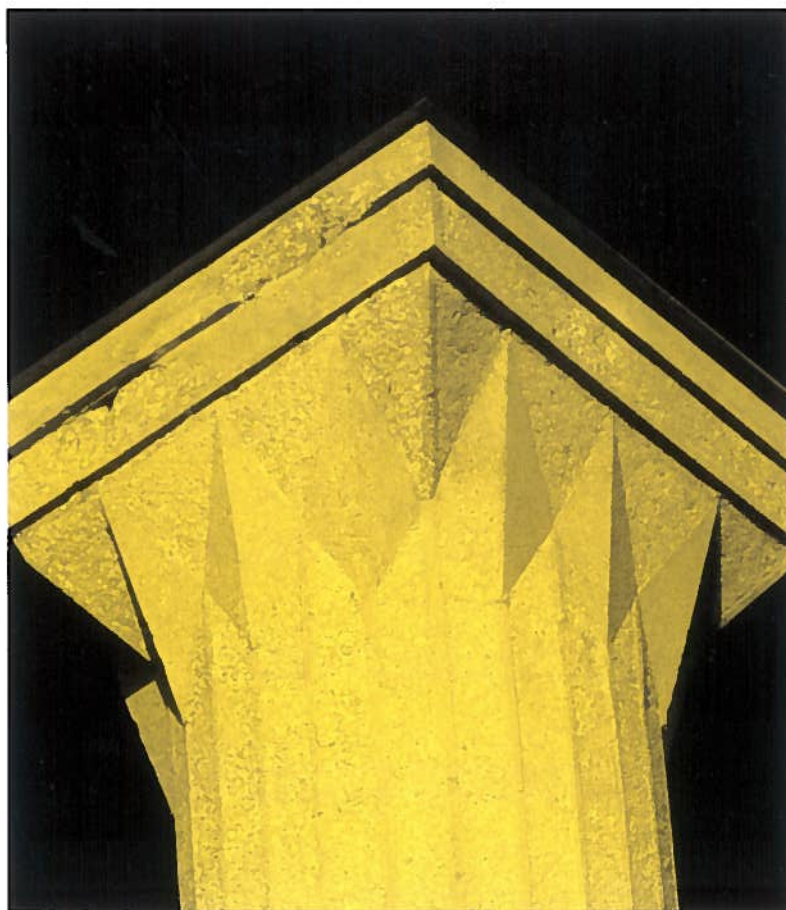


LES CAHIERS DE LA SECTION FRANÇAISE
DE
L'ICOMOS

BÉTON ET PATRIMOINE



LE HAVRE
5-6 et 7 décembre 1996

Sommaire

Introduction, Michel Jantzen 5

HISTOIRE, TECHNIQUES ET ARCHITECTURE

Le béton armé des origines à 1914 : le cas Hennebique, par Gwenaél Delhumeau 9

Esthétique du béton armé : 1914-1940 – problèmes de définition, par Cyrille Simonnet 13

Auguste Perret : l’ordre du béton armé, par Joseph Abram 17

1923-1931, naissance du mouvement moderne – Les villas d’artiste, par Christiane Schmückle-Mollard 21

Le béton armé dans l’architecture tchèque du XX^e siècle, par Petr Urlich 25

Débat 33

Béton et monuments historiques, par François Goven 37

TECHNIQUES DE FABRICATION, COMPOSITION ET PATHOLOGIES

Le béton : histoire et évolution de sa composition et de sa mise en œuvre, par Pierre Jaugey et Paul Poitevin 43

Pathologies du matériau béton, par Hugues Hornain 53

Altérations et diagnostic, exemple de l’église Saint-Joseph du Havre, par Elisabeth Marie-Victoire et al. 59

Diagnostic de l’état des aciers dans le béton, par Gilbert Grimaldi et André Raharinaivo 69

Débat 73

Durabilité des structures en béton : prise en compte du matériau dans les calculs mécaniques,
par Jean-Pierre Bournazel 75

Restauration du béton armé dégradé, par Yves Mouton et André Raharinaivo 77

Restauration du béton et authenticité des matériaux. Quelques exemples européens, par Wessel de Jonge 81

Les bétons contemporains, par François Bosc 87

Débat 93

PROBLÈMES DE CONSERVATION ET DE RESTAURATION : PRÉSENTATION DE CAS

L'utilisation du béton dans la restauration des monuments historiques, par Eric Pallot..... 97

Le béton armé dans le renforcement des structures, par Benjamin Mouton 101

Restauration de l'église Notre-Dame de Royan, Charentes-Maritimes, par Philippe Oudin 105

Restauration de l'église du Raincy, par Benjamin Mouton 109

Les origines du ciment en Dauphiné, par Brigitte Riboreau et Anne Cayol-Gérin 113

Un prototype d'architecture orientaliste en béton moulé : la Casamaures, par François Botton 115

La Casamaures - Le matériau béton, par Dominique Peletaz 119

Le Corbusier : archéo-ingénierie 1986-1996 à la Cité Radieuse de Marseille, par Richard M. Bisch 123

Le Corbusier : archéo-ingénierie 1986-1996 à la Cité Radieuse de Marseille, par Jean-Pierre Dufoix 127

Débat 135

USAGES ET RÉHABILITATIONS

Faut-il sauver le béton armé ? par François Gondran 143

L'habitat des cités dans l'Allemagne des années vingt, par Hans Jörg Duvigneau 149

La gestion patrimoniale, urbaine et sociale, des grands ensembles des années soixante, par Paul Louis Marty 151

Architecture et urbanisme dans une ville de la reconstruction : l'exemple du Havre, par Christine d'Aboville 155

SYNTHÈSE DES RAPPORTEURS

Le béton armé : histoire, techniques et architecture, par Bernard Toulhier 159

L'histoire de la fabrication du béton, ses altérations et les remèdes, par Daniel Lefèvre 165

Problèmes de conservation et de restauration, par François Goven 167

Usages et réhabilitations, par Jacques Boissière 169

ANNEXES

Liste des édifices en béton protégés au titre des Monuments historiques, par Jannie Mayer..... 173

Recommandation du Conseil de l'Europe 195

Liste des participants 199

Introduction

Le béton armé porte en son nom l'idée de dureté et d'agression, il est devenu dans le langage courant synonyme d'un environnement hostile, le "bétonneur" est à la fois le technicien insensible et l'aménageur sans scrupule. Comment avec un tel handicap promouvoir les qualités de ce matériau déshonoré par la facilité et le mauvais emploi ?

Le béton est presque né avec le siècle, tout au moins, son utilisation s'est-elle développée à partir de ce moment-là. Sa souplesse de mise en œuvre, la liberté qu'il offrait aux architectes pour s'affranchir des contraintes de portée, sa plus grande résistance au feu ne pouvaient qu'attirer l'attention des bâtisseurs. Pour la première fois existait un matériau présentant autant de qualité de flexion que de résistance à la pression. Depuis des siècles, on associait le fer à la pierre pour tenter cette synthèse structurelle mais l'oxydation et les contraintes de la taille la rendait aléatoire.

L'apparition du béton ne pouvait que séduire les architectes les plus inventifs ; ses débuts furent prometteurs et nous ont laissé des œuvres étonnantes d'audace et d'élégance. Avec le temps, son emploi s'est banalisé jusqu'à devenir aujourd'hui l'auxiliaire inévitable de toute construction sans que son identité soit pour autant toujours évidente. Il est aussi entré dans les grands monuments de pierre pour compenser les effets du temps telle une prothèse sur un grand blessé.

Considérée à l'origine comme impérissable, cette "pierre artificielle" semblait au commencement être enfin le matériau éternel répondant à cette quête constante de l'indestructible. Hélas, comme toute chose, le béton armé a un terme et il nous revient aujourd'hui de constater que malgré les améliorations techniques de sa fabrication, le béton vieillit.

Les créations de Perret, de Le Corbusier, de Mallet-Stevens et d'autres qui ont bouleversé notre cadre de vie dans la première moitié du siècle et pour lesquelles l'intérêt est croissant sont menacés par d'insidieux phénomènes de décomposition et d'oxydation, tout comme les grands ouvrages des ingénieurs et des créations de l'architecture de notre temps.

L'importance de ce patrimoine dans l'histoire de la civilisation, oriente la recherche vers les techniques qui permettront de régénérer la matière dont il est fait. C'est une tâche nouvelle qui commence par la connaissance et la redécouverte des meilleures productions que l'architecture doit au béton armé. Le Havre mieux qu'aucun autre lieu était à même d'accueillir une réflexion sur ce thème.

Michel JANTZEN
Architecte en chef
Inspecteur général des Monuments Historiques
Président de la Section Française de l'Icomos

Histoire, techniques et architecture

Le béton armé des origines à 1914 : le cas Hennebique

L'apparition du béton armé dans le paysage constructif est assez soudaine. Cinq années, tout au plus, auront suffi aux propagateurs de ce mode de construction pour faire figure d'interlocuteur crédible auprès des ingénieurs, architectes et autres prescripteurs. Ainsi, en 1895, la reconnaissance des quelques protagonistes qui se partagent le marché est-elle largement acquise. Parmi ces derniers, la maison Hennebique connaît un essor spectaculaire. Fondée en 1892, elle exerce en 1900 une position dominante dans le domaine de la conception des ouvrages en béton armé. L'étendue de son réseau d'entreprises lui confère, d'autre part, une capacité de production au moins égale à celle totalisée par l'ensemble de ses concurrents, il est vrai encore peu nombreux. Hennebique se distingue assurément de ses rivaux par l'ampleur "industrielle" de l'organisation qu'il met en place afin de diffuser ses brevets. Mieux, cette vaste "association de concours" lui permet de faire du béton armé un véritable "article de série" là où l'activité de ses concurrents – quelle que soit la valeur de leur bureau d'études – demeure enracinée à la seule dimension du chantier. En 1905, face à une concurrence autrement nombreuse et acharnée, Hennebique détient environ un cinquième du marché mondial de la construction en béton armé. L'effectif de ses quelques cinquante bureaux d'études atteint près de trois cent quatre-vingts personnes. Le constructeur peut en outre affirmer employer chaque jour plus de dix mille ouvriers à travers le monde entier. À la veille de la première guerre mondiale la firme alignera cinquante-cinq agences techniques déterminant, dans une quarantaine de pays, la production de sept cent quarante et une entreprises qui lui sont officiellement affiliées.

L'efficacité de cette organisation semble se mesurer en fonction de l'écartement de deux activités : construire et concevoir. Hennebique dissocie en effet ces deux fonctions pour explorer les ressources d'un système d'exploitation original (dans le bâtiment du moins) basé sur un échange de compétence (entrepreneur/ingénieur) dont il s'emploie à maîtriser le développement.

La production Hennebique est très vite déterminée par la capacité de la firme à gérer cet écart. Si cette dernière se caractérise par le savoir-calculer de ses bureaux d'études et le savoir-faire des entreprises avec lesquelles elle est liée, la spécificité de son organisation réside dans le dispositif de transmission que cette construction bipolaire implique. De fait, la fluidité avec laquelle les informations transitent au sein de la firme entre agents, bureau

central et concessionnaires conditionne l'essor de l'entreprise et par là même tout le dispositif offensif imaginé par Hennebique.

Il importe de s'arrêter sur le fonctionnement de cette firme qui n'est alors ni à proprement parler un bureau d'études, ni l'entreprise de construction dont Hennebique se plaît à dénombrer les ouvriers¹. Considérant la question de l'essor premier d'un système de construction qui se définit progressivement dans le cadre d'une interaction entre chantier et bureau d'études, nous bornerons ici notre approche au dispositif ainsi conçu pour conquérir un marché qui, dans cette dernière décennie du XIX^e siècle, reste entièrement à définir.

LES TOUS PREMIERS MOMENTS DE L'EXPANSION HENNEBIQUE

Après avoir déposé son brevet français (août 1892)², Hennebique s'associe avec un industriel réputé pour les grès et granits qu'il exploite en Belgique. Ce dernier joue probablement un rôle déterminant dans les premiers moments de l'expansion Hennebique. Pour audacieux qu'il soit, ce transfert d'activité de la pierre au béton armé (reconversion ou diversification ?) ne paraît pas, alors, irraisonnable aux yeux d'un homme d'affaires parfaitement aguerri en matière de construction. Au contraire, flairant les retombées financières d'une telle invention, ce dernier investit temps et argent et surtout se réserve au sein de la société les affaires comptables qu'Hennebique lui délègue bien volontiers. Le service de la comptabilité constitue alors, avec le bureau d'études, une base arrière bruxelloise assez solide pour offrir au constructeur, libre de ses mouvements, les moyens logistiques nécessaires à l'action offensive qu'il déclenche dès le début de l'année 1893. On peut se demander, dès lors, si cet industriel n'est pas en grande part l'initiateur du système de gestion dont Hennebique dote l'entreprise. Ce système constitue le cadre rigide qui sous-tend l'organisation même de la société et conditionne son rapide développement.

La stratégie mise en œuvre par F. Hennebique vise d'emblée à supplanter la concurrence potentielle. Il lui faut en

¹ Hennebique estime en juin 1913 à plus de trente mille le nombre des ouvriers qui chaque jour mettent en œuvre son système à travers le monde.

² Brevet n° 223546, enregistré le 8 août 1892.

d'autres termes prendre l'initiative. De fait, le constructeur va longtemps faire figure de locomotive et l'évolution de sa firme modèlera bien souvent le comportement de ses concurrents.

Les caractéristiques de cette offensive résultent sans doute de la structure et de l'implantation même de la firme qui, située à Bruxelles, s'inscrit d'emblée dans une perspective internationale. La ville s'avère en effet pour le constructeur un lieu stratégique ouvert sur les marchés internationaux dont il peut sentir (et anticiper ?) l'évolution. De plus, il se situe à la croisée d'échanges techniques entre la France et l'Allemagne que vient encore stimuler, en terme d'innovation, la souplesse des réglementations constructives belges.

Cet aspect supranational compense les handicaps inhérents à sa situation : alors à peu près inconnu, il s'est départi de son entreprise, n'est donc pas implanté et, dès lors, ne dispose pas de zone d'influence comparable à celle des entreprises concurrentes, du type Coignet ou Cottancin, auxquelles il s'attaque¹. Ces faiblesses sont en fait pour Hennebique autant d'atouts qu'en stratégie il entend exploiter pour percer dans ce secteur innovant. Aussi n'a-t-il donc d'autre solution que la mobilité absolue.

Maître mot de sa politique de conquête, la recherche d'une sécurité offensive mobilise toute son énergie : il lui faut ainsi étendre de façon systématique l'exploitation de son brevet.

LE SYSTÈME HENNEBIQUE

Élaborant dès les années mille huit cent quatre-vingts son propre procédé de construction *fireproof* en fer et béton combinés, Hennebique cherche au fond à s'affranchir d'un système de production, lié à l'usage du métal dans la construction, pour en substituer un autre qu'il contrôlerait. Le marché visé est celui du plancher, le créneau celui de l'incombustibilité. Dix voire quinze années sont nécessaires à la mise au point du système, qu'il fait breveter en France en août 1892 sous le titre : "*Combinaison particulière du métal et du ciment en vue de la création de poutres très légères et de haute résistance*". Dans l'additif qu'il dépose en 1893 – il a déjà une quarantaine d'ouvrages à son actif – Hennebique insiste sur le rôle primordial joué par les entretoises en fer feuillard qui relient les barres de traction à la partie supérieure du béton afin d'"amortir" les effets de l'effort tranchant s'exerçant lors de la flexion des poutres. De mise en œuvre facile, contrôlable, sans exigence de qualification particulière, cette pièce symbolisera très vite, sous le nom d'*étrier*, tant la simplicité et l'efficacité du système Hennebique que la réussite industrielle de son promoteur. L'additif que ce dernier dépose en 1897 constitue une étape déterminante dans l'évolution du système. Hennebique y décrit son dispositif de poutre continue sur plusieurs appuis, préconisant l'usage des barres incurvées de façon à combattre efficacement les effets d'en-

castrement. Ce certificat d'addition enregistre officiellement une pratique largement éprouvée par le constructeur et que l'on peut associer à la hardiesse de ses premiers grands ouvrages, expérimentation qu'il hisse au rang de prototype, et qu'il sait, mieux que ses concurrents peut-être, mettre en scène.

LES MÉCANISMES DE L'OFFENSIVE HENNEBIQUE

L'accession à la commande, ainsi d'ailleurs que les premiers contacts qu'il établit avec les entreprises qui vont mettre en œuvre son système, dépendent de l'habileté avec laquelle Hennebique sait mobiliser les réseaux existants. Liens, filières, affinités, systèmes d'allégeance et d'influence constituent une trame relativement dense à partir de laquelle Hennebique tisse son propre réseau.

Les relations privilégiées que le constructeur développe avec les fabricants de ciments illustrent bien, par exemple, ce type de connexions extrêmement fécondes. L'un de ses premiers fournisseurs, la Société de Pernes-en-Artois, le met ainsi en contact avec des entrepreneurs du Nord susceptibles de devenir concessionnaires. Les intérêts, à l'évidence, convergent.

Ces sociétés avec lesquelles Hennebique négocie constituent un enjeu stratégique très important. Outre l'influence locale qu'elles peuvent exercer, ces dernières développent leur propre branche construction, offrant à Hennebique les perspectives d'un marché plus qu'intéressant. Mais l'entente s'avère d'autant plus nécessaire que ces maisons se profilent à court terme comme des concurrents potentiels.

Exploitant ces réseaux, Hennebique parvient en 1893 à décrocher la commande d'ouvrages industriels dans le Nord de la France qui, par l'importance des structures conçues et exécutées en béton armé (minoterie de Don, peignage de laine à Tourcoing, raffinerie de sucre à Lille) vont lancer l'exploitation du système à l'échelon local. La commande détermine en somme la stratégie Hennebique. Elle-même s'ordonne et se construit autour de ces chantiers clefs.

Parmi les quelques opérations qui, en termes stratégiques, constituent un enjeu majeur pour la firme naissante, figure la construction, à Nantes, d'une minoterie dont Hennebique enlève le marché durant l'été 1894. Cet ouvrage, que d'une image frappante (un slogan en vérité) il résume à un "bloc monolithique indéformable posé sur mauvais sol", constitue l'un des plus solides points d'ancrage de l'organisation en gestation. La hardiesse des solutions techniques élaborées pour venir à bout des problèmes nombreux que posent son exécution en fait, d'autre part, la première expérimentation en grand du système. C'est en somme la première démonstration d'importance des possibilités croisées du système et de l'organisation.

C'est, à la suite d'intrigues assez complexes, une entreprise de construction métallique (la maison lilloise E. & P. Sée) qui va réaliser cette opération.

L'intégration d'une entreprise de construction métallique comme celle des frères Sée (phénomène en soi intéres-

sant), s'avère pour la firme une acquisition de valeur. Capable, pour s'imposer, d'étendre leur domaine d'activité au béton armé – phénomène en soi intéressant – les frères Sée, forts de cette double compétence, pèsent d'un poids certain dans le choix du maître d'ouvrage et de ses architectes en faveur du système Hennebique. Les entrepreneurs lillois, réputés pour leur constructions économiques et les brevets qu'ils exploitent, ont d'autre part une carrure suffisamment imposante pour mener à bien ces travaux. Le chantier une fois commencé doit en effet constituer pour Hennebique un pôle assez attractif pour attirer d'éventuels concessionnaires et permettre ainsi la mise en place d'un dispositif de représentation efficace. Les problèmes d'organisation qui s'y font assez rapidement jour, lui offrent d'autre part l'occasion de mieux définir le profil des entreprises dont il recherche la collaboration, ses futurs concessionnaires.

Concernant ces derniers, contractuellement liés avec Hennebique, disons pour résumer que le constructeur se constitue une force de frappe à la mesure du marché dont il entend s'emparer, et ce, autant par le nombre des entreprises qui constituent son arsenal que par leur mobilité ou leur capacité variable. Hennebique prend ainsi de court ses concurrents.

Lorsqu'à la fin de l'année 1894 il décroche, par exemple, le très stratégique marché de la Raffinerie Parisienne de Saint-Ouen, Hennebique est en mesure d'associer pour la reconstruction de ce bâtiment partiellement ravagé par un incendie, trois entrepreneurs importants du Nord de la France⁴. Si les toits sheds qu'ils exécutent sur ce premier grand chantier parisien – prototype du genre, semble-t-il, en béton armé – apportent à son système une assez décisive notoriété, Hennebique démontre en même temps l'efficacité de son organisation.

CHANTIER

Hennebique, dans les années 1893-1897 est amené à maintenir un étroit contrôle sur toutes les opérations de chantier. Ses fonctions débordent largement, alors, sur les prérogatives de l'entrepreneur. Ainsi coordonne-t-il l'ensemble des commandes de fer, auprès des forges de Sedan – son premier fournisseur et allié – ainsi que celles des ciments, bois de coffrages, sables et agrégats, matériaux dont il détermine et contrôle avec soin la nature et la qualité. Il supervise d'autre part les dosages des bétons qui varient alors d'un ouvrage à l'autre, en fonction principalement des conditions plus ou moins difficiles d'approvisionnement. Hennebique se charge également du matériel et de l'outillage (serre-joints, dames, pilons, treuils, etc.) indispensables à la mise en œuvre du système ; matériel de base qu'il doit concevoir, adapter, fabriquer et faire circuler, dans les premiers temps, de chantier en chantier. Quant à l'organisation des tâches sur le terrain, il lui faut dans cette phase expérimentale, spécifier et établir la nature même de l'intervention d'une main-d'œuvre qu'il va s'employer à qualifier. Il va, en d'autres termes, attribuer et répartir les fonctions. Hennebique règle strictement les diverses opérations qui

s'enchaînent sur le chantier. Il gère au plus près l'activité de la main d'œuvre, cherchant par une organisation rigoureuse à en réduire le coût de revient – le sort du système en dépend.

Hennebique coordonne, d'autre part, la rotation des ouvriers spécialisés qui circulent d'un chantier à l'autre en fonction des besoins. C'est la clef de voûte du dispositif qui permet au constructeur d'étendre si rapidement l'usage de son système. Ces ouvriers itinérants assurent l'indispensable formation des entrepreneurs qui intègrent son réseau, dispensant à leurs équipes d'ouvriers un savoir-faire sans lequel le système ne serait qu'un ensemble de prescriptions abstraites et inopérantes. Ainsi, à mi-chemin entre système et organisation, cet agent ouvrier, assure-t-il à la fois la valeur de l'un et la cohésion de l'autre.

Hennebique établit d'emblée un contact étroit entre le chantier, où s'organise un type de travail nouveau et se perfectionne son système, et le bureau d'études où s'élabore le projet.

LE BUREAU D'ÉTUDES

Le savoir-calculer qui se développe dans les bureaux de Bruxelles, où s'élaborent des méthodes d'études et des modèles d'applications exploitables d'un type d'ouvrage à l'autre, opère comme une garantie dont le constructeur sait se prévaloir pour promouvoir son système. Dans la phase exploratoire qui caractérise les premières années d'activité de la firme, le rôle de ce bureau technique est déterminant. C'est en réalité une véritable machine à produire de la crédibilité, une machine à convaincre. Son action est alors essentiellement prospective : elle est moins commandée par les problèmes de mise en œuvre du système sur le chantier qu'elle n'en commande l'éventuelle application. En ce sens, le bureau Hennebique tourne selon une logique distincte de celle du chantier. Le constructeur s'appuie sur la capacité de réponse de son bureau amené à étudier un nombre croissant d'avant-projets ; projets dont il entend "inonder" le monde de la construction. À mesure que s'élargit le champ des études couvertes par son bureau (sheds, planchers d'habitations ou industriels, gitages, toitures-terrasses, dalles de fondations, réservoirs, silos, ponts, etc.), Hennebique peut, à moindre frais, en multiplier le nombre et donc imposer progressivement sa présence par la diffusion d'autant d'avant-projets et de devis. C'est là, semble-t-il, que le constructeur se distingue de ses concurrents, par l'ampleur qu'il donne d'emblée à son bureau d'études et que commande une action promotionnelle alors dissociée de celle qui s'organise autour du chantier.

AGENT

Hennebique éprouve rapidement la nécessité de structurer son réseau par un dispositif intermédiaire de représentants qui, moyennant commission, puissent sonder les marchés à l'étranger et, en France, l'assister dans ses démarches et négociations à l'échelon régional. Il va très vite privilégier le recrutement de jeunes ingénieurs (cueillis en majorité à la sortie de Centrale) qui, travaillant dans ses bureaux, seraient formés sous sa direction.

¹ Même si en 1892, Edmond Coignet dispose déjà d'une capacité d'intervention lui permettant d'exécuter des travaux en ciment armé à Suez (Compagnie Universelle du Canal Maritime de Suez, Maretti architecte).

⁴ Bray-Fiquet à Guise, Debosque-Bonte à Armantière et Ozenfant à Saint-Quentin qui comptent parmi les tous premiers à rejoindre le réseau Hennebique.

Dans ce système de formation interne, réside l'un des caractères les plus originaux de son organisation. Le constructeur, façonnant le profil même des ingénieurs qu'il s'attache, dote ainsi son entreprise d'une structure de plus en plus indépendante des filières qu'il aura initialement exploitées pour s'implanter. Ce processus de formation détermine l'autonomie et la cohésion de ce réseau d'assistance technique, conditions *sine qua non* de l'offensive et de l'expansion Hennebique.

Concrètement, le suivi des affaires amène ces jeunes ingénieurs et dessinateurs à correspondre sans cesse avec les agents régionaux ou étrangers. Ils maintiennent ainsi un contact étroit et permanent entre ces derniers et le bureau technique central qui surveille, contrôle et coiffe, de façon générale, l'activité du réseau. Ils entretiennent en somme l'homogénéité de cette organisation.

Le principe est fécond. Il sert, en outre, avantageusement l'image de marque de la firme, conférant à son bureau d'études une dimension toute particulière. Plus qu'une grande entreprise "industrielle et financière", la maison Hennebique se veut apparaître "dans l'histoire de la

construction contemporaine comme la plus grande école où tous, constructeurs et fonctionnaires, sont venus puiser de robustes connaissances pratiques et techniques en ces vastes bureaux de la rue Danton". Publié peu avant la première guerre mondiale dans l'*Architecture moderne*¹, ce constat s'inscrit dans un discours promotionnel qui, infléchissement notable dans l'histoire de la firme, tend à asseoir l'autorité de cette dernière sur d'autres bases que celles du seul procédé Hennebique. L'organisation, en d'autres termes, prend le pas sur le système. Au fond, le propos ne fait qu'amplifier le phénomène que François Hennebique avait engendré dès avant 1900 en agrégeant quasi systématiquement à son entreprise ce que l'on pourrait appeler les forces vives de l'ingénierie. Voilà dès lors solidement ancrée l'idée (la légende ?) selon laquelle, à la mort du constructeur, en 1921, à peu près tout ce qui porte un nom dans le domaine du béton armé serait passé rue Danton.

Gwenaél DELHUMEAU

Enseignant à l'école d'architecture de Bretagne

¹ Anonyme, "La maison Hennebique", *l'Architecture moderne*, mars 1914, p. 82. Publicité rédactionnelle parue à l'occasion de l'Exposition de Gand 1913. L'immeuble du 1, rue Danton abrite à partir de décembre 1900 le bureau technique central de la firme.

Esthétique du béton armé – 1914-1940

Problèmes de définition

Lorsque les architectes commencent à s'intéresser au béton armé (vers 1915-1920), le matériau connaît une certaine maturité. Les travaux publics, l'équipement industriel et, de façon plus sporadique, certains constructeurs en font usage, alignant déjà des ouvrages aux formes et aux proportions inhabituelles. Dès les premières années du siècle, alors que son emploi se banalise – au sens où la plupart des brevets sont tombés dans le domaine public –, de nombreuses entreprises se sont converties à la nouvelle technique, soit sous forme d'exploitant concessionnaire de certains systèmes (comme celui d'Hennebique), soit en sous-traitant directement avec certains ingénieurs-conseils¹. L'aspect le plus spectaculaire de cette production concerne surtout l'infrastructure industrielle, et touche plus particulièrement les régions minières où l'on construit réservoirs, silos, moulins, chevalements, manufactures². On sait comment un ouvrage comme le silo à grain séduira quelques grandes figures de la modernité (Gropius, Le Corbusier, Guinzbourg), ralliant comme un étendard toute une génération de concepteurs. Mais de façon moins médiatique, l'accumulation progressive de constructions industrielles aux formes simples, géométriques, ainsi que l'apparition de nouveaux profils d'ouvrages d'art, modifient sensiblement la perception du domaine construit. Le pont du Risorgimento à Rome par exemple, construit par Hennebique en 1912, joint les deux rives du Tibre d'une seule portée (100 m), amincissant l'ouvrage à la clef dans un rapport de 1/10. Dans un autre domaine, les nombreuses filatures élevées dans la région lilloise, ou les immenses entrepôts qui s'étendent dans les régions portuaires, propagent un style de construction qui ne tardera pas à faire modèle : économiques et bien éclairés, ces espaces constituent le laboratoire de l'architecture à venir.

Parallèlement, chez les architectes, les certitudes héritées du classicisme se sont largement dissoutes dans le relativisme de l'éclectisme. Le XIX^e siècle a expérimenté toutes sortes de styles, puis toutes sortes de matériaux. Le fer puis le béton ont permis de développer des formes inédites, de répondre à des programmes nouveaux, repoussant toujours plus loin les limites conventionnelles

en matière de spatialité et de légèreté (par exemple : la grande halle éclairée zénithalement). Quand les architectes, ferrus de doctrine, rencontrent les ingénieurs, ferrus de calcul, il se produit une métamorphose spectaculaire au niveau du sens même de l'action de construire. Le potentiel constructif du béton armé ouvre un champ immense d'applications. Amplifié par des programmes en pleine mutation, principalement en matière de logement, ce potentiel engendre bientôt un vocabulaire original, empruntant non plus au passé ou à la théorie académique, mais aux spécificités mécaniques et volumétriques propres au matériau (portique, pilotis, porte-à-faux). C'est à ce titre que l'équipement industriel fonctionne comme référence, car il illustre une (presque) parfaite cohérence entre un usage, une forme et une technique de construction.

Ainsi donc, après deux décennies de maturation, le béton armé éveille bientôt l'attention des architectes. Bien entendu, le problème de l'esthétique du béton armé avait déjà été posé. Les anglais par exemple, bien qu'ils soient restés en retrait au moment des premières grandes offensives techniques et commerciales du matériau, discutent assez tôt de l'opportunité esthétique du "ciment nu"³. En France, c'est l'ingénieur Rabut qui évoque précocement les difficultés qu'il y aurait à produire un style adéquat à un matériau qui peut prendre n'importe quelle forme et dont l'artifice structurant est noyé dans la masse concrète⁴. Un des premiers, Auguste Perret utilise la technique dans un immeuble d'habitation, profitant de la grande souplesse spatiale que procure le système de l'ossature (rue Raynouard 1903). Il continuera sur la voie qu'il a lui-même ouverte, faisant de l'ossature le générateur primaire de tous ses projets, jusqu'à la confondre avec la colonnade classique (le "portique souverain"). En Allemagne, quelques puissantes industries contrôlent les développements du béton armé : Wayss & Freytag, Dyckerhoff & Widmann. Cette situation singulière profite au matériau, qui fait l'objet de recherches théoriques importantes (Emperger, Mörsch). En Italie et en Suisse par contre, la bonne implantation de l'entreprise Hennebique favorise un marché moins innovant, mais plus diversifié (de Mollins, Porcheddu). Si bien qu'à la veille de la première guerre mondiale, la situation en Europe est assez contrastée (sans parler de l'Amérique),

¹ Cf. G. Delhumeau, *Hennebique et la construction en béton armé*, 1892-1914. Thèse de doctorat, Paris IV, 1995, à paraître chez Norma.

² Cf. J. Gubler, G. Delhumeau, R. Legault, C. Simonnet, *Le béton en représentation – les archives photographiques de l'entreprise Hennebique*, Paris, Hazan, 1994.

³ Cf. P. Collins, *Concrete*, Londres, 1959, p. 135-136.

⁴ Ch. Rabut, *Construction en béton armé – Notes prises par les élèves*, Paris, Ecole des Ponts et Chaussées, multig. 1904, p. 88.

l'usage du béton armé s'accordant à des "styles économiques" fortement marqués par des traditions entrepreneuriales et administratives différentes.

Cette situation, qui caractérise plutôt l'aboutissement de la production architecturale, est à confronter avec la tendance pour ainsi dire inverse qui caractérise l'aspect stylistique de l'architecture. Les années 1920-1940 sont en effet marquées par l'avènement de ce que Hitchcock appellera le Style International. Un même habit monochrome (généralement blanc), composé de surfaces planes, orthogonales, discontinues, recouvre unilatéralement presque tous les usages : habitats, théâtres, usines, commerces, hôpitaux. Certes, cette manière est initiée à partir de quelques fortes personnalités (Gropius, Mies van der Rohe, Le Corbusier) qui créent un langage plastique original, que parleront immédiatement de très nombreux épigones. Mais le fait demeure paradoxal. En effet, le déplacement technologique que subit le secteur de la construction le rapproche pour ainsi dire de son déterminant économique et productif : le béton armé "colle" à son usage, à sa manipulation, à son comportement mécanique, — c'est là d'ailleurs l'argument majeur proféré pour sa promotion. Or l'histoire "fine" de son développement au début du siècle montre que deux pays comme la France et l'Allemagne, par exemple, n'ont ni les mêmes traditions ni les mêmes stratégies en matière de diffusion commerciale, voire d'investigation scientifique. Ce décalage perceptible entre la forme (issue du crayon des architectes) et la matière (issue de la bétonnière, terminal de l'économie cimentière) est un indice intéressant pour interpréter la structure du paysage construit dans cette tranche 1914-1940.

En premier lieu, cette relative indépendance du conçu par rapport au construit doit nous prévenir de toute réduction abusive quand à la signification à donner à certains ouvrages phares que l'on présente parfois comme des manifestes constructifs. Considérons par exemple la villa Savoye de Le Corbusier où, à l'état de projet, la maison de campagne en béton de Mies van der Rohe, ces édifices qui déclinent leur équilibre formel à travers le jeu ostensible de l'ossature, de la paroi ou du porte-à-faux. Leur qualité démonstrative touche moins leur technicité proprement dite (souvent irréaliste) que leur organisation plastique qui agence des éléments de langage architectonique dans le sens d'une disposition sensiblement (et spectaculairement) ordonnée. Mies peut écrire en 1923, dans la revue *G* où il publie les plans de cette maison que "nous ne connaissons pas de formes, mais seulement des problèmes de construction", il ne fait que manipuler des images de mur, des images de terrasse. En second lieu, il paraît clair que le béton armé, qui est à la fois un "matériau" et une technique constructive, n'est pas inducteur de types spécifiques, qui répondraient concrètement à des modalités manipulatoire ou mécanique idéalement réclamées par sa nature physique. Entre ce que représente le béton armé a priori et l'ouvrage, même performant, qui en fait usage, il y a tout l'espace de sa *plasticité*, précisément, qui renvoie autant à des traits de subjectivité qu'à des déterminants plus diffus relevant du processus social de la production (agence, commande, entreprises). Le problème du béton armé, paradoxalement, est en effet de ne représenter qu'une abstraction de lui-même. Avant d'être déjà un choix formel et constructif, il n'est qu'un

potentiel informe : des matériaux épars (ciment, sable, graviers), et des modèles de calcul (théorie de l'élasticité). Aussi, pour opérer un classement qui présente quelque pertinence, il est nécessaire de procéder non par découpage typologique, mais par l'analyse des modes argumentaires qui justifient ou provoquent son usage sous tel ou tel aspect.

La thèse selon laquelle le nouveau matériau aurait été à la source de l'architecture du mouvement moderne, autorisant certaines manipulations formelles comme le décalage systématique de plans horizontaux ou verticaux, le jeu des pilotis, le toit terrasse, plan et façade libre etc. — thèse défendue en son temps par Marie Dormoy et répandue dans des textes fameux chez Hilberseimer, Ginsburger, Giedion⁵, a été largement circonscrite depuis. L'historien Réjean Legault a clairement montré la portée rhétorique de l'argument, au moment où, en France particulièrement, la nation voudrait faire naître de son propre génie l'invention du béton armé et l'invention de l'architecture moderne⁶. Il est clair néanmoins qu'au moment de sa constitution, le langage moderne emprunte au béton armé sa totale disponibilité esthétique. N'étant marqué par aucune tradition, sinon celle de l'équipement industriel qui s'offre alors comme le modèle *visuel* d'une conception rationnelle, le matériau est vierge de toute inscription qui lui donnerait un sens préalable. Il n'y a ni théorie des ordres, ni catalogue historiciste pour le mettre en forme. À cet égard, il est entièrement manipulable, et c'est dans ces termes justement qu'il fera l'objet de quelques tendances esthétiques repérables. Remontons aux sources de sa première exploitation significative, car c'est là que s'engendre le ferment de l'esthétique à venir. Le système Hennebique, dominant en France, en Italie, en Angleterre et bien diffusé en Égypte, en Russie, en Amérique latine, privilégie le système de l'ossature à travers une gestion hiérarchisée du poteau et de la poutre. Le système *Monierbau* (Monier exploité en Allemagne et en Autriche), vite concurrentiel du système Hennebique, développe une architectonique dont le type générateur, si l'on peut dire, est celui de la dalle. En terme de comportement mécanique, de calcul, de mise en œuvre, ces deux archétypes (ossature, dalle) sont très différents. Ils constituent deux véritables paradigmes constructifs, et connaîtront une destinée sensiblement différente. Ainsi, le principe de l'ossature fait appel à des modes de calcul relativement stéréotypés qui banalisent sa diffusion, tout en autorisant une grande liberté de variation et d'habillage. Le comportement de la dalle, plus difficile à modéliser, va solliciter des modes de calcul plus sophistiqués, suscitant notamment des réalisations plus expérimentales, moins répétitives⁷. Bien entendu, le partage France/Allemagne n'est déjà plus pertinent dans les années vingt, la culture technique se diffusant très rapidement, transitant par les livres plus que par les chantiers. Mais cette distinction

⁵ M. Dormoy, *L'architecture française*, Paris, 1938 ; L. Hilberseimer, *Beton als Gestalter*, Stuttgart, 1928 ; R. Ginsburger, *Frankreich, Vienne 1930* ; S. Giedion, *Bauen in Frankreich, Bauen in Beton, Bauen in Eisenbeton*, Berlin 1928.

⁶ R. Legault, "L'appareil de l'architecture moderne", *Cahiers de la Recherche Architecturale (Culture Constructive)*, n° 29, Marseille, mars 1992.

⁷ R. Maillart, "Le béton armé et son expression", *Schweizerische Bauzeitung*, 1^{er} janvier 1938.

demeurera opérante dans le sens où, à partir de ces deux registres de l'ossature et de la dalle, ce sont à la fois deux générateurs typologiques contrastés qui vont se dessiner, et deux styles de raisonnement qui vont se développer.

De plus, cette double bifurcation (ossature vs dalle, module vs calcul) va croiser une nouvelle variable, pour ainsi dire, qui touche à la *mise en œuvre*. En effet, assez tôt également, certains constructeurs vont chercher à promouvoir des systèmes constructifs basés sur une économie de manipulation, faisant appel à la préfabrication (Visintini, Siegart) ou travaillant sur des dispositifs d'assemblage économiques (Conzelman). Dans cet esprit, la construction en béton armé va alimenter un certain nombre d'arguments proférés, parfois à grands cris, par les ténors du mouvement moderne qui aspirent à confondre le secteur de la construction avec l'industrie. Cette dynamique connaîtra un fort rendement surtout au lendemain de la seconde guerre mondiale, quand les politiques de reconstruction agiront matériellement au niveau du tissu entrepreneurial. Avant guerre, les initiatives importantes en matière d'industrialisation sont assez sporadiques (et parfois folkloriques), mais exemplaires au niveau des types proposés. Les *Siedlung* de Taut, de Wagner ou Tessenow à Berlin, les maisons Frugès de Le Corbusier à Pessac, la manifestation du Weissenhof à Stuttgart expérimentent des modes de production originaux, basés sur l'utilisation de machines ou sur des organisations rationnelles de chantier.

Nous voici en possession d'une ébauche de grille pour comprendre le sens et la diversité de la production architecturale en béton armé au moment de sa première métamorphose esthétique. Certes, ce structuralisme amateur ne saurait rendre compte du mouvement des idées et des formes qui caractérise l'architecture de l'entre-deux-guerres, dont la perméabilité à tous les grands flux artistiques de la période éclaire certainement mieux certains aspects, même les plus matériels. Mais pour s'en tenir par exemple au double paradigme de l'ossature et de la dalle, il est aisé de le faire fonctionner au niveau d'un des courants dominants de la période. D'ailleurs, plutôt que dalle, il faudrait dire quelque chose comme "surface active" (le mot est de Van Doesburg), signifiant mieux la dimension abstraite ou matricielle de la notion de *plan de rigidité* à laquelle se ramène pour finir le paradigme initial. Toute l'architectonique du style international, assez spectaculaire de ce point de vue, combine des variations d'ossature et de parois, simples surfaces murales. Les villas de Le Corbusier, de Mallet-Stevens, le sanatorium de Aalto, les maisons de Van Esteren, de Loos, les œuvres de Duiker, tout cette architecture joue du pilotis, de la poutre, du bandeau, du pan, du porte-à-faux, de la

membrane, selon une construction visuelle donnant volontiers à voir le processus de son agencement.

Sur une autre voie, l'afflux de science (en Allemagne surtout) investit sur le comportement de la dalle en fonction de son développement géométrique et de son comportement mécanique va engendrer un type original : celui du voile mince, initialement expérimenté par la firme Dywidag avec Dischinger pour la coupole du planétarium de Iena en 1920. On sait quels développements connaîtra ce type, engendrant des formes de voûte et de coque extrêmement variées, souvent spectaculaires. Les grands noms auxquels sont attachées les plus belles réalisations de cette famille sont Dischinger, Finsterwalder pour l'Allemagne, Nervi en Italie, Candela, Torroja en Espagne, Esquillan, Sarger en France, Maillart en Suisse⁸. Sur un autre plan encore, le béton armé va susciter un style constructif particulier, dont le modèle générateur ne relève ni du calcul, ni du mode opératoire, ni du système ossature/plan de rigidité, mais d'une figure plus archétypale, qui est celle de la muralité. Le béton des origines en effet est un béton masse, un béton de compacité, celui qu'employaient les Romains, celui qu'emploieront François Lebrun, François Coignet, Tony Garnier. La muralité renvoie à une image tectonique plus lourde, plus épaisse que celle de la surface active. Le béton "mural" s'apparente encore au massif de pierre ou à la banche épaisse de la construction en pisé. Certains architectes, surtout dans la tradition expressionniste, tenteront de soumettre leur construction en béton à cette image évocatrice. On a ainsi caractérisé certaines productions de Tony Garnier, à la fois antiques et méditerranéennes. Les premières œuvres de Mendelsohn, l'œuvre de Rudolf Steiner, certains aspects du travail de Perret s'apparentent à cette tendance, qui trouvera un relais expressif avec l'emploi du béton brut de décoffrage.

L'équation entre béton armé et esthétique architecturale dessine une courbe qui ressemble plutôt à un nœud. C'est la doctrine (le discours) qui dessine l'ouvrage, plus que le matériau, capable de toutes les formes. Or la doctrine, pour finir aussi malléable que la matière, se construit selon des règles souvent illusionnistes, qui s'ancrent dans une image du matériau volontiers fantasmagorique. Un chantier nouveau s'ouvre alors à l'histoire de l'architecture : celui qui consiste à déconstruire les systèmes de légitimité esthétique, qui sont les véritables ciments du domaine bâti.

Cyrille SIMONNET
Enseignant à l'école d'architecture de Grenoble

⁸ Cf. l'exposition "Les Ingénieurs du siècle" et son catalogue, Paris, Centre Georges Pompidou, juillet 1997.

Auguste Perret : L'ordre du béton armé

*“Ne croyez pas qu’un système de construction
constitue pour moi toute l’architecture...
J’attache une si grande importance au béton armé
parce que je considère que, depuis l’épuisement
de la fin du XIII^e siècle, seule une grande
invention peut jouer le rôle des grandes inventions
précédentes et, fertilisant l’imagination des hommes,
nous donner une ARCHITECTURE”.*¹

Auguste Perret (1925)

Auguste Perret aimait évoquer la matérialité du béton armé, ce “mélange de cailloux et de sable, aggloméré au moyen d’un liant, la chaux ou le ciment”. Matériau antique devenu moderne grâce à l’armature et au perfectionnement des liants, le béton armé représentait pour lui le stimulant qui permettrait aux architectes d’inventer. “Le ciment est un silicate double d’alumine et de chaux. Sans le ciment, le béton armé n’était pas possible car il n’y a que les bétons de ciment qui peuvent être armés de barres d’acier, et c’est là la grande invention moderne. En introduisant le fer ou l’acier dans le béton on a permis à cette matière de travailler à l’extension, alors que, sans armature de métal, elle ne peut travailler qu’à la compression. Ceci veut dire que les simples bétons ne peuvent faire que des piliers, alors que les bétons armés peuvent faire des poutres qui franchissent l’espace compris entre les piliers, en un mot, l’acier fibre le béton. C’est grâce à la propriété qu’a le ciment de conserver indéfiniment le fer par la formation d’un silicate ferreux, grâce au retrait du ciment qui serre la barre et à l’identité absolue des coefficients de dilatation du béton et du fer que les bétons armés sont possibles. (...) La solidité de ce moyen de construction est telle qu’on ne l’emploie jamais massif, quelques poteaux suffisent à porter l’édifice, et les intervalles entre ces poteaux peuvent être remplis avec les matières les plus variées.”²

MATÉRIAUX ET MODES DE STRUCTURE

En raison de ses caractéristiques statiques et de sa résistance au feu, le béton armé constitue, pour Auguste Perret, le mode de construction idéal pour édifier des grands bâtiments industriels. Il s’agit d’un nouveau mode de structure, qui surpasse, par ses propriétés, tous les modes anté-

rieurs, et qui permet à l’architecte de créer “l’unité des formes”³. Sa “haute valeur” provient de sa *résistance*, et de sa *rapidité d’exécution*. On peut se procurer “immédiatement et partout” les ingrédients qui le composent⁴. Or aux époques d’apogée, les architectes ont toujours employé rationnellement les moyens les plus performants mis à leur disposition par la technique. Il faut donc, à chaque période, identifier ces moyens, et s’imprégner de leur logique, car ce sont eux qui, selon le critère implacable de l’économie, fixent à l’architecture le rythme de son évolution. Il ne fait aucun doute, pour Auguste Perret, que le seul matériau vraiment moderne est le béton armé. Face à ce mode de construction, l’architecte doit appliquer les “lois de toujours”, qui consiste à employer la matière selon ses “qualités propres”⁵. Le béton recèle les potentialités d’une architecture harmonieuse. Par son *monolithisme*, il appelle naturellement le *verticalisme*, et ceci, d’une manière beaucoup plus conséquente que l’architecture médiévale, qui en avait fait un idéal esthétique quelque peu au-dessus de ses moyens réels. Reprenant l’argumentaire sophistiqué de son maître Julien Guadet, Auguste Perret critique l’orthopédie monumentale du gothique, qui, pour dégager les nefs, avait recours à l’expédiant de l’arc-boutant. Le béton armé permet, quant à lui, “d’élever des nefs plus ouvertes”, sans avoir besoin de béquilles pour les étayer. Comme les temples antiques, les grands édifices contemporains pourront avoir eux aussi “leurs façades à l’extérieur”⁶.

Mais il y a, pour Auguste Perret, une raison plus fondamentale qui éloigne le nouveau mode de structure des modèles fournis par la tradition gothique, tout en le rapprochant définitivement du classicisme. Depuis l’origine des temps, l’humanité n’a connu que quatre grands types de “charpente” : la *charpente en bois*, modèle de l’architecture antique (qui en a copié les dispositions dans la pierre “jusqu’aux têtes de chevilles”), “l’ogivale”, avec tout le dispositif de ses nervures, véritable *charpente de pierre*, et, en ce qui concerne la période moderne, la *charpente d’acier* et la *charpente de béton armé*. Parmi ces quatre modes de structure, deux entretiennent des liens spécifiques, privilégiés. L’ossature en béton, qui ne

³ A. Perret, “Les moyens nouveaux de la construction”, *L’Exportateur Français*, 26 mai 1926.

⁴ Perret, grand carnet, 535 AP 313.

⁵ A. Perret, Note manuscrite, petit carnet, (535 AP 313).

⁶ A. Perret, lettre du 18-10-1928 à Arsène Alexandre, (535 A.P. 318) : “Nos cathédrales ont leur façade à l’intérieur, alors que le temple antique est tout extérieur”.

¹ A. Perret, lettre à J.-E. Blanche datée du 22-7-1925, (535 A.P. 322).

² A. Perret, “Le musée moderne”, *Moussion*, Décembre 1929.

connaît aucune forme a priori, prend en effet, par le biais de sa fabrication, l'aspect d'une charpente en bois. Elle en retrouve l'allure générale, mais aussi la texture : "C'est à l'aide de moules que l'on fabrique le béton armé, ces moules, jusqu'à présent, sont en bois, et on les appelle : coffrages. C'est dans le coffrage que l'on place l'armature en acier... et, qu'ensuite, on coule le béton dans lequel se trouve alors incorporée cette armature. Une fois l'ensemble du travail terminé les différents membres de la construction ne font qu'un, les armatures s'entrecroisent de telle manière qu'on peut les considérer comme continues... C'est l'emploi de coffrages en bois qui donne au béton armé son aspect de grande charpenterie et le fait ressembler à l'architecture antique, parce que l'architecture antique imitait la construction en bois et que le béton se sert du bois, de là est cet air de famille dû surtout à l'emploi répété de la ligne droite imposée par le coffrage : certes, on peut faire des coffrages cintrés, mais ils sont coûteux, et n'est-ce pas l'emploi économique de la matière qui détermine le style ?"⁷

Le nouveau mode de construction retrouve le sillon originel du classicisme, car il reproduit mécaniquement dans le béton ce que les temples antiques reproduisaient symboliquement dans la pierre. L'union archétypique de ces deux genres de charpente légitime fondamentalement la recherche d'un ordre classique du béton armé⁸. "Les coffrages en bois que nous employons pour couler le béton avec économie (...) font que nous rencontrons l'antiquité". "Cette rencontre nous ne la cherchons pas, nous ne la fuyons pas"⁹. Le classicisme s'inscrit donc, pour Auguste Perret, au cœur même de la technique comme un retour aux origines reconnues de l'architecture. Il faut alors laisser la construction parler son propre langage, en soustrayant de celui-ci toute rhétorique passéiste. Il s'agit d'appliquer "les lois de toujours" à un problème contemporain, en puisant dans les données de ce problème, les éléments d'une tradition authentique. L'architecture doit tendre à "la recherche du permanent", mais elle ne peut compter sur l'imitation de l'antiquité pour trouver sa voie¹⁰. Elle doit réinventer le classicisme sur la base nouvelle d'un mode de construction qui diffère profondément, par ses propriétés, des techniques anciennes. Permettant "des portées décuplées", le béton armé remet en cause, en la dilatant, l'esthétique antique à laquelle il s'identifie. Et c'est précisément aux limites qu'il révèle – là où ses performances sont indispensables –, la nature de ses ressources architecturales. Auguste Perret s'est d'ailleurs familiarisé avec les proportions permises par le nouveau système de construction, face à des programmes industriels, où s'imposaient les très grandes portées¹².

⁷ Auguste Perret reprend cette analyse dans sa fameuse contribution. Cf. A. Perret, *Contribution à une théorie de l'architecture*, André Wahl, Paris, 1952.

⁸ A. Perret, "Le musée moderne", *op. cit.*

⁹ Perret, *Contribution, op. cit.* Cf. Julien Guadet, *Éléments et Théorie de l'Architecture*, Paris 1901, tome I, pp. 337-340.

¹⁰ Lettre à J.-E. Blanche, *op. cit.*

¹¹ "En appliquant les lois de toujours on fait du moderne sans le savoir". "Certains croient appliquer les lois de toujours en imitant les choses du passé". "L'art, c'est la recherche du permanent". Cf. Perret, petit carnet, *op. cit.*

¹² "Ce n'est pas parce qu'on peut franchir de grandes portées qu'il faut le faire". "Il n'y a pas de règles fixes pour les proportions qui sont infiniment variées, tout dépend du nombre d'éléments qu'elles composent. Il y a comme en musique, une infinité d'accords". Cf. Perret, petit carnet, *op. cit.*

LA RECONSTRUCTION DU CLASSICISME

Pour Auguste Perret, la *reconstruction du classicisme* n'est possible que dans le champ élargi du progrès des techniques. On ne peut tricher face à cet élargissement, car la technique constitue, à chaque époque, une vérité première, et c'est par elle seule que l'architecture peut prétendre à la contemporanéité. Une architecture qui ne serait pas directement issue d'un système de construction ne serait qu'un simple effet de "mode"¹³. Il faut, dans la logique du matériau, trouver le juste rapport du tout et des parties pour atteindre l'eurythmie¹⁴. Mais il convient de fuir le pittoresque, car la nature en est déjà abondamment pourvue. L'architecture devra se départir de tout symbolisme ou autre faiblesse figurative, car sa finalité est d'apporter de "l'ordre" dans le pittoresque de la nature. Elle devra "faire tenir les services les plus compliqués dans le volume le plus simple"¹⁵. Par l'application des règles universelles de *rythme*, d'*équilibre* et de *symétrie*, elle visera au *permanent* en se détachant, autant que sa destination le permettra, des conditions éphémères pour constituer son écrin en *abri souverain*¹⁶.

C'est cette démarche théorique qui conduit Auguste Perret à la formulation, durant l'entre-deux-guerres, d'un nouvel *ordre architectural* fondé sur la technique du béton armé. Cet ordre est le résultat d'un long cheminement, qui, depuis le garage de la rue Ponthieu (qui inaugure la pratique du béton apparent et le contrôle classique de l'ossature), se poursuit, sans interruption, jusqu'à la fin des années trente, avec la construction du Musée des travaux publics¹⁷. C'est probablement en 1922, lors de la conception de l'église du Raincy, que Perret a pris la mesure du défi lancé au classicisme par le triomphe du béton armé. Comme la charpente métallique, la charpente en béton armé pose un problème de composition dû à la sveltesse de ses membrures¹⁸. En raison des performances spectaculaires du matériau, la matière se "rétracte" littéralement sur les nœuds de la trame porteuse, laissant régner partout l'espace vide. Comment qualifier alors cet espace par les pleins, sachant que ceux-ci se dérobent de toutes parts, se concentrant discrètement en "poteaux" et en "parois". Au

¹³ A. Perret, petit carnet, *op. cit.*

¹⁴ "Proportion : rapport de l'entier aux parties". "Echelle : tout ce qui révèle la présence de l'homme". "Eurythmie - Beauté, produites par l'accord de toutes les parties d'un ouvrage". Perret, petit carnet, *op. cit.*

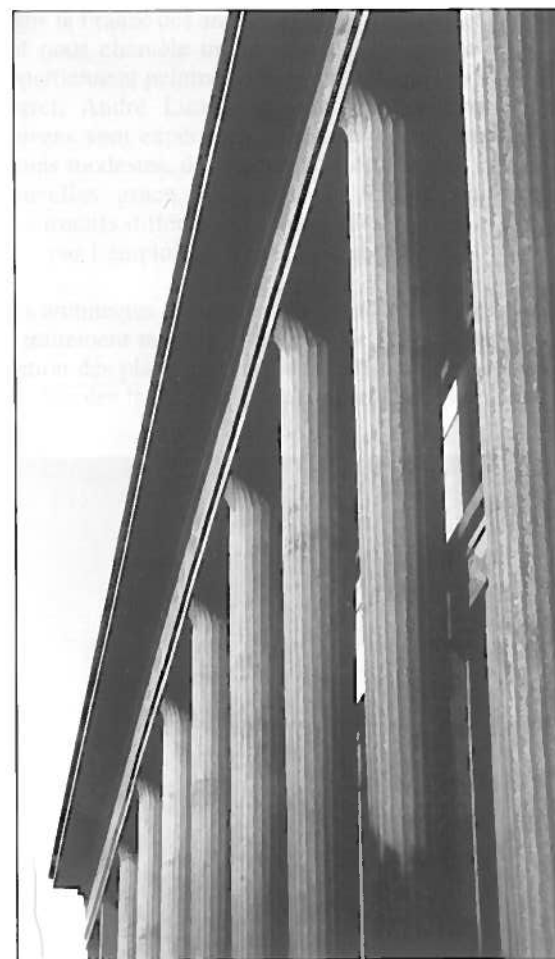
¹⁵ A. Perret, petit carnet, *op. cit.* "L'architecture met de l'ordre dans le pittoresque de la nature". "L'architecture pour atteindre l'art n'a pas besoin du symbolisme". C'est le caractère *non figuratif* de l'esthétique de la raison, qui explique la référence de Perret à la poésie. La poésie dépend aussi des lois de l'économie. Elle définit la même relation au savoir : "Il ne suffit pas d'apprendre des poèmes pour devenir poète. Il faut d'abord savoir parler sa langue". "L'architecte est un poète qui pense et parle en construction".

¹⁶ Perret, *Contribution, op. cit.* Voir aussi : "Architecture - Science et Poésie", *La Construction Moderne* (Paris le 2-10-1932). L'expression "abri souverain" est employée par Auguste Perret à propos du Mobilier national (cf. Marcel Zahar, *D'une doctrine d'architecture : Auguste Perret*, Ed. Vincent et Fréal - Paris 1959, p. 34).

¹⁷ Cf. J. A. "The Building Firm of the Perret Brothers 1897-1954", *Construction History*, vol. 3, Londres 1987 pp. 75-93. "Il Théâtre des Champs-Élysées, 1910-1913", *Casabella* (Milan), Mars 1988 n° 554 pp. 40 à 49. "Auguste Perret et l'église du Raincy", *Archimade* n° 51, Lausanne, fév. 1996, pp. 28-31.

¹⁸ Il suffit de se remémorer ici le travail minutieux de Labrousse à la Bibliothèque nationale, ou de Boileau au Bon Marché, pour comprendre la difficulté. Pour assurer la présence des éléments porteurs, là où la matière se fait de plus en plus discrète, ces architectes repensent le rapport de la colonne aux parties transitoires qui la relient au sol et à la superstructure. On ne parle pas, cependant, d'un "ordre de la fonte", d'un "ordre du fer", d'un "ordre de l'acier".

Raincy, Perret définit une ossature effilée mettant à profit le savoir qu'il vient d'acquérir dans la construction des grandes halles industrielles. Les plans de cette nef trahissent l'hégémonie du vide. Un vide "statique" et "anti-expressif", (qui n'a rien à voir avec celui "pictural" et "abstrait" que rejette vigoureusement Perret dans la "plastique moderne"), et qu'il parvient à maîtriser ici par "l'identification classique" des éléments porteurs. Il y parvient par le jeu des voûtes du plafond, distinguant trois nefs orientées vers le chœur, et par la qualification de l'espace intérieur au moyen d'une lumière colorée issue des claustras, et d'une présence quasi-sculpturale des colonnes cannelées. Il écrit alors dans son carnet : "L'architecture c'est d'abord l'intérieur – elle seule peut créer un monde nouveau dans lequel on entre". "Architecture : objet à la fois construit et sculpté"¹⁹.



A. Perret, Musée des travaux publics. Photo J. Abram.

L'église du Raincy se réduit à une "ossature architecturée". Elle constitue, à ce titre, l'étape critique à partir de laquelle une *reconstruction du classicisme* apparaît pos-

¹⁹ Il note aussi : "Peinture : deux dimensions. Sculpture : trois dimensions. Architecture : trois dimensions et on entre dedans". A. Perret, Note manuscrite, petit carnet, 535 AP 313.

²⁰ Sur ces projets, cf. J. A. : "Perret et l'exposition" catalogue *Paris 1937 : cinquantième de l'Exposition internationale...*, I.F.A. Paris Musées - Mars 1987 - pp. 66 à 71. - "Le Nouveau Garde-Meuble", *Monuments Historiques*, n° 190, Nov-déc. 1993, pp. 98-102. - "Auguste Perret", *Genève, 1927. Concours pour le Palais des Nations*, I.A.U.G. Genève, 1995, pp. 51-52.

sible. Plusieurs années seront encore nécessaires pour accéder à un véritable *ordre du béton armé*. Il faudra infléchir le "jeu de construction" vers une monumentalité plus affirmée et élever la trame d'ossature vers une géométrie plus abstraite. Ce sont les projets d'envergure, tels que les concours du Palais des Nations à Genève (1927) et du Palais des Soviets à Moscou (1931), ou encore le grand projet pour la colline de Chaillot (1933), qui ouvriront la voie aux expérimentations décisives²⁰. En raison même de l'étendue urbaine que ces projets doivent maîtriser, Perret transforme la trame d'ossature en un outil géométrique abstrait qui lui permet de traiter simultanément le vide et le plein, le dedans et le dehors, le positif et le négatif, le construit et le non construit. Il cale ainsi, avec précision, ses projets architecturaux dans la substance urbaine. Mais ce faisant, il inverse les rapports traditionnels entre les instruments de projection et le concret de la bâtisse. Ceci rejaillira bientôt sur la manière dont il concevra certains édifices publics, comme le Mobilier national et le Musée des travaux publics.

Au Mobilier national, la matière se condense sur la grille géométrique pour répondre à toutes les situations que propose le programme. Faite de nombres et de proportions, l'architecture constitue l'abri en écrin et s'affirme ici comme mesure. Composé d'une ossature portant "qui constitue l'abri souverain" sous lequel est placée une seconde ossature, le Mobilier national ne met en œuvre aucun revêtement. "Le béton se suffit à lui-même... c'est de la pierre que nous fabriquons, bien plus belle et plus noble que la pierre naturelle"²¹. Tous les thèmes traités ici seront repris, deux ans plus tard, au Musée des travaux publics, qui représente l'épanouissement de l'*ordre architectural du béton armé*. Perret définit ici une double ossature. Des colonnes tronconiques supportent directement la toiture. Le plancher intermédiaire, à mi-hauteur, est porté par une ossature secondaire et constitue un second édifice, indépendant, placé à l'intérieur du premier. Les colonnes, fines à la base, s'évasent sensiblement vers le haut. La transition vers la poutre est assurée par un tronc de pyramide à base carrée avec courbe de raccordement : "ce n'est pas un chapiteau, c'est un lien, mais ce lien termine la colonne et fait d'elle, avec son galbe et sa base, un individu, une personne – qu'on ne peut sans mutilation allonger ou raccourcir"²². Avec l'*ordre du béton armé*, Auguste Perret apporte une conclusion puissante à trente années d'expérimentation. Il trouve alors naturellement les mots qui plongent au plus profond de la tradition classique, renouant avec cette *organicité anthropomorphique*, qui est la condition de tout ordre en architecture²³.

Joseph ABRAM
Professeur à l'École d'Architecture de Nancy

²¹ Perret, cité par Marcel Zahar, *D'une doctrine d'architecture : Auguste Perret*, Ed. Vincent et Fréal - Paris 1959, p. 34. Voir aussi : Emmanuel de Thubert, "Le Mobilier National", *La Construction Moderne*, 12 avril 1936, pp. 565-577. ("Le palais de Perret s'élève sur les proportions de la section d'or"). Pierre Olmer "Le Nouveau Garde-Meuble National" *L'Architecture*, septembre 1936, pp. 291-296. Roger Dornes, "Le Nouveau Garde-Meuble" *Art et Décoration* XL, 1936, pp. 162-164. A. Perret, "Note Descriptive et technique", *Art et Décoration*, XL, 1936, pp. 165-166.

²² A. Perret cité par B. Champigneulle : "Un nouveau monument de Perret : Le Musée des Travaux Publics", *La Renaissance*, janvier 1939. Sur ce projet, voir aussi E. de Thubert, "Le Musée des travaux publics", *La Construction Moderne* du 19 février 1939.

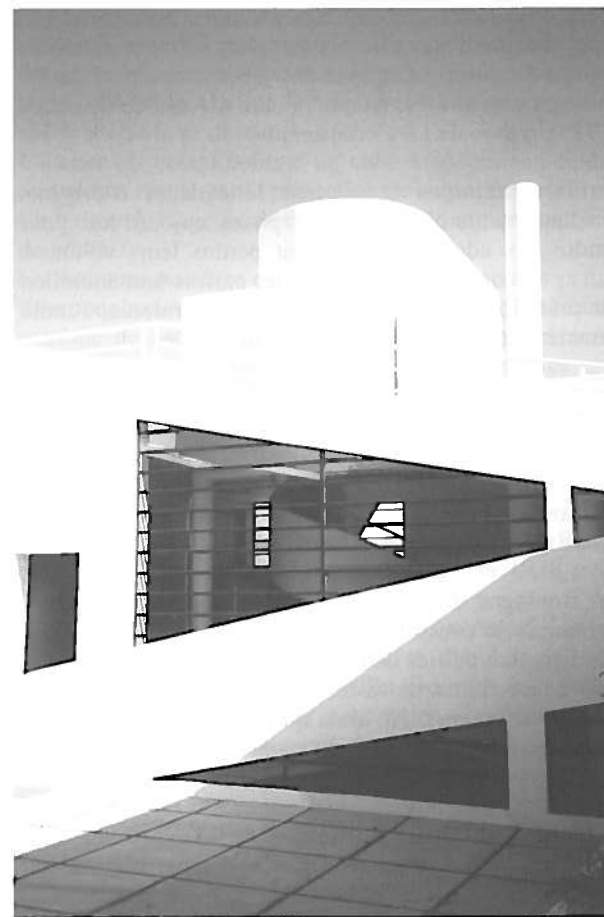
²³ E. Viollet-le-Duc, *Entretiens sur l'architecture*, Troisième entretien, P. Mardaga, Bruxelles, 1977, pp. 81-82.

L'architecture des années vingt en France

1923-1931 : Naissance du mouvement moderne - Les villas d'artistes

Dans la France des années vingt les architectes modernes ont pour clientèle une nouvelle bourgeoisie à laquelle appartiennent peintres, sculpteurs ou musiciens. Auguste Perret, André Lurçat, Le Corbusier, Robert Mallet-Stevens vont expérimenter sur des programmes plus ou moins modestes, des possibilités esthétiques et spatiales nouvelles grâce à la mise en œuvre de principes constructifs différents qui résultent des possibilités données par l'emploi du béton armé et du fer.

Les architectes du mouvement moderne qui recherchent le traitement unitaire et pictural de l'espace avec l'affirmation des plans, tendent vers l'abstraction pour se rapprocher des travaux de Mondrian et Malevitch.



La villa Savoye - Le Corbusier, 1929
Photo : Ch. Schmückle-Mollard, 1994

Dora Vallier disait de Mondrian : "La forme abstraite absolue qu'il a conçue était donc une expression profonde de l'époque..."

Ils recourent à l'emploi du nouveau matériau, le béton armé, qui, s'il n'a pas engendré le plan libre, le toit-terrasse et le jeu des volumes, permet cependant toutes les audaces grâce au voile mince, au poteau, au porte-à-faux qui permettent à ces créateurs de réaliser leur vision de l'abstraction.

Il m'a semblé intéressant de présenter cette période de la production architecturale en France, parce qu'elle s'exprime comme un phénomène particulier, très rare, que l'on ne retrouve qu'une ou deux fois par siècle dans l'histoire de l'art : une décennie pendant laquelle toutes les productions artistiques atteignent au même moment un sommet comparable à l'époque de Saint-Louis pour le style gothique ou, plus proche de nous, à celle des années vingt puis des années quatre-vingts. "Ces courtes périodes de créativité extrême et de beauté qui exigent une définition qui, initialement inconsciente au plan artistique, appartient à un choix de société" (Marco Tabet).

Les années "Art Déco", de 1923 à 1939, se divisent en deux périodes distinctes, une première période de 1923 à 1931, qui correspond à une phase de mise en place, où la commande publique échappe aux architectes modernes, et la seconde phase, celle de l'industrialisation entre 1931 et 1937.

Les années vingt sont marquées par le salon des Arts ménagers de 1923 où sont présentées pour la première fois les cuisines laboratoires conçues par des architectes, et l'exposition internationale des Arts décoratifs et industriels modernes de 1925 où la France se distingue par la qualité de ses créations artisanales (vitraux, ferronnerie, mobilier signé Printz, Ruhlman, Dufrêne, Chareau, Eileen Gray...). Dans le même temps l'Allemagne, exclue de l'exposition de 1925, se distingue par les créations industrielles naissantes du Bauhaus de Gropius.

Dès "1930, la fin du mouvement moderne était décidée par les régimes totalitaires" (Marco Tabet).

¹ Marco Tabet, "La terrifiante beauté de la beauté", *Naturalisme et abstraction dans l'architecture de Jean Nouvel et Rem Koolhaas*, Sens et Tonka éditeurs. Comparaison entre deux courtes périodes de créativité extrême : les années vingt et les années quatre-vingts.



Villa La Roche Jeanneret - Le Corbusier, 1923.
Ici, le béton a permis d'exprimer de la manière la plus forte deux points essentiels de l'architecture du mouvement moderne issus des théories de l'abstraction : élévation sans relief et fenêtres en bande ininterrompue.
Photo : Ch. Schmückle-Mollard

En France, l'année 1930 marque un tournant avec la première exposition de l'Union des artistes modernes, où sont présentés des ensembles architecturaux et décoratifs d'une harmonie exceptionnelle.

L'exposition coloniale de 1931 ne sera pour l'architecture qu'un épiphénomène. De cette exposition est resté à Paris le Palais permanent des colonies, aujourd'hui Musée des arts africains et océaniques. Ce musée de l'histoire de la colonisation sera le premier palais construit à Paris entre 1900 et 1930.

Les chantiers de la deuxième décennie s'éloigneront du concept d'unité, à l'exception de la villa Cavois à Croix près de Roubaix où Robert Mallet-Stevens tenta de retrouver l'unité et la perfection dont témoigne le "palais Stoclet" qui l'influença dans toute sa production.

Dans les années trente l'ère des grands chantiers s'ouvrira – musées, palais parisiens, casinos de province, églises, édifices qui mériteraient un développement particulier pