerelles, escaliers et même cercueils. En 1878, il dépose enfin un brevet pour une poutre puis, en 1886 – soit dix-neuf ans après son invention – il propose un « système de construction pour des maisons, fixes ou portatives, hygiéniques et économiques en ciment et fer ».

Développement du système Monier : de la rocaille à Wayss et Freytag

Joseph Monier délaisse son emploi de jardinier à l'Orangerie de Versailles, pour devenir « cimentier rocailleur ». Il fonde une petite entreprise qui construit des réservoirs (Fontenay, Bougival, Alençon) et des éléments décoratifs de jardins (similaires aux garde-corps des éléments architecturaux du parc des Buttes-Chaumont ou du bois de Boulogne).

Il tente de diffuser ses techniques auprès des architectes, mais la Société Centrale des Architectes devant laquelle il présente son invention en 1876 lui fait un accueil peu enthousiaste. Il cherche alors à l'étranger les moyens de son développement : il présente son brevet en Belgique, participe à des expositions en Autriche et en Allemagne vers 1879. Un entrepreneur de la région de Francfort, Conrad Freytag (1846-1921) achète à Monier les droits de ses procédés pour l'Allemagne du Sud et l'Autriche ; un autre, Gustav-Adolf Wayss (1851-1917), ingénieur zurichois, ceux pour l'Allemagne du Nord vers 1885. Monier ne semble pas faire une très bonne affaire commerciale, mais son système est à l'origine du développement du béton armé dans tous ces pays, et les Allemands parlent, pour le béton, de « MonierBau ».

Une profusion d'inventeurs

L'invention du béton armé ne peut donc pas être attribuée à un inventeur unique, mais se place à la convergence d'un faisceau de réflexions. Après 1880, le nombre de brevets augmente et les systèmes se multiplient. Rien qu'en France, 262 brevets seront déposés jusqu'en 1906. On peut citer de nombreux inventeurs qui, chacun, proposent un béton armé ou des applications spécifiques. Ainsi, Ransome, aux USA, introduit les aciers torsadés pour augmenter l'adhérence et se spécialise dans les silos, tandis que Koenen invente une sorte de prédalle pour supprimer le coffrage. D'autres se spécialisent dans des ouvrages particuliers : Matrai dans les canalisations, Wünsch dans les voûtes en berceau. De son côté, Armand Considère invente le béton fretté, qui introduit une armature en spirale pour renforcer la résistance à la compression.

La quantité de ces brevets montre le succès du béton armé : le matériau commence à pénétrer le monde du bâtiment et les entrepreneurs sont de plus en plus nombreux à se convertir à cette technique.

Aujourd'hui, alors que le béton est un matériau banal, le principe du brevet peut surprendre. Pourtant, le béton armé doit ses premiers succès économiques à cette procédure qui le place dans le champ de l'exploitation industrielle et reporte vers les entreprises la responsabilité de son succès, alors que les maîtres d'œuvre ne s'y intéressent pas encore.

Tous les brevets ne conduisent pourtant pas à la fortune. Très peu sont véritablement exploités. Seuls ceux qui, comme Hennebique, Bonna, Considère et Coignet, sauront les commercialiser, parviendront à une exploitation économiquement viable de leurs brevets.

Les inventeurs de l'idée du béton armé sont donc nombreux et cette multiplicité s'explique par le fait que l'environnement technique et économique, culturel et social, est prêt à accueillir cette invention. En phase avec son temps, le béton armé se diffuse largement, en seulement quelques décennies dans les entreprises de travaux publics et de bâtiment.

Un développement qui commence aux alentours de 1890

Avant 1890, on compte très peu de réalisations architecturales en béton armé. Bien que, dès 1878, Eugène Dupuis ait construit le plancher et les piles de la librairie catholique de la rue des Saints-Pères en béton armé, ce dernier reste un matériau d'infrastructures.

C'est entre 1889 et 1892 qu'un tournant se dessine, avec une série d'innovations techniques ou commerciales apportées par les firmes qui vont répandre la construction en béton armé, voire la monopoliser, jusqu'au début du ^{xx}^e siècle : Cottancin, Édouard Coignet (fils de François) et surtout Hennebique en France et Wayss et Freytag dans les pays germaniques. La concurrence entre les plus grandes entreprises sera rude. Elle ne porte pas toujours sur la qualité des procédés : les poutres Hennebique ou Coignet remplissent par exemple les mêmes fonctions. C'est une compétition industrielle de parts de marchés. Ce sont alors les stratégies de développement qui font la différence.

Le béton Cottancin (1865-1928) : un système complexe mais unitaire

En 1889, Paul Cottancin (1865-1928), diplômé de l'École Centrale en 1886, dépose un système de « Travaux en ciment avec ossature métallique » permettant la réalisation de voiles très minces. Récusant le principe d'adhérence entre le ciment et l'acier, Cottancin imagine une armature composée d'un unique fil d'acier fin, plié et replié sur lui-même pour former une toile métallique dense que vient enrober le ciment. Un fort dosage de ciment lui permet de diminuer l'épaisseur des parois jusqu'à 5 cm. Pour rendre ces voiles plus résistants, des nervures, dites « épines-contreforts », sont ajoutées. Son système intègre aussi des murs en maçonnerie de « briques enfilées » : un mur de briques percées dans lesquelles se prolonge l'ar-

mature et qui, après coulage, collabore au monolithisme de l'ouvrage et sert de coffrage perdu au mur en ciment armé. Innovante, cette mise en œuvre économise la réalisation de coffrages temporaires pour les murs.

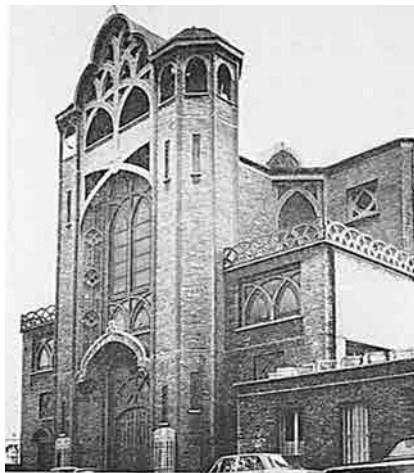
L'engagement d'Anatole de Baudot pour le système Cottancin

À la mort de Viollet-le-Duc en 1879, l'architecte Anatole de Baudot (1834-1915) lui succède comme chef de file de l'école rationaliste. Dès qu'il découvre le ciment armé de Cottancin, vers 1891, il se passionne pour ce système constructif car il voit dans le monolithisme du béton armé l'occasion d'ouvrir une nouvelle voie au rationalisme structurel. Il permet, tout comme l'architecture gothique, de mettre en scène la descente des charges au sein d'une maçonnerie conçue selon un principe d'unité structurelle. À Saint-Jean-de-Montmartre, les voûtes sont minces, composées de deux parois de sept centimètres d'épaisseurs séparées par un mâchefer. Elles sont renforcées par des épines-contreforts qui, comme les nervures de l'architecture gothique, mettent en scène le cheminement des efforts.

De Baudot pense avoir réussi là où Viollet-le-Duc avait échoué : ce dernier ne pouvait atteindre la pureté structurelle avec ses constructions mixtes en métal et remplissage de briques. Au contraire, avec le ciment armé et la brique armée de Cottancin, l'unité structurelle est réinventée. De Baudot associe l'enjeu esthétique à une vision sociale : l'unité de structure doit abolir la distinction entre architecture riche et pauvre, tellement marquée dans l'architecture de pierre et permettre de ramener l'architecture à son véritable rôle de construction.

Cette scénographie structurelle répond bien à la quête du structuralisme néo-gothique de Baudot. L'impossibilité d'une modélisation mathématique du système (réputé incalculable) impose la conception d'une architecture fondée sur le raisonnement

Anatole de Baudot,
architecte.
Système Cottancin
en béton armé.
Église Saint-Jean
de Montmartre,
Paris, 1894 -1904.



structurel et dans laquelle Baudot retrouve l'empirisme des constructeurs du Moyen Âge. C'est pourquoi le ciment armé devient le matériau de Baudot qui le défend même contre le béton armé.

Les chantiers d'Anatole de Baudot

À partir de sa découverte, Anatole de Baudot utilise le système Cottancin dans tous ses chantiers. Une première fois en 1892, pour les planchers de sa propre maison, rue Pomereu, à Paris, dans laquelle la façade reste de pierre mais les planchers sont constitués par des dalles de 4 cm d'épaisseur renforcées par un réseau de nervures croisées et où la charpente est remplacée par une voûte mince doublée d'une couverture d'ardoises sur lattis. En 1893, il l'utilise avec ses façades de briques enfilées et une toiture en béton apparent, pour la réalisation de trois maisons ouvrières à Antony (rue Gabriel Peri). Il reprend le système entre 1894 et 1896, au lycée Victor Hugo, rue de Sévigné, à Paris, dans lequel les portées des planchers atteignent 7 à 8 mètres. Les toitures de ciment y sont couvertes d'ardoise, le ciment ne restant apparent que sur de petites étendues. Il construit aussi selon ce procédé le théâtre municipal de Tulle entre 1899 et 1902.

Les aléas du chantier de Saint-Jean-de-Montmartre

Mais sa grande œuvre est l'édification de l'église Saint-Jean-de-Montmartre qui commence vers 1894, mais ne se termine qu'en 1904. Le béton fait alors l'objet d'un grand développement, en particulier dans les bâtiments liés à l'Exposition Universelle de 1900. En effet, si l'Exposition Universelle de 1889 est celle du métal, au-delà des formes organiques et végétales de l'Art Nouveau, sur le plan technique, l'Exposition Universelle 1900 est celle du béton armé. Or, quelques édifices s'étant effondrés, l'administration commande une expertise et arrête tous les chantiers, en particulier celui de l'église qui est interrompu en 1899 alors que l'ossature est achevée. Les deux experts-architectes, Trélat et Vaudremer, sont très défavorables : effrayés par la minceur des voiles, ils qualifient l'œuvre de précaire. Le chantier ne pourra finalement reprendre qu'en 1902, mais Cottancin ayant fait faillite, il sera achevé par un de ses collaborateurs, Degaine.

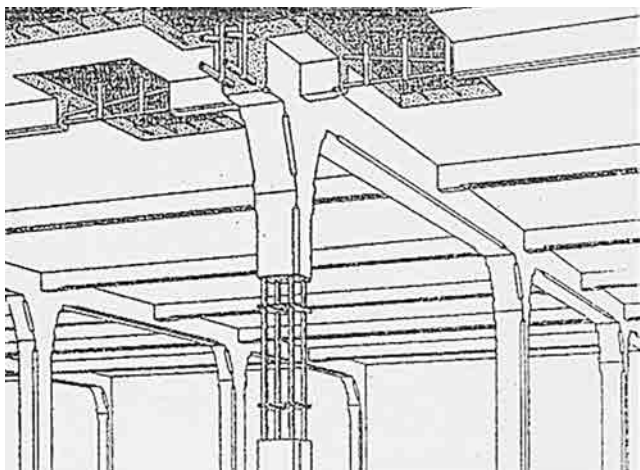
Cette mésaventure nuira au système Cottancin, car l'expertise se poursuivra par la création d'une commission d'étude sur le matériau à l'occasion de la démolition des pavillons de l'exposition universelle de 1900. Ce travail conduira à l'adoption de la

première réglementation sur le béton armé en 1906. Performant mais complexe, le système Cottancin est réputé incalculable. D'autre part, il demande une mise en œuvre précise et coûteuse que peu d'entreprises seront capables de fournir. Ces deux facteurs conduiront à son oubli progressif après 1914. Pourtant ce système est important puisque c'est le premier système qui portera les nouvelles ambitions esthétiques liées au nouveau matériau.

François Hennebique (1842-1921): un système simple et efficace

L'invention qui aura les plus grandes retombées commerciales est celle de François Hennebique. Ce dernier dépose un brevet en 1892 dans lequel il place explicitement les fers en fonction des contraintes et préconise l'emploi d'étriers pour relier les fers longitudinaux afin de répondre à l'effort tranchant et de faciliter la mise en œuvre

L'étrier, qui devient le symbole de la firme Hennebique, lui donne une longueur d'avance sur ses concurrents. À l'opposé du système Cottancin, le système Hennebique tranche par sa simplicité et s'adapte aisément à une main-d'œuvre peu formée



François Hennebique, axonométrie présentant le système.

et surtout par la facilité de son introduction dans le savoir-faire classique des petites entreprises de maçonneries de l'époque. Si l'on analyse l'axonométrie présentant le système Hennebique, on s'aperçoit que c'est un système de construction traditionnel : des poteaux soutiennent des poutres auxquelles elles sont reliées par des chapiteaux ; les poutres portent un réseau de poutrelles qui portent un plancher. Ce système constructif est classique, mais réalisé en béton armé. Il ne transforme pas la vision habituelle de la construction, ce qui explique aussi sa facilité de pénétration des entreprises de construction.

Une stratégie de promotion radicale et invention du bureau d'étude

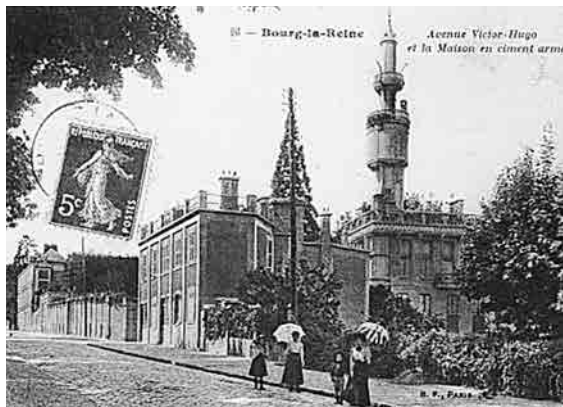
Mais la grande force d'Hennebique est sa stratégie de promotion. Dès 1892, Hennebique publie une brochure qui vante les mérites du béton armé qui s'intitule : « Plus d'incendies désastreux ». Diffusée à 3 000 exemplaires, cette publication provoque un afflux de commandes qui, de manière paradoxale, conduit Hennebique à fermer son entreprise de construction. Il abandonne le chantier pour se concentrer sur les études : il invente le bureau d'étude, figure dominante de la maîtrise d'œuvre française, alors que dans d'autres pays c'est l'ingénieur-conseil indépendant qui émerge.

Ainsi, au lieu de réaliser lui-même les ouvrages, il met en place un réseau de concessionnaires répartis dans toute l'Europe, supervisés par des agents régionaux qui assurent les calculs et contribuent au maintien de la qualité des nombreux chantiers. Cette organisation originale tranche sur les autres pratiques. Avec la pierre, la conception de la mise en œuvre était directement liée au chantier : l'appareilleur était chargé des tracés de coupes et des plans de montage de l'appareil, selon les principes de la stéréotomie. Avec le métal, la fonction d'ingénierie s'insère au sein des entreprises spécialisées qui assurent aussi le chantier. Avec le béton armé Hennebique, la structure d'étude est autonomisée et clairement différenciée.

Un succès proche du monopole

Entre 1895 et 1910, la maison Hennebique tend à exercer un monopole sur la construction en béton armé. Les entrepreneurs locaux ont un label, une garantie technique et ils participent à la diffusion et à l'enracinement des techniques du béton armé au niveau local : le nombre de concessionnaires augmente rapidement ; en 1902 il est de 290, répartis dans de nombreux pays : France, Belgique, Suisse, Italie, Égypte, Russie, colonies.

Excellent publicitaire, Hennebique affirme sa particularité avec un slogan : « Hennebique n'est pas entrepreneur ». Afin de convaincre les architectes et les maîtres d'ouvrage, il adopte une stratégie commerciale plurielle : création d'un Congrès annuel sur le béton armé à partir de 1897, fondation de la revue *Le béton armé*, en 1898, tirée à 10000 exemplaires et, à l'occasion des essais de résistance, réalisation de mises en scènes spectaculaires auxquelles sont conviés architectes, industriels et entrepreneurs. Les accidents eux-mêmes sont l'occasion de promotion : il utilise l'effondrement d'un immeuble lors d'un glissement de terrain en mettant en valeur le fait que la structure s'est penchée sans se casser, évitant le drame. Le succès de la méthode Hennebique est évident : entre 1892 à 1909, l'entreprise réalise plus de 20000 ouvrages, dispersés sur plusieurs continents dont plus de 1300 ponts. Parmi ces nombreux projets, le premier immeuble parisien entièrement en béton armé, situé au n° 1, rue Danton et conçu par l'architecte Édouard Arnaud en 1899-1900, devient le siège de l'entreprise Hennebique. Quant à la villa Hennebique à Bourg-la-Reine construite en 1901-1903, elle se présente comme un catalogue des possibilités du béton armé est un autre projet symbolique.



Hennebique, constructeur.
Villa
Hennebique
à Bourg-la-Reine,
1901-1903.



François Hennebique, constructeur.
Manufacture de chaussures
à Boston, USA, 1911.

François Hennebique, constructeur.
Réservoir à Charbon
à Saint-Vaast, 1898-1899.



Hennebique réalise toutes sortes de projets, mais la raffinerie parisienne de Saint-Ouen est son premier grand chantier parisien, en 1894. Les filatures Barrois à Tourcoing en 1895, le réservoir à Charbon de Saint-Vaast en 1898, le réservoir d'Héliopolis en 1900 ou la manufacture de chaussures de Boston en 1911 montrent que le matériau s'est rapidement imposé pour les bâtiments techniques ou industriels. Il concurrence bientôt le métal en devenant un matériau pour les ouvrages d'art, comme au pont de l'Exposition universelle de Liège en 1905 ou au pont de Guerroz d'Alexandre Sarrasin en 1933.



Alexandre Sarrasin, ingénieur.
Pont de Guerroz, 1933.





Paul Auscher, architecte,
François Hennebique,
constructeur.
Magasin Félix-Potin,
140, rue de Rennes
à Paris.

agents Hennebique donnent des conseils et des solutions constructives à tous, sans chercher à remettre en cause la routine stylistique des architectes : le béton s'adapte. Les réalisations Hennebique constituent un véritable catalogue de l'éclectisme académique au tournant du siècle. Mais Hennebique ne soutenait pas l'académisme : cette diversité est le signe que le béton peut tout faire et Hennebique réalise aussi des projets d'avant-garde comme le stade de la ville de Lyon (1915-1916) conçu par Tony Garnier.

Wayss et Freytag : le développement du « Monierbau »

Un succès auprès des architectes

Certains architectes sont conquis. Ainsi, L.C. Boileau, secrétaire de la Société Centrale des Architectes, devient un ardent défenseur du système Hennebique, tout comme Anatole de Baudot est le promoteur du système Cottancin. En 1895, Boileau consacre une série d'articles, à l'œuvre de Hennebique, dans la revue *L'Architecture*. En 1896, il teste son système pour la réalisation de bâtiments annexes du Bon Marché (écuries et bâtiments de manutention) à Paris. En retour, lors de l'exposition universelle de 1900, Boileau est chargé par Hennebique de concevoir la « Galerie terrasse du ciment armé ».

L'emploi du béton Hennebique s'étend rapidement à la construction de nombreux programmes, pour lesquels il démontre ses facultés d'adaptation formelle liées à sa moulabilité, comme au musée des antiquités égyptiennes au Caire en 1896-1899 (Dourgnou architecte) ou dans le théâtre néo-baroque de Berne en 1899-1903 (Würstemberger architecte).

Les magasins Félix-Potin, construits par l'architecte Paul Auscher au 140, rue de Rennes à Paris en 1904 montrent que le béton permet l'exubérance de la décoration de l'éclectisme de l'époque. Les

Alors que le système Hennebique reprend un système traditionnel de poutraison appliqué au nouveau matériau, le système allemand, issu du système de Joseph Monier, tend vers une conception liée de manière plus spécifique au béton armé, en développant les liaisons intimes poteau/poutres ou voiles/dalles, plus spécifiques au matériau et tirant davantage profit de ses qualités monolithiques.

Ne parvenant pas à intéresser les architectes français à son invention, Monier fait une conférence en Belgique qui suscite l'intérêt de deux entrepreneurs, Wayss et Freytag. Ils achètent les droits d'exploitation et vont ensuite se rapprocher pour élaborer une stratégie de diffusion du Monierbau.



Joseph Monier, réservoir à Bougival, 1878.





Heinrich Zieger, architecte,
Wayss et Freitag, constructeurs,
usine de produits émaillés
à Ligetfalu, 1912.

Wayss & Freitag,
centrale électrique
Hambourg, 1910.

À Berlin, Wayss collabore avec Koenen qui fait des expériences visant à définir des méthodes de calcul applicables au matériau. Ces travaux fourniront la base d'un document technique de 128 pages, la « Monierbrochüre » que Wayss diffuse à 10 000 exemplaires lors d'une grande campagne publicitaire. Ainsi pour Wayss, au contraire d'Hennebique, le calcul est au premier plan de la stratégie commerciale.

En 1893, Wayss crée avec Freytag une société destinée à exploiter le système de Monier et qui va développer un réseau intense de firmes et de filiales, mais selon un modèle d'entreprise très différent de celui d'Hennebique. Alors qu'Hennebique ne conserve que la seule fonction d'ingénierie, la firme allemande suit une voie industrielle et capitaliste, en créant un réseau de filiales par prises de participation, un système d'achat et d'alliances qui s'étend à l'ensemble de la chaîne de fabrication comprenant des producteurs de ciments et des laboratoires d'essais.

Diffusion du matériau dans le tissu des petites entreprises

Au début, le béton armé n'est pas concurrent du métal. D'ailleurs, pour les constructeurs américains le béton armé apparaît d'abord comme une variante « fireproof » de la construction métallique

et, au lieu de développer le concept spécifique du béton armé, ils utilisent des structures métalliques enrobées dans du béton. Mais d'une façon générale, les programmes ne sont pas identiques : le métal reste longtemps le matériau privilégié des grandes portées, halles, gares, pavillons d'exposition, etc. Ce n'est que progressivement que les marchés vont se rejoindre et devenir concurrentiels.

Contrairement à la construction métallique qui reste l'apanage de quelques entreprises spécialisées comme Eiffel, la technique du béton armé se diffuse très largement et pénètre l'ensemble du corps des entrepreneurs. Pourtant le tissu des entreprises de bâtiments, constitué d'une multitude de minuscules unités très disséminées, (en 1906 plus de la moitié des salariés du bâtiment travaillaient dans des entreprises de moins de 10 personnes), sans majors bien structurés comme aujourd'hui, n'était *a priori* pas favorable à la diffusion rapide d'une technique nouvelle.

Mais en réalité, pour ces petites entreprises, le béton armé présente deux avantages essentiels : il ne demande pas d'investissement en capital et il permet d'employer une main-d'œuvre moins qualifiée, donc plus économique, que celle des compagnons, maçons ou tailleurs de pierre. Or en France, de manière paradoxale, l'expansion de l'emploi du béton armé coïncide avec la dépression économique qui débute vers 1890 et dure jusqu'à la première guerre mondiale. En fait, cette crise favorise la déstructuration des métiers du bâtiment et leur mutation. Elle conduit à la recherche

d'une nouvelle productivité et à une diminution des coûts. Autant d'éléments favorables au développement du nouveau matériau dans lequel les entreprises voient le moyen d'accroître leur productivité et d'imposer un découpage rationnel des tâches leur permettant d'être plus compétitives et de s'adapter d'autant mieux à un contexte de crise.

Une technique d'entrepreneur

Ainsi, à cette époque, le béton armé n'est ni une science d'ingénieur, ni un savoir-faire ouvrier, c'est une technique d'entrepreneur qui prolonge l'activité traditionnelle de maçonnerie.

Elle demande peu de calculs, pas de « coup de main » artisanal, mais suppose une organisation du travail, une gestion de matériel précise et, surtout, un contrôle de la bonne exécution des opérations, qui sont le fait de l'entreprise. Car même le « béton Hennebique », de manipulation pourtant aisée, reste tributaire de l'entreprise. Même par la suite, les calculs de résistance les plus précis restent sans valeur si une exécution minutieuse des travaux ne suit pas.

La mise en œuvre des premiers bétons armés est bien connue grâce aux premiers livres qui la décrivent avec précision : création du coffrage, pose d'une première couche, damage, pose des barres d'acier puis coulage du béton par couches successives à chaque fois damées à l'aide de barres de fer recourbées à leurs extrémités. En fait, le béton armé change les matières premières et les qualifications, mais pas le principe du chantier. Ses métiers et ses compétences sont simplement redéfinis : le gâcheur, le bétonneur, le boiseur et le ferrailleur succèdent au tailleur de pierre, au poseur et au maçon. Le nouveau matériau s'insère donc naturellement dans le tissu productif existant.

Par ailleurs, les producteurs de matériaux, organisés de manière industrielle, prennent le relais des inventeurs, pour soutenir leur production. Ils créent un réseau de distribution de matériaux, qui permet aux nouveaux produits standardisés de se diffuser.

À partir de 1880-1890, on trouve aisément du ciment conditionné en sac ou en baril, des aciers calibrés et du grillage dans des comptoirs répartis dans toute la France. De manière logique, l'expansion de l'emploi du béton armé est concomitante au développement de la distribution de ses composants.

Le béton des ingénieurs

Une invention paradoxale qui déroute la science

Le béton armé bouleverse les notions séculaires de la statique et déroute les ingénieurs qui voient que cela marche, mais ne comprennent pas comment cela fonctionne. Pendant longtemps, les ingénieurs ne veulent pas admettre le caractère sérieux de ces constructions hybrides. Ainsi, l'ingénieur belge Arthur Vierendeel (1853-1940), inventeur de la poutre qui porte son nom, affirmait que c'est une « invention paradoxale qui déroute la science » et que « jamais un ingénieur n'en aurait eu l'idée ».

Pourtant, l'association maçonnerie/métal n'est pas neuve puisque les maîtres d'œuvre utilisaient depuis longtemps de la pierre armée. Il leur semble pourtant que ces deux matériaux, tellement dissemblables, ne peuvent travailler ensemble et doivent tôt ou tard se disjoindre et la construction s'effondrer. L'hétérogénéité du matériau explique le décalage entre les maîtres d'œuvre réticents et les industriels enthousiastes. L'hétérogénéité du béton armé rend difficile sa modélisation et son calcul. Au début, peu d'ingénieurs se risquent sur la difficile question théorique de son fonctionnement. Deux points majeurs bloquent la réflexion : la question de l'équivalence des coefficients de dilatation des deux matériaux et la question de l'adhérence des deux matériaux.

Une adhérence très discutée

L'adhérence entre les deux matériaux est très discutée. Certains ingénieurs, comme Cottancin ou Matrai, n'y croient pas. C'est ainsi que l'armature complexe inventée par Paul Cottancin est censée compenser ce manque d'adhérence. Ainsi on se souviendra qu'un brevet a été déposé par Robins, en 1869, qui proposait d'incorporer de la colle dans le béton afin d'assurer l'adhérence avec l'acier.



Charles-Henri Besnard, église Saint-Christophe de Javel, 1921-1898.

Cette qualité d'adhérence va se révéler progressivement au tournant du ^{xx}e siècle. À Munich, Bauschinger effectue des tests et fait dépendre la valeur d'adhérence de la section des fers. En France, Armand Considère démontre en 1899 que la présence d'armatures transforme la capacité d'allongement du béton. En 1900, l'ingénieur Badois montre que le fer ne travaille pas de la même manière lorsqu'il est enrobé de ciment. Autant d'éléments tendant à prouver l'adhérence des deux matériaux.

La question des coefficients de dilatation

La question de l'équivalence des coefficients de dilatation de deux matériaux si dissemblable ne va pas de soi. Ce n'est qu'à travers une série d'expérimentations scientifiques que cette réalité émerge. Aux États-Unis, Thaddeus Hyatt effectue en 1877

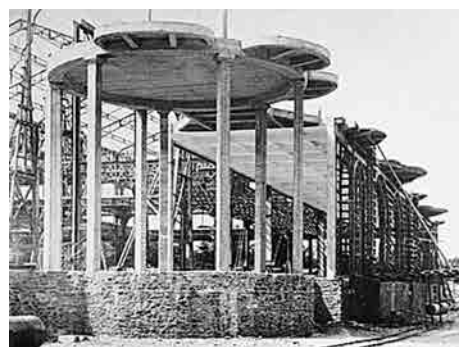
des expériences sur une cinquantaine de poutres diversement chargées et aux armatures diversement réparties. Il les soumet à des températures élevées afin de tester leurs qualités de résistance au feu et en tire la conclusion fondamentale de la similitude des coefficients de dilatation béton/acier. Les Allemands, qui exploitent le système Monierbau, vérifient également au milieu des années 1880 la cohérence mécanique du matériau. En France, dans la culture des ingénieurs français, ces résultats se propagent un peu plus tardivement. Ce n'est qu'en 1889 que Paul Cottancin émet l'hypothèse de l'identité de ces coefficients et en 1890, que le laboratoire des Ponts et Chaussées met à l'épreuve des plaques de ciment armé pour valider leur capacité de résistance.

Comprendre le rôle respectif des deux matériaux

En revanche, les rôles respectifs du métal et du béton, l'un pour les efforts d'extension et l'autre pour les efforts de compression, sont généralement bien compris. Le premier à expliciter le fonctionnement mécanique du mortier armé est le fabricant de plâtre Wilkinson qui, dans un brevet de 1854, précise que les tiges de métal doivent être placées dans les zones à forte tension. Il semble être le premier à comprendre l'action complémentaire du mortier et de l'armature. En 1892, Wayss dépose un brevet dans lequel le rôle mécanique des composants du béton armé est explicité sans ambiguïté : efforts de traction pour les tiges métalliques, compression pour le béton.

Outils de calcul

Mais pour les premiers expérimentateurs, les hypothèses de calculs restent vagues. Ils ne théorisent pas et cela correspond bien au côté pratique de l'entrepreneur industriel. Dans le grand nombre



Sortais, architecte.
Palais des lettres,
sciences et arts,
Paris, exposition
universelle, 1900.

de brevets déposés sur le matériau jusqu'en 1906, très peu s'appuient en effet sur des calculs. Les entrepreneurs qui les déposent cherchent une validité économique et non scientifique. Il suffit que l'expérience prouve la bonne cohésion des matières pour que l'emploi du matériau se généralise. Progressivement l'expérience donne lieu à la constitution de tableaux et d'abaques empiriques qui permettent aux premiers bureaux d'étude de béton armé de travailler. C'est en particulier le cas chez Hennebique, qui s'appuie principalement sur des abaques expérimentaux. Ce n'est qu'aux alentours de 1890 que les ingénieurs commencent à investir le champ du béton armé en cherchant à définir les outils de son calcul. Symboliquement, Charles Rabut inaugure le premier cours de béton armé à l'école des Ponts et Chaussées à Paris en 1897. Puis deux livres théoriques importants paraissent en 1902 : *Le béton armé et ses applications* de Paul Christophe et *La construction en ciment armé* de Berger et Guillerme.

Normalisation

Le tournant du siècle est donc un moment majeur du développement du matériau : on commence à le comprendre, à pouvoir le calculer. L'exposition universelle de 1900 à Paris est le lieu de sa consécration et son image évolue.

Après la Première Guerre mondiale, les brevets de plusieurs systèmes constructifs passent dans le domaine public. D'un ensemble de systèmes

constructifs attachés au nom de leur inventeur, le béton armé devient un matériau anonyme et son emploi se généralise selon les deux grandes familles techniques : la dalle pleine issue du système Monier d'une part et le système de poutraisson issu du système Hennebique d'autre part.

La production de ciment suit cette évolution : en 1899, la production française est 20 fois plus importante qu'en 1850 et atteint presque 1 150 000 tonnes avec un produit de meilleure qualité. En 1938, la production a encore triplé.

Sur le plan technique, la démolition des pavillons de l'exposition universelle de 1900 est l'occasion d'étudier le matériau. La commission qui réalise cette étude conduit à l'adoption, en 1906, de la première réglementation sur le béton armé. L'absorption de la technique du béton armé par l'appareil réglementaire consacre sa reconnaissance : il devient une technique normalisée, donc « normale ». En France, la structure poteau/poutre est alors préférée au voile.

Dans les années 20 et 30 deux approches s'opposent : celle des architectes traditionalistes (majoritaires), qui utilisent le béton comme un moyen technique neutre et laissent à l'entreprise le soin de fixer l'emplacement des points porteurs qui seront finalement cachés et celle des architectes novateurs, qui utilisent la structure pour jeter les bases d'une esthétique nouvelle.

Pour ces derniers, le béton va devenir un matériau fétiche, le symbole de la modernité. Avec eux, le béton devient un enjeu majeur du renouvellement de l'architecture qui focalise les enjeux esthétiques et doctrinaux des différents courants : le béton « libère » le plan et « libère » les formes... (voir le chapitre « Le béton des architectes »)

Une évolution technique permanente

Mais si le béton armé est mieux connu et mieux compris après 1900, cela ne veut pas dire qu'il est figé. Le béton continue d'évoluer en permanence et le béton armé fait l'objet d'innombrables perfectionnements tant dans sa composition que dans sa mise en œuvre.

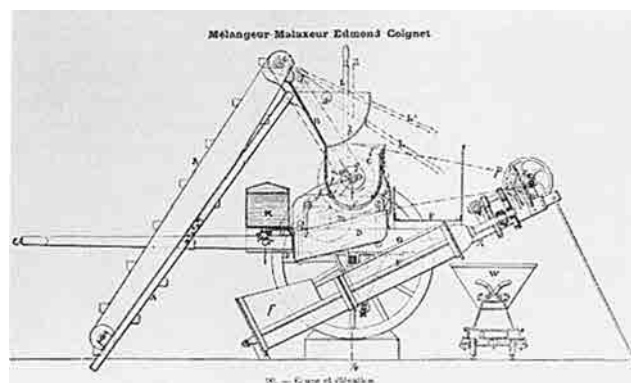
L'industrie cimentière augmente régulièrement sa productivité mais aussi la qualité de ses produits, à mesure que naissent de nouvelles inventions : four rotatif, broyeurs à boulet, etc.

Composition : l'enjeu des adjuvants

On cherche en particulier à introduire des adjuvants dans la composition du béton pour agir sur son temps de prise, sur ses caractéristiques mécaniques, sur son étanchéité ou sa mise en œuvre. Dès 1881, Candlot étudie l'action des accélérateurs et des retardateurs de prise. Le sucre est employé à partir de 1909. Vers 1930, les entraîneurs d'air et les antigels sont fréquemment utilisés. On cherche aussi à renforcer le béton par l'incorporation de fibres. (De telles pratiques existent dans les techniques traditionnelles : le pisé se compose d'un mélange de terre et de paille). Un brevet pour l'amiante-ciment est déposé en 1902 et les premiers emplois de fibres d'acier interviennent vers 1923. Quant aux fibres de verre, elles feront l'objet d'incorporation au béton vers 1950.

Faciliter la mise en œuvre

Les outils de la mise en œuvre évoluent aussi selon un double objectif : la simplifier et parvenir à une qualité industrielle. La bétonnière, comme le mélangeur malaxeur d'Edmond Coignet en 1898, régularise les brassées et homogénéise la pâte du béton. Dans ce but, des centrales à béton qui



Edmond Coignet, ingénieur, mélangeur-malaxeur, 1898.



Ernst May, architecte, lotissement Praunheim à Francfort, 1926-1930.

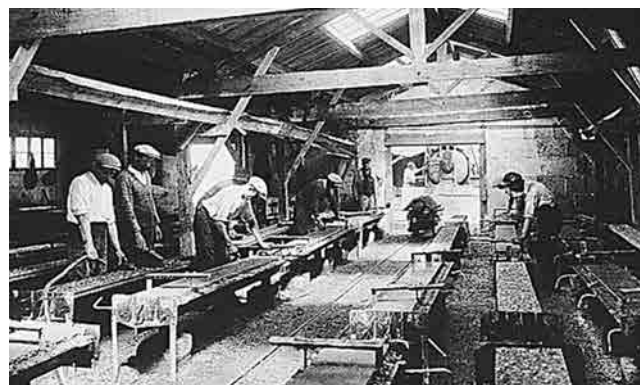
produisent de manière industrielle un béton prêt à l'emploi transporté ensuite sur le chantier par des camions malaxeurs pour garantir délais et qualité, apparaissent dès le début du siècle aux États-Unis et en Allemagne. Elles sont introduites en France vers 1933.

La préfabrication

La préfabrication, qui évite les coffrages sur le chantier et assure la qualité des objets, est aussi un des axes importants des recherches.

La création d'éléments préfabriqués, poutres, éléments de plancher, permettant une mise en œuvre sans coffrage ni étalement, apparaît très tôt. En 1891, Edmond Coignet semble être le premier à développer la préfabrication pour des poutrelles

lors de la construction du casino de Biarritz. En 1896, Hennebique réalise les premières maisons préfabriquées en série destinées aux gardiens des voies ferrées. L'échelle véritablement industrielle est atteinte entre 1925 et 1930 lorsque Ernst May utilise la préfabrication pour réaliser d'importants quartiers de logements sociaux à Francfort et que Walter Gropius, avec le Bauhaus qu'il dirige, construit un lotissement préfabriqué à Dessau, à partir de 1925.



*Eugène Beaudouin et Marcel Lods, architectes.
Cité de la Muette à Drancy, 1931-1934, chantier de préfabrication.*

En France, Eugène Beaudouin et Marcel Lods sont les premiers à appliquer ce principe à grande échelle lors de la réalisation des deux premiers « grands ensembles » : la Cité du Champ des Oiseaux à Bagneux et la Cité de la Muette de Drancy au début des années 30. Dans ces projets, les murs sont composés de panneaux de béton préfabriqués montés sur une ossature métallique.

Le béton des architectes

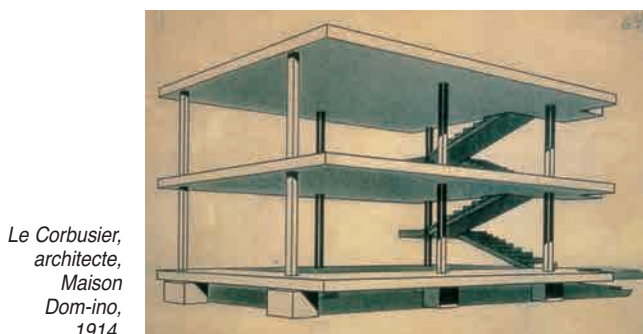
Jusqu'au début du ^{xx}^e siècle, le béton est un matériau de substitution, un matériau utile, économique, employé principalement pour les fondations, les canalisations et les bâtiments industriels : usines, hangars, silos. Au cours de la dernière décennie du ^{xix}^e siècle, son emploi dans les structures d'immeubles reste caché sous des revêtements de pierres ou de briques ; ou bien encore, il mime la pierre qu'il remplace, avec une certaine efficacité d'ailleurs.

La plupart des architectes considèrent alors que c'est un matériau laid qui ne peut se montrer que dans les édifices utilitaires. Au congrès des architectes de Londres de 1909, on conclut encore que : « si (son) aspect indigent ne convient guère aux façades, il peut devenir un matériau d'avenir pour réaliser d'une façon économique l'ossature des habitations à bon marché ».

Ce n'est qu'aux alentours de 1900, que les architectes commencent à s'approprier le matériau en posant la question d'une esthétique spécifique, qui ne soit pas une simple réplique du passé.

La maison Dom-ino : une rupture

Moulable, monolithique, le béton armé n'a pas de forme *a priori*. Conçue en 1914 après les premières destructions de la Grande Guerre par Charles-Édouard Jeanneret – qui ne s'appelle pas encore Le Corbusier –, la maison Dom-ino exprime bien l'indétermination esthétique du béton.



Le Corbusier,
architecte,
Maison
Dom-ino,
1914.

C'est un projet de construction préfabriqué reposant sur trois éléments : poteaux, plancher (poutrelles et hourdis) et escalier. Pas de façade, pas d'enveloppe. Dom-ino n'est pas encore de l'architecture, c'est une mise à plat pour un renouvellement constructif, l'affirmation d'une rupture architecturale.

Ce type d'ossature n'est pas totalement innovant : on la trouve par exemple dans un projet présenté en 1906, par Augustin Rey, architecte lauréat du concours HBM de la Fondation Rothschild à Paris. Mais ce que Le Corbusier ajoute, c'est l'idée fondamentale de la « liberté » du plan : la façade et le cloisonnement deviennent indépendants de l'ossature.

Un imaginaire très libre

L'imaginaire plastique du béton va donc être très libre et s'appuyer sur des concepts abstraits : la masse, les forces, la structure, la compacité, etc.

Les voies formelles sont largement ouvertes : il n'y aura pas une voie esthétique unique, mais un faisceau de doctrines plastiques qui, toutes, exploitent les qualités techniques du béton armé et qui toutes revendiquent le fait d'être l'expression plastique du matériau.



Anatole de Baudot,
architecte,
projet de grande halle,
1914.

Rares sont alors les architectes qui, comme Anatole de Baudot dès 1894 lors de la construction de l'église Saint-Jean-de-Montmartre à Paris, ou Tony Garnier pour son projet théorique de Cité industrielle en 1901, ou encore Auguste Perret et Henri Sauvage dans des immeubles parisiens en 1903

(respectivement au 25 bis rue Franklin et 7, rue de Trétaigne) tentent de donner au béton une expression plastique propre. Dans la plupart des bâtiments, le béton se cache encore ou se moule dans les habits d'autres matériaux. La « pierre artificielle » cherche à faire illusion. Elle imite les styles et les matériaux : faux marbre, faux appareillage. Elle se travestit même en fausse ruine comme au château « médiéval » construit en béton armé en 1904 par les frères Pauchot et qui copie fidèlement les éboulis d'un château du Bordelais.

D'ailleurs, même un ardent défenseur du matériau comme L.C. Boileau, reste prudent quand il s'agit d'esthétique, puisqu'il affirme que si « le béton est tout à fait utile pour les structures et les bâtiments purement fonctionnels, pour les « édifices un peu artistiques » il faut trouver des formes discrètes ce qui ne semble pas facile avec une matière qui se présente en masse et en surface ». Il faudra encore quelques années pour que le béton découvre toute son expression architecturale.

Intégration à la doctrine du rationalisme constructif

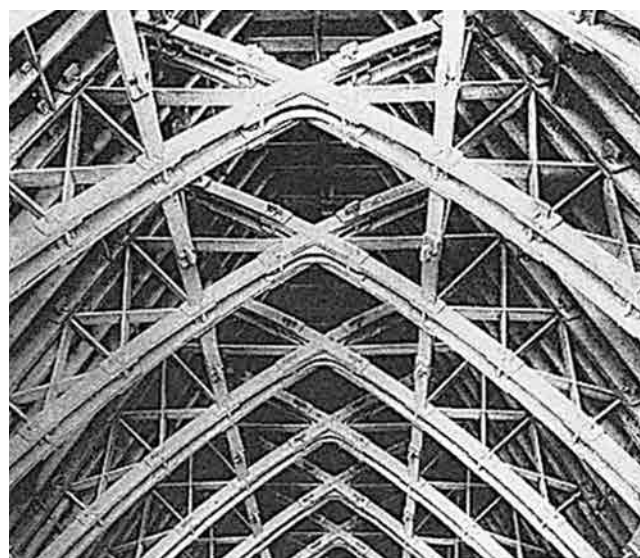
La première recherche plastique spécifique sur le matériau est celle d'Anatole de Baudot que nous avons déjà évoquée. De Baudot s'empare du système Cottancin pour l'intégrer à la doctrine rationaliste, qui vise à mettre en scène la construction, la descente des charges, le fonctionnement statique du bâtiment. Pour de Baudot, le béton armé permet de refonder l'architecture rationaliste.

Après les aléas du chantier de l'église Saint-Jean de Montmartre, Anatole de Baudot n'aura plus de commande. Mais il continue à travailler activement à la diffusion du ciment armé à travers des projets de papier et surtout, il utilise sa chaire d'Histoire de l'architecture française à l'école de Chaillot qui forme les architectes des Monuments Historiques, pour répandre ses théories. C'est ainsi que, malgré sa complexité de mise en œuvre et le fait que son hétérogénéité le rende presque incalculable, le

système Cottancin continue d'être utilisé par un petit noyau d'anciens élèves d'Anatole de Baudot, en particulier dans la restauration de monuments historiques. Vers 1905-1910, une école rationaliste du ciment armé existe, composée d'une dizaine d'architectes. Beaucoup de ces architectes font leur carrière dans l'administration, ce qui explique leur faible présence dans les histoires de l'architecture même si quelques projets voient effectivement le jour.

Le béton armé au service des monuments historiques

Henri Deneux (1874-1969) utilise ainsi le système de ciment armé pour la reconstruction de la charpente de la cathédrale de Reims après la première guerre mondiale : il met au point une charpente composée de petits éléments préfabriqués en béton selon un système inventé par l'architecte de la renaissance Philibert Delorme (ou de l'Orme / 1510-1570).



Henri Deneux, architecte.
Charpente en ciment armé, cathédrale de Reims, années 1920,
interprétation d'un système inventé par Philibert de l'Orme (1510-1570).

La scénographie structurelle de l'école rationaliste : Émile Dubuisson et François Le Cœur

Les préoccupations rationalistes de mise en scène structurelle se retrouvent dans différentes réalisations des anciens élèves de Baudot, comme dans l'hôtel de ville de Lille qu'Émile Dubuisson (1873-1947, père de Jean Dubuisson) construit à partir de 1922.

Mais la figure la plus connue et la plus marquante de cette mouvance est celle de François Le Cœur (1872-1934) qui, dès ses premiers projets, en 1904, utilise le ciment et la brique armée du système Cottancin. D'abord discret, le béton émerge progressivement au fil de ses œuvres. Architecte de la poste, il réalise de nombreux projets. Dans l'annexe du Ministère des Postes, rue Martignac à Paris, qu'il bâtit en 1907, la façade est encore en brique enfilée. Dans le central téléphonique de la rue du temple à Paris (1919-21), la brique a totalement disparu. Les allèges situées entre la double ordonnance de montants verticaux sont traitées en ciment moucheté avec projection à la truelle de bâtons rompus.

Dans sa dernière œuvre, le lycée Camille-Sée à Paris, bâti en 1934, Le Cœur poursuit ses recherches sur la texture en introduisant dans les granulats des grains de granit rose et de marbre pour modifier la couleur du béton bouchardé. Il faut souligner la cohérence de la démarche vis-à-vis du matériau, qui s'applique à tous les détails, des façades aux espaces intérieurs. La toiture est composée de dalles de ciment, indépendantes, répondant au problème de la dilatation. Ce projet voit aussi pour la première fois l'introduction d'un escalier mécanique à l'usage des élèves.



François Le Cœur, architecte, lycée Camille Sée, Paris, 1934.



Emile Dubuisson, architecte, Hôtel de ville de Lille, 1922.



François Le Cœur, architecte, central téléphonique rue du Temple, Paris, 1919.



Auguste Perret (1874-1954) entrepreneur et architecte

Comme le dit le jeune Le Corbusier, Auguste Perret, entrepreneur et architecte, « fait du béton armé ». Il adopte une démarche proche de celle de François Le Cœur en développant un rationalisme structurel qui le conduit à la création d'un vocabulaire formel classique, modernisé et français, spécifique au béton armé. Dans l'immeuble de la rue Franklin à Paris, qu'il construit en 1903, Perret met en valeur les formes de la structure. Mais il cache la texture du béton sous des carreaux de céramique dont les motifs floraux rappellent l'influence de l'Art nouveau.

L'approche du rationaliste constructif est très lisible dans les projets d'église, comme celle de Notre-Dame-de-la-Consolation au Raincy en 1922-1923.



Auguste Perret, architecte,
Notre-Dame de la
Consolation, Le Raincy,
1923.

Le nouveau classicisme naît à l'occasion de la construction du théâtre des Champs-Élysées en 1911-1913. Appelé comme entrepreneur spécialiste du béton armé par l'architecte Henri van de Velde, Perret prend du poids dans la conception et transforme le projet à l'occasion de son adaptation au matériau. Le béton est partout : piliers, colonnes, caissons, plafonds, planchers, balcons, tout est en béton armé. Il compose l'espace autant qu'il soutient le bâtiment. C'est une des premières « performances » architecturale du béton armé : à la fois statique, distributive et décorative, sauf pour les façades couvertes de pierre.



Henri Van de Velde,
architecte, Auguste
Perret, entrepreneur,
Théâtre des
Champs-Élysées,
Paris, 1911-1913.

À partir de ce projet, tous les équipements et logements construits par Perret porteront cette empreinte : les services techniques des Constructions navales du ministère de la Marine (1928-1931), boulevard Victor à Paris 15^e, l'immeuble de la famille Perret, 51-55, rue Raynouard à Paris (1928-1930), le garde-meuble du Mobilier National à Paris, 1, rue Barbier-du-mets à Paris (13^e), bâti en 1935-1936 ou encore le musée des Travaux publics (actuel Conseil économique et social, avenue d'Iéna, à Paris) réalisé entre 1936 et 1946.



Auguste Perret, architecte,
Musée des Travaux publics,
Paris, 1936-1946.



Auguste Perret, architecte,
usine Esders, Paris.



Tous ces projets sont des exemples de la réinterprétation du vocabulaire classique à partir des potentialités du matériau béton : Perret ne copie pas les éléments classiques, il les interprète. Il adapte les schémas spatiaux classiques aux nouvelles données structurelles, mais n'imité pas le vocabulaire de la pierre et invente un vocabulaire architectonique propre au béton fait d'éléments préfabriqués (les claustras) ou bouchardés (chapiteaux). Il travaille sur la forme des chapiteaux, sur les caissons de plafonds, les baies, etc., et explore toutes les potentialités du béton, y compris au niveau de sa texture, afin de lui donner ses lettres de noblesse.

L'ossature comme expression esthétique

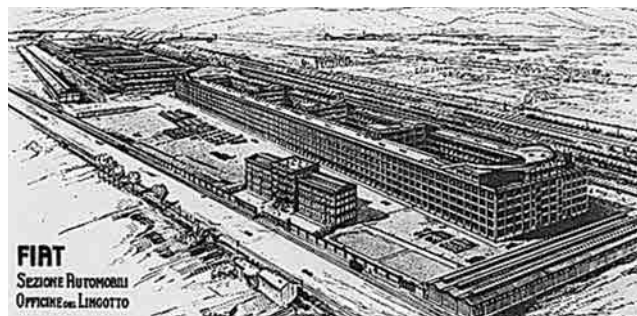
Parallèlement à l'insertion du béton armé dans les doctrines antérieures (rationalisme et classicisme), le rationalisme structurel va prendre une forme plus radicale, celle d'un expressionnisme de l'ossature qui magnifie la vérité constructive du bâtiment.

La mise en valeur de l'ossature peut prendre deux formes principales : soit une mise en valeur directe de la structure qui compose la façade, soit par sa mise en valeur derrière une façade entièrement vitrée qui joue le rôle de vitrine.

La mise en scène de la structure

Ce choix plastique est relativement courant dans le domaine des programmes industriels où la mise en valeur de la structure devient une des constantes de l'architecture industrielle considérée comme fonctionnelle (l'usine de chaussures construite par Hennebique à Boston en est un bon exemple). C'est ainsi que la structure est souvent le seul ornement de la façade de nombreux bâtiments de production. Cette solution plastique peut s'étendre à toute la définition spatiale, comme en témoignent les projets des frères Perret pour le garage Ponthieu à Paris en 1907 ou l'usine Esders en 1919.

L'un des exemples les plus symboliques de cette approche est celui de l'usine Fiat du Lingotto à



Mattè Trucco, ingénieur
Usine Fiat du Lingotto,
Turin, 1926.

Autodrome
de l'usine Fiat.

Turin construite par Mattè Trucco en 1926-1928 où les façades ne sont composées que de la grille plancher/poteau, et font l'objet d'un remplissage largement vitré. Ce bâtiment a valeur de symbole de la nouvelle architecture et fut très visité, en particulier par Le Corbusier qui s'inspirera de sa piste d'essai sur la toiture pour les projets urbains qu'il développera dans les années trente et quarante à Alger ou à Rio de Janeiro.

Mais ce principe développé naturellement par certains ingénieurs de la fin du XIX^e siècle, va être théorisé par Walter Gropius qui, en 1910, réfléchit sur l'usine moderne et érige dans ses articles ce principe en précepte théorique et esthétique.

Dans l'usine Fagus, qu'il réalise avec Adolf Meyer, la grande façade vitrée améliore les conditions de travail des ouvriers mais surtout, constitue une vitrine qui met en scène la structure béton de l'escalier à l'intérieur du bâtiment.



Walter Gropius
et Adolf Meyer,
architectes,
usine Fagus à Alfeld,
Allemagne, 1910.



J.A. Brinkman et
L.C. Van der Vlugt,
architectes,
usine Van Nelle,
Rotterdam,
Pays-Bas.



Owen Williams,
architecte,
manufacture de
chaussures à Beeston,
Grande-Bretagne, 1932.



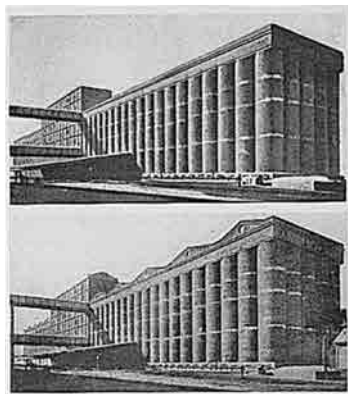
Frank Lloyd Wright, architecte,
immeuble Johnson à Racine,
USA, 1936.

Une nouvelle esthétique apparaît. Ce principe d'une transparence révélant l'ossature va se développer et se répandre. Par exemple dans l'usine Van Nelle de J.A. Brinkman et L.C. Van der Vlugt à Rotterdam en 1926-1930 ou dans la manufacture de chaussures d'Owen Williams à Beeston, en Angleterre, en 1930-1932. Dans cette dernière, les planchers champignons expriment clairement le monolithisme du béton. On retrouve également ce principe dans le siège social Johnson que Frank Lloyd Wright bâtit entre 1936 et 1939 à Racine, USA.

Une dizaine d'années plus tard, Le Corbusier demande à Gropius ses photos pour illustrer les articles polémiques qu'il publie dans la revue *l'Esprit Nouveau* vers 1920 (repris en 1923 dans le livre *Vers une architecture*). Il retouche les photos afin de supprimer les malencontreux frontons que les ingénieurs américains avaient cru bon d'ajouter pour la décoration et transforme ces silos en modèles non plus d'architecture industrielle mais universels. Ce faisant, il traduit une évolution en cours : l'architecture nouvelle va exploiter l'esthétique dépouillée de l'architecture industrielle et emprunter ses principes de simplicité formelle, de transparence et de vérité constructive.

Le modèle des silos

Pour expliciter ses articles visant à régénérer les formes de l'architecture industrielle, Walter Gropius demande, vers 1913, à un architecte canadien de lui envoyer les images des silos en béton armé pour illustrer sa nouvelle conception de l'usine.



Silos américains, publié
par Gropius en 1914 (en bas)
et Le Corbusier en 1923
(en haut).

Henri Sauvage, rue de Trétaigne

Cette approche est développée par certains architectes alors très en pointe. C'est ainsi qu'en 1903, alors que pour le célèbre immeuble de la rue Franklin, Auguste Perret masque encore l'ossature béton sous une peau de céramique, Henri Sauvage réalise un immeuble très sobre, au 7, rue de Trétaigne, à Paris (18^e), dans lequel l'ossature en béton apparaît en façade, clairement distinguée des remplissages de briques. Cette solution, hardie sur le plan esthétique, se retrouve dans certains dessins d'immeubles d'habitation de la Cité industrielle de Tony Garnier qui ne furent pas construits.



Louis Bonnier, architecte, piscine de la Butte-aux-Cailles, Paris, 1920.

Un principe qui se développe dans les nouveaux programmes

Ces concepts innovants vont se répandre dans d'autres programmes. Dans le logement social, mais aussi dans les nouveaux types d'équipements urbains, tels que la piscine de la Butte-aux-Cailles à Paris, construite par Louis Bonnier en 1920-1924, qui utilise des arcs rappelant fortement ceux de l'usine Esders. Ou encore à Berlin, où Mies van der Rohe conçoit en 1922 un projet de gratte-ciel dont la transparence totale met en valeur la forme libre des planchers et la structure composée d'épais poteaux très en retrait. Pour les nouveaux bâtiments de l'école du Bauhaus, qu'il réalise en 1925 à Dessau, Gropius reprend et développe à l'ensemble de la structure le principe inauguré à l'usine Fagus. Dans l'école de plein air qu'ils édifient en 1930 à Amsterdam, Duiker et Bijvo utilisent la structure des poutres consoles pour affirmer la continuité spatiale et pédagogique entre intérieur et extérieur.

Dans tous ces bâtiments, l'ossature a une fonction plastique majeure. Elle ordonne les façades mais aussi l'espace selon sa géométrie stricte et rationnelle (objective) et lui impose son rythme et son esthétique.

« L'esthétique du calcul » ou le « vrai langage » du béton

Mais pour d'autres acteurs, la « vérité constructive », élément essentiel du rationalisme constructif et qui, pour John Ruskin est la seconde de ses « sept lampes de l'architecte », ne se résume pas à la révélation de la structure. Quelques architectes et beaucoup d'ingénieurs pensent que la structure n'est pas seulement esthétique, mais qu'elle doit exprimer la vérité du calcul. Ils se reconnaissent dans l'idée que les formes « naturelles » du béton armé ne peuvent provenir que de la logique et du calcul.

Cette vision va générer un langage des fonctions mécaniques et produire des bâtiments illustrant parfaitement le fait que, selon la définition d'Antoine Picon, « le rationalisme structurel est tout d'abord lié à l'idée d'une économie de matière et de moyens permettant de mettre en évidence les données essentielles de la construction, les articulations, la circulation des forces qu'un surdimensionnement tend à masquer ». Couvrir toujours plus avec le moins de matière possible. La recherche d'une structure minimale hante de nombreux concepteurs et la modélisation mathématique qu'elle suscite passe alors pour le vrai langage du béton armé.

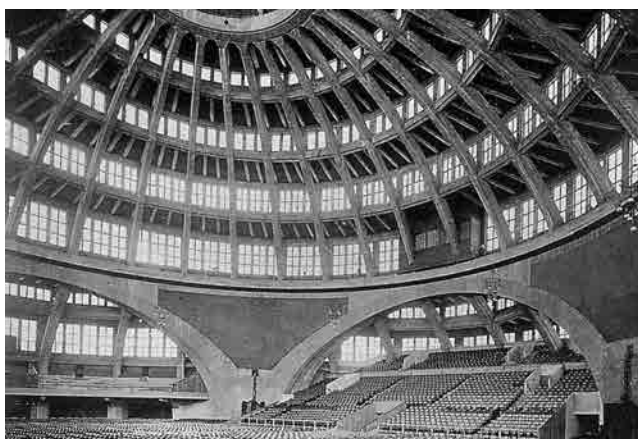
Les ouvrages d'art: franchir plus avec moins de matière

Cette expression de la vérité du calcul se traduit parfaitement dans les projets d'ouvrages d'art, où la portée est essentielle. L'ingénieur suisse Robert Maillart (1872-1940), inventeur du plancher champignon, en réalise de nombreux en béton armé. La finesse des lignes tendues lui permet de révéler le paysage, comme au pont de Salginatobel de 1929.

Inventeur du béton précontraint (en 1933), Eugène Freyssinet (1879-1962) utilise aussi le béton armé pour les franchissements et augmente les portées, cherchant à repousser les limites du matériau, comme au pont sur l'Elorn à Plougastel en 1926-1929 qui comporte trois travées de 172 m.

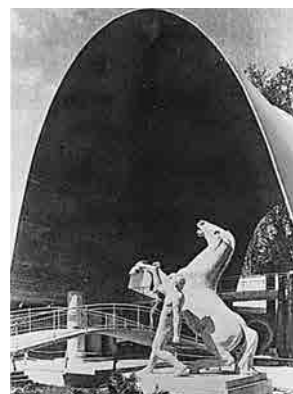
Les coques, bâtiments high-tech des années 30 à 50

L'esthétique de la « vérité du calcul » s'applique aussi au bâtiment. Le premier monument qui l'applique est la halle du siècle à Breslau (Pologne) conçue par Max Berg et les ingénieurs Trauer et Konwiarz en 1913. C'est une vaste coupole circulaire de 65 m de portée, supportée par cinq piliers



Max Berg, Halle du siècle, Breslau, 1913.

Robert Maillart, ingénieur,
pavillon du ciment,
Zurich, Suisse, 1939.



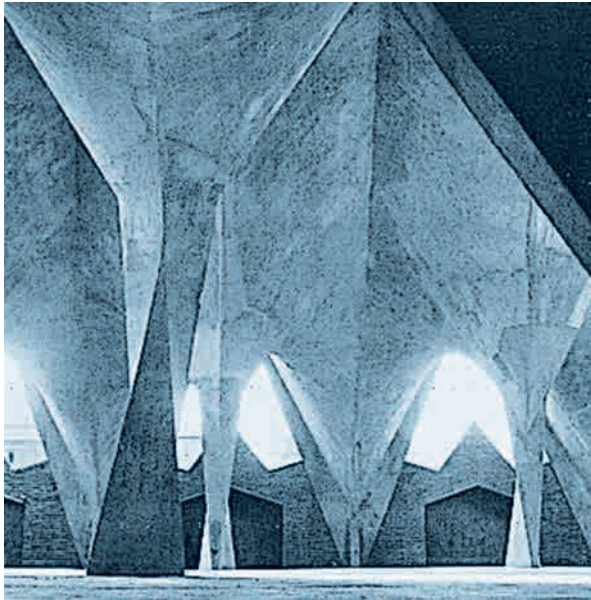
Annibale Vitellozzi, architecte,
P.L. Nervi, ingénieur,
Petit palais des sports,
Rome, 1957.



Basilique de Lourdes, Pierre Vago, architecte,
Eugène Freyssinet, Ingénieur.



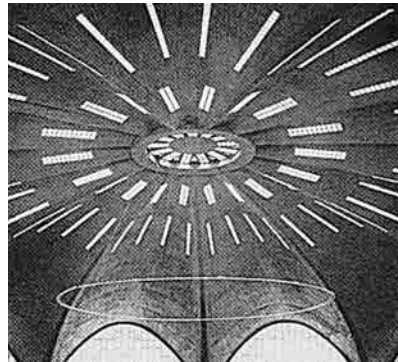
massifs en forme de pendentifs dont les arcs accueillent des gradins. Mais ce bâtiment reste proche de l'expressionnisme structurel par sa morphologie et son ossature. Ce sont les voiles et les coques qui, exprimant instantanément le monolithisme du béton armé et l'inexistence des problèmes de liaison, illustrent le mieux cette « esthétique du calcul ». La coque en voile mince devient d'ailleurs le symbole de la perfection mécanique et matérielle, le « high-tech » de l'époque. Quelques exemples illustrent bien la qualité plastique de ces nouveaux projets: la couverture de l'hippodrome de Madrid en 1935 de Torroja, qui met en œuvre des voûtes minces; le pavillon du béton, par Maillart, à l'Exposition Nationale Suisse à Zurich en 1939; le Palazzetto des sports de Pier Luigi Nervi à Rome ou encore à Mexico, l'église de Felix Candéla qui suit un chemin



*Felix Candela,
ingénieur,
église de la
Vierge
miraculeuse,
Mexico, 1954.*



*Louis Simon,
André Morisseau,
architectes,
René Sarger, ingénieur,
marché de Royan, 1955.*



très poétique dans lequel les coques et voiles tiennent une place importante et qui bâtit toute son œuvre sur ces recherches. C'est vrai aussi du marché de Royan de Louis Simon, André Morisseau et René Sarger et bien entendu de la structure de la basilique Saint-Pie, pour laquelle l'architecte Pierre Vago met en concurrence Nervi et Freyssinet, qu'il choisit finalement.

Une démarche intuitive et inspirée, mais attentive aux questions de mise en œuvre

Cependant, il faut souligner que calcul ne veut pas dire démarche absolument scientifique. En effet, la démarche de la plupart de ces ingénieurs (Freyssinet, Maillart, Torroja, Nervi, Esquillan ou Candela) partait d'une vision intuitive du comportement global de l'ouvrage et du cheminement des efforts, puis vérifiait par le calcul et sur des maquettes cette première formalisation. Pendant longtemps en effet, le calcul des voiles et des coques reste d'ailleurs sujet à caution et fait l'objet de vérifications empiriques sur maquette.

Mais, la limite de la liberté formelle offerte par le béton est celle de sa mise en œuvre. Lorsque les formes induisent une trop grande complexité des coffrages, le bâtiment devient coûteux donc peu rationnel. C'est pourquoi les ingénieurs introduisent dans leur raisonnement formel la question de la logique constructive.

Ainsi, le CNIT de la Défense, conçu par les architectes De Mailly, Zehrfuss et Camelot sera réalisé par l'entreprise Boussiron et son ingénieur, Nicolas Esquillan saura transcrire le trait de crayon en un exploit structurel qui se rapproche de la problématique des ouvrages d'art, mais qui est basé sur la conception d'un coffrage répétitif dans les différentes travées.



*De Mailly, Camelot, Zehrfuss, architectes,
Nicolas Esquillan, ingénieur, voûte du CNIT, 1957.*

Libertés formelles

À l'opposé de ces recherches intuitives mais validées par le calcul et encadrées par une réflexion sur la mise en œuvre, les architectes modernes se saisissent du béton armé et explorent la liberté formelle et spatiale totale qu'il semble apporter grâce à ses performances techniques.



*Hans Scharoun,
architecte,
villa Schminke
à Löbau,
Allemagne,
1933.*

*Le Corbusier et
Pierre Jeanneret,
architectes,
villa Savoye
à Poissy, 1929.*



Parmi ces dernières, l'une des plus importantes est le porte-à-faux qu'il autorise. Alors qu'auparavant, le porte-à-faux n'existait que grâce à d'ingénieux et progressifs débords, le béton lui confère une liberté toute nouvelle qui transforme la valeur du plan horizontal dans l'espace : il n'a plus besoin de reposer sur des assises solides et bien visibles, mais peut « flotter ».

Une nouvelle hiérarchie architectonique

Le plan horizontal n'est plus un problème constructif, c'est un choix plastique. Dans cette optique, les notions de gravitation ou de descente des charges n'ont plus de valeur : la lisibilité du parcours des forces, thème récurrent du rationalisme viollet-le-ducien n'est plus signifiante. Les raisons de la solidité se nouent dans l'opacité du ciment et non dans l'agencement des éléments d'architecture. Dans cette seule possibilité de tenir en équilibre par l'infime épaisseur de la dalle, le plan horizontal devient équivalent à la paroi verticale. Ainsi, le porte-à-faux permet de « casser la boîte », de déstructurer les volumes.

Ce qui est intéressant pour les architectes de l'époque, c'est que cette possibilité va permettre, avec seulement dix ans de décalage, de rapprocher l'architecture des révolutions formelles qui touchent les arts plastiques au début du siècle et de relier le nouveau langage plastique du béton aux recherches des avant-gardes artistiques.

Cubisme et purisme

Au travers du Purisme inventé par Le Corbusier, le cubisme va trouver une prolongation dans cette architecture géométrique et pure. Désormais le plan est libre, les toitures sont plates et plantées, les volumes « flottent », posés sur de fins pilotis car, selon Le Corbusier : « Le ciment armé nous donne les pilotis. La maison est en l'air, loin du sol ; le jardin passe sous la maison ». La façade perd sa fonction porteuse, les baies peuvent s'étendre, s'allonger sur toute la façade.

Décomposition néoplasticiste de De Stijl

La strate horizontale est découverte par les architectes modernistes européens lorsque Frank Lloyd Wright présente ses travaux en Europe vers 1910. L'école hollandaise d'Hilversum développe des bâtiments néowrightiens basés sur un dialogue fort entre vertical et horizontal. Mais dans les années vingt, le néo-plasticisme du mouvement De Stijl, avec ses décompositions géométriques, développé par les peintres Mondrian et Van Doesburg, a un grand impact sur les architectes.

Gerit Rietveld, qui s'inscrit dans ce mouvement, va réaliser la maison Schröder en 1924 selon ces préceptes formels. Pourtant, malgré les apparences, pour des raisons économiques – de coffrage – cet

édifice est largement réalisé en maçonnerie traditionnelle, le béton armé n'étant utilisé que pour les éléments où il est indispensable.

Mais la voie est ouverte et les maisons construites par Rudolf Schindler à Los Angeles dans les années 30 l'empreint, à travers une architecture où le béton est utilisé en permanence pour mettre en œuvre ce principe de décomposition.

Expressionnisme formel

D'autres architectes s'inscrivent dans une vision formelle très libre que l'on peut rattacher à l'expressionnisme pictural. C'est l'exploitation des capacités sculpturales du béton. Les « architectes sculpteurs » profitent de la liberté technique du béton pour inscrire le geste du crayon dans le bâti.

L'un des plus célèbres monuments illustrant cette approche est la tour Einstein qu'Erich Mendelsohn réalise à Potsdam en 1920-1924, version sculpturale et expressionniste de l'architecture blanche, mouvement figé dans le béton. Ce bâtiment fut considéré par les modernistes comme le symbole de la liberté offerte par le béton armé. Ludwig Hilberseimer y voyait « la réalisation très originale d'un essai de déduction de l'aspect architectural du matériau, faisant en quelque sorte naître la forme plastique elle-même à partir du matériau ». Mais ce symbole de la liberté formelle du béton fut lui aussi bâti en maçonnerie de brique recouverte d'un enduit car la mise en œuvre du béton était trop complexe.

Pourtant, comme la villa Schröder, ce bâtiment ouvre la voie et les bâtiments qui suivent sont bel et bien construits en béton. Ainsi le Gothéanum

près de Zurich, reconstruit en 1928 par Rudolf Steiner, met en œuvre un béton lourd, opaque, qui trouve une expression presque mystique dans ses formes expressionnistes. Traité comme de la pierre, le béton semble taillé comme un silex. De même, l'usine de chapeaux Friedrichs Steinberg, également construite par Erich Mendelsohn en 1921-1923, marie l'expressionnisme structurel intérieur et l'expressionnisme formel du volume extérieur. Le terminal de la TWA à New York, de Eero Saarinen, est également une illustration très aboutie de cette recherche. Enfin, la plupart des projets d'Oscar Niemeyer sont issus de cette vision.



*Gerrit Rietveld, architecte,
Maison Schröder à
Utrecht, Pays-Bas, 1924.*



*Rudolf Schindler, architecte,
Maison Mc Almon, Los Angeles,
USA, 1935.*



*Rudolf Steiner, architecte,
Goetheanum 2, Dornach,
Bâle, Suisse, 1928.*



*Erich Mendelsohn, architecte,
Tour Einstein, Potsdam, 1920.*



*Erich Mendelsohn, architecte,
usine de chapeaux
à Luckenwalde, Allemagne, 1921.*



Oscar Niemeyer, architecte,
église Saint François d'Assise,
Pampulha, Brésil, 1943.

Des formes libres mais difficiles à mettre en œuvre

L'anecdote de la réalisation de la tour Einstein est significative des limites de ces recherches plastiques : si le béton peut prendre toutes les formes, sa mise en œuvre peut être complexe et coûteuse. Les banches ont du mal à suivre le geste de la main, le trait du crayon qui, au contraire des calculs des ingénieurs, intègre très rarement la mise en œuvre. Les coffrages qui permirent de réaliser Brasília ou Ronchamp se composèrent bien souvent d'assemblages hasardeux, bricolages cloués, collant avec difficulté au dessin du maître. C'est au bout de longues cordes, presque en rappel comme les alpinistes, que les ouvriers coulaient le béton de la grande vasque concave du palais de Brasília.

Textures et vérité constructive

Les recherches de ces architectes modernistes, leur volonté d'abstraction est intéressante et novatrice, mais, sur certains plans, sont en retrait par rapport aux travaux d'Auguste Perret ou de François Le Coeur. C'est ainsi que la texture n'est pas considérée comme un enjeu du matériau.

Dans un premier temps, le potentiel de textures est généralement oublié par de nombreux architectes



Eero Saarinen, architecte,
terminal de la TWA, Kennedy
Airport, New-York, 1956.

qui rêvent de volumes purs, blancs, abstraits. Certains apôtres de la vérité constructive sont obligés de tricher en masquant les murs de bétons sous la peau d'enduits, de ragréages et de peintures.

Il arrive, nous l'avons vu, que, pour la commodité du chantier ou son économie, ces symboles de l'architecture de béton soient construits en maçonnerie traditionnelle, le béton n'étant employé que dans les planchers et porte-à-faux avec lesquels on ne peut tricher.

Pourtant, quelques architectes modernistes explorent les potentialités plastiques de la matière béton. Eugène Beaudouin et Marcel Lods, pour l'École de plein air de Suresnes ou pour les ensembles de logements qu'ils réalisent à Bagneux et Drancy, utilisent des panneaux préfabriqués qui montrent les capacités du matériau à offrir des textures originales. Frank Lloyd Wright pousse très loin les recherches sur la texture du béton : il parle du béton comme d'une masse inerte « qu'il faut constituer en un milieu plastique [...] susceptible de recevoir l'empreinte de l'imagination ». Il introduit le béton apparent jusque dans les salles à manger de l'Hôtel Impérial de Tokyo (1922). Et, cherchant à tisser les



Frank Lloyd Wright, architecte, maison Freeman, Los Angeles, USA, 1922.

cultures et les matériaux dans des projets d'inspiration précolombienne, comme la maison Millard à Pasadena (1923) ou la maison Freeman (1922-1924) à Los Angeles, il invente les « textile blocks » moulés qui forment des parois complexes, ornementales, très éloignées du lisse moderniste. Le Corbusier et Pierre Jeanneret sont d'abord en retrait, puis, à la fin des années trente, commencent à voir le potentiel plastique des traces de coffrages : c'est ainsi que les piliers du pavillon de la Suisse à la cité universitaire en 1930-1932 montrent les imperfections des moules. Après guerre, la trace deviendra l'obsession de l'architecture de Le Corbusier.

La mise en œuvre comme enjeu esthétique

C'est aussi après la guerre que les architectes modernes d'avant-garde abandonnent la pureté abstraite de l'architecture blanche pour inventer une nouvelle expression plastique dans laquelle la matière du béton va pouvoir s'exprimer. La mise

en œuvre devient un enjeu esthétique majeur et l'on utilise la palette du béton en dessinant le calepinage de chaque coffrage.

Puisque la mise en œuvre laisse des traces, puisque le béton est rarement lisse et parfait, les architectes veulent maîtriser et détourner ces défauts grâce à un travail de préparation de l'empreinte du bois, de programmation des salissures et des coulures. Un nouveau programme plastique très présent dès 1945 dans l'unité d'habitation de Marseille qu'il met en œuvre.



Le Corbusier, architecte, Unité d'habitation de Marseille, 1952.

Poésie brutaliste

L'aspect graphique du coffrage doit être contrôlé : dimension, orientation des planches, calepinage des joints de rupture, choix des textures. Le béton apparent, brut de décoffrage, est la source d'une esthétique de la trace qui fait ressortir avec force ses fondements matériels, le travail de la matière. Cette nouvelle forme de mise en scène de la vérité constructive peut avoir des accents mystiques. On pense bien entendu au couvent de La Tourette, de Le Corbusier dans lequel le béton présente une surface brutale, sans raffinement, qui donne à lire le clouage des banches ou les ruptures des coulées, ou encore au projet de projet de Claude Parent et Paul Virilio pour l'église Sainte-Bernadette à Nevers, (1963-1966) qui s'inspire des Blockhaus construits par les Allemands sur la côte. Dans cette quête enfin, Carlo Scarpa est un orfèvre sur les formes et les empreintes du béton préfigurant les accents mystiques d'un Tadao Ando.



Carlo Scarpa, architecte, cimetière Brion, Trévise, Italie, 1970.



Claude Parent et Paul Virilio, architectes, église Sainte Bernadette à Nevers, 1963.

Les grands ensembles ou le béton minimum

Comme la musique concrète, cette plastique « brutaliste » ne séduit qu'un auditoire restreint. Pour le grand public, le béton de cette époque devient le symbole de la médiocrité architecturale des grands ensembles et du mal vivre des banlieues. Pourtant, un matériau ne peut porter le poids des responsabilités des choix politiques et des erreurs urbaines qui ont accompagné la diffusion de son emploi. On pourrait aussi remarquer que certains des plus célèbres grands ensembles, comme Sarcelles, sont bâtis en pierre. Mais l'association béton-banlieue n'est pas fortuite : l'avènement des grands ensembles est un corrélatif au triomphe du béton qui, à travers la constitution de grands groupes de bâtiment et l'industrialisation, toutes deux voulues et soutenues par l'État, devient, en France, le matériau universel, donc celui du non-choix.

Visant de fait à résorber la crise, très aiguë, du logement, la réalisation des grands ensembles, avec des opérations pouvant aller jusqu'à 2 000 voire 5 000 logements, s'accompagne incontestablement d'un appauvrissement architectural. La volonté d'abaisser les coûts par « l'industrialisation lourde » conduit à ce que Bruno Vayssière appelle le « hard-French » : des réalisations répétitives, dures, dépouillées, dans lesquelles la composition est sensée suivre le chemin de grue.

Cette période du triomphe quantitatif du matériau est celle de nombreux renoncements. Les potentialités structurelles du béton sont oubliées : plus de porte-à-faux ni de fenêtres d'angles ou de pilotis.



Jean Ginsberg, architecte, La Pierre Colinet à Meaux, 1958.

Candilis, Josic
et Woods, architectes,
Toulouse le Mirail,
1961-1974.



Moshe Safdie,
architecte,
Habitat 67,
Montréal, 1967

Les balcons eux-mêmes souvent disparaissent. Le béton est employé au minimum de ses capacités : un matériau économique qui permet de monter haut.

Pour rentabiliser les coffrages et vendre plus de matière au détriment d'autres corps d'état, les entreprises de gros œuvre qui montent en puissance abandonnent au profit du voile l'ossature béton qui dominait dans l'entre-deux-guerres.

Première critique

Très tôt, au sein même de la profession, des critiques apparaissent qui, attribuant l'échec de l'urbanisme moderne à ses formes, tentent de les faire évoluer sans toutefois chercher à modifier ses données techniques et programmatiques. Ainsi, Émile Aillaud va-t-il imposer des courbes au chemin de grue et développer une poétique très personnelle dans les ensembles industrialisés qu'il réalise. Quant à l'équipe Team X, Candilis, Josic et Woods, elle tente de réintroduire artificiellement une complexité urbaine, par une modification des implantations et un enrichissement du programme, comme à Toulouse-le-Mirail.

Cependant, ces projets ne remettent pas en cause la production de villes par milliers de logements, le chemin de grue et un béton employé au minimum de ses capacités. Ils aboutissent du coup à des projets encore plus démesurés qui ont généralement encore moins bien vieillis que les grands ensembles de la première génération.

Une voie alternative : l'habitat intermédiaire

Le premier projet à explorer une voie vraiment nouvelle, tout en restant dans le cadre d'une production industrialisée, est le bâtiment Habitat 67 que Moshe Safdie réalise à l'Exposition Universelle de Montréal en 1967. Cet ensemble d'habitations en pyramide est conçu comme une série de maisons individuelles superposées. Il propose à chaque logement des terrasses importantes, des vues étonnantes. Malgré une technique de mise en œuvre directement issue de l'industrie lourde, l'architecture renoue avec les performances techniques du béton : grands porte-à-faux, fenêtres d'angle, décomposition des plans. Moshe Safdie propose une nouvelle interprétation du néoplasticisme et exploite le béton dans toutes ses dimensions.



En France, cette voie nouvelle aura de nombreuses retombées avec les différents projets d'habitat intermédiaire qui fleurissent dans les années soixante-dix et qui cherchent à renouer avec les qualités d'usage des immeubles à gradins d'Henri Sauvage du début du siècle. Les pyramides du centre de la ville nouvelle d'Evry d'Andrault, Parat et Aymeric Zubléna, les opérations de Jean Renaudie à Ivry et Givors, et celle de Renée Gailloustet à Saint-Denis témoignent de cette recherche qui vise à utiliser le béton pour créer un habitat collectif ayant les qualités de l'habitat individuel. Ces projets auront un destin social variable en fonction de leur dimension et de leur contexte économique et social.



Christian de Portzamparc, cité de la Musique, Paris, 1995.

Taller de Arquitectura (Ricardo Boffil) et Jean-Pierre Carniaux, Antigone, Montpellier, 1982.

Retour à l'urbain

C'est à travers le concours du PAN lancé par le Plan Construction du Ministère de l'équipement que va émerger, à la fin des années soixante-dix, une vision nouvelle de la ville, celle du retour à une architecture urbaine. Après un détour par des formes postmodernes (Boffil), de jeunes architectes vont associer modernité et urbanité. Le premier jalon de cette vision est le passage des Hautes-Formes à Paris (13^e) réalisé par Christian de Portzamparc et Georgia Benamo entre 1975 et 1980. Construit autour d'une ruelle, il marque les premiers pas d'un « retour à la ville » dans lequel le béton est haut, lisse, mais démontre le potentiel urbain de sa texture.



Continuités plastiques contemporaines

Ce panorama montre que, depuis que les architectes se sont approprié le matériau béton, ils n'ont pas ouvert une voie plastique unique. Ces différentes approches revendiquent la vérité du matériau, la pertinence de son usage, mais il est clair qu'il y a plusieurs doctrines esthétiques concurrentes.

Ces différentes pistes perdurent dans l'architecture récente ou contemporaine. Spécialiste du baroque, Paolo Portoghesi dans la mosquée de Rome, ou Paul Chemetov au forum des Halles, renouent avec le rationalisme d'Anatole de Baudot dans sa mosquée romaine. L'expressionnisme structurel se réintroduit dans les espaces de Santiago Calatrava, véritable sculpteur du jeu des forces ou dans les



Paolo Portoghesi, mosquée du Vendredi, Rome, 1990.



Paul Chemetov, les Halles, hall et couloir d'accès au métro, Paris, 1985.



La gare TGV de Satolas, Santiago Calatrava, 1994.



équipements de l'équipe Beguin-Macchini qui proposent des projets rationnels sur le plan de la mise en œuvre ou du calcul. Aurelio Galfetti crée une façade rigoureuse reposant sur un simple damier qui peut évoquer l'architecture industrielle des débuts du béton, tandis que Rudy Ricciotti réinterprète la mise en scène structurelle à travers la création d'une résille expressionniste qui compose la façade. Les

*Rudy Ricciotti,
Centre de la Danse,
Aix-en-Provence,
2006.*

*Gilles Béguin et Jean-André Macchini,
Centre d'entretien routier, Argenteuil-Sannois, 1994.*





Jean Dubus et Jean-Pierre Lott, ESSIE, Amiens, 1993.

formes libres issues de l'expressionnisme formel, renaissent dans les projets de Henri Gaudin, de l'ESSIE de Dubus et Lott, du collège de Riccardo Porro à Cergy Pontoise ou encore de la maison de la musique de Porto construit par Rem-Koolhaas. Gustav Peichl, Henri Ciriani, Hellin & Sebag reprennent les concepts du premier mouvement moderne avec ses plans libres, ses fenêtres d'angles, ses portes à faux ou ses façades blanches pour continuer le projet plastique de Le Corbusier ou d'Alvar Aalto. La texture du centre culturel de

Henri Ciriani, logements sociaux La Cour d'angle, Saint-Denis, 1982.



Hellin-Sebag, hôtel de police, Montpellier.



Rennes de Portzamparc ou le centre de recherche médicale illustrent aussi la poursuite des recherches sur la texture du matériau. Tadao Ando restant le maître incontesté en la matière, puisqu'il fait de la vibration de ses coffrages le matériau même de son architecture et qu'il met en scène les « imperfections » du coulage, soigneusement programmées, par une lumière rasante qui accentue ces effets. Côté texture, les Japonais sont parmi les plus passionnés, comme le montrent les œuvres de Toyo Ito ou de Jun Aoki qui utilisent l'évolution contemporaine des bétons pour créer des bétons avec des incrustations et des transparences.

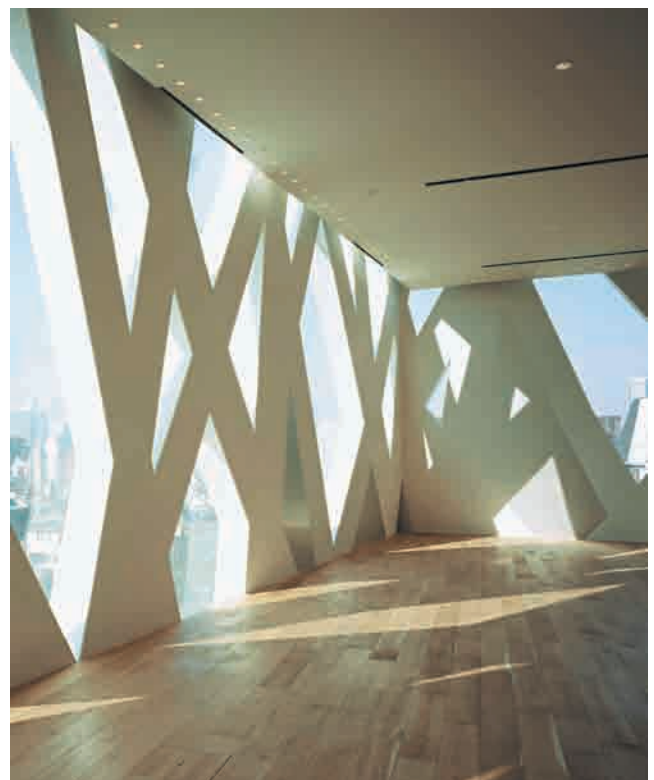
L'architecture contemporaine poursuit les voies ouvertes par les pionniers en les renouvelant bien souvent. Mais on peut penser qu'avec l'évolution récente des bétons, de nouvelles pistes plastiques, totalement innovantes puissent émerger.



Dominique Coulon, collège Pasteur, Strasbourg, 1999.



Tadao Ando, espace de méditation de l'UNESCO, Paris, 1995.



Toyo-Ito, Siège social, Japon, 2006.

Bibliographie

Ouvrages généraux

Ouvrage collectif, *Bétons matière d'architecture*. Éd. Techniques et Architecture/Régirex, Paris, 1991.

Peter Gössel et Gabriele Leuthäuser, *L'architecture du xx^e siècle*, Taschen, Köln, 1991.

Dennis Sharp, *Histoire visuelle de l'architecture du xx^e siècle*, Mardaga, Liège, 1972.

Ouvrage collectif, *Fiches techniques Cimbéton*, Éd. Cimbéton, 2007.

Ouvrage collectif, *Construire avec les bétons*. Éd. Cimbéton et Le Moniteur, 2000.

Delhumeau, Simonnet, Gubler et Legault, *Le Béton en représentation, mémoire photographique de l'entreprise Hennebique*, Éd. l'Harmattan, Paris, Hazan, 1993.

Cyrille Simonnet, *Le béton. Histoire d'un matériau*, Éd. Parenthèses, 2005.

Contributions et articles généraux

Cyrille Simonnet, « Le béton armé : origine, invention, esthétique ». Thèse de doctorat, Paris, EHESS, 1994.

Treuttel, Garcias, Treuttel, « L'immeuble collectif à ossature béton : l'apogée et la chute ». Recherche pour le Bureau de la Recherche Architecturale, Ministère de l'équipement, 1993.

Articles de Cyrille Simonnet, Gwenaël Delhumeau, Marie-Jeanne Dumont et Jacques Gubler dans *Reinforced Concrete: ideologies and forms from Hennebique to Hilberseimern*, numéro spécial de *Rassegna*, n° 49/1, Bologne, 1992.

Articles de Cyrille Simonnet, Gwenaël Delhumeau, dans *Culture constructive*, numéro spécial des *Cahiers de la recherche architecturale* n° 29, éditions Parenthèses, Marseille, 1992.

Treuttel, Garcias, Treuttel « Le squelette et la jeune fille, étude structurelle de 15 immeubles de l'entre-deux-guerres ». Recherche pour le Bureau de la Recherche Architecturale, Ministère de l'équipement, 1991.

Articles de Jacques Gubler et Joëlle Neuenschwander, François Robichon et Thomas von Joest, Alain Thiebault dans *Le Béton beau masque*, numéro spécial de la revue *Monument Historique*, n° 140, août-septembre 1985.

« Béton architecture in concrete », numéro spécial AMC. Le Moniteur, 2005.

Revue *Construction moderne*, Cimbéton.

Monographies

Roberto Gargiani, *Auguste Perret*, Gallimard-Electa, 1994.

B. Gopnick et M. Sorkin, *Moshe Safdie, Habitat 67, Montreal*, Selpro, Torino, 1998.

Bernard Marrey, *Nicolas Esquillan, un ingénieur d'entreprise*, Éd. Picard, Paris, 1999.

Daniel Treiber, *Frank Lloyd Wright*, Hazan, Paris, 1986.

José A. Fernandez Ordonez, *Eugène Freyssinet*, Éd. espagnole 2C, Barcelone, 1979.

Pier Luigi Nervi, Studio Paperback, Zurich 1982.

Robert Lemercier, *François Le Cœur*, Vincent Freal, Paris, 1938.

Collectif, *Joseph Monier et la naissance du ciment armé*, Éd. du Linteau, 2001.

Gwenaël Delhumeau « *L'invention du béton armé, Hennebique 1890-1914* », Norma éditions, 1999.

Peter Collins, « *Splendeur du béton* », Hazan, 1995.

Contributions et articles

Gwenaël Delhumeau « Hennebique et la construction en béton armé 1892-1914 des brevets au matériau », Thèse Paris-IV-Sorbonne, 1995.

Françoise Boudon « Recherche sur la pensée et l'œuvre d'Anatole de Baudot », AMC n° 28, 1973.

Crédit photographique

H. Abbadie, Béguin G. Macchini, N. Borel, CCI,
H. Cividino, S. Demailly, FLC/ADAGP, IFA,
J.-M Landecy, S. Martinez, G. Maucuit-Lecomte,
Matsuoka Mitsuo, M. Moch, J.-M Monthiers,
Nacasa&partners, M. Robinson, R. Simonnet,
O. Wogenscky, tous droits réservés.

Illustration de la couverture

OBÉA Communication

Mise en page et réalisation

Amprincipe Paris
R.C.S. Paris B 389 103 805

Impression

Imprimerie Chirat

Édition janvier 2009



CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr

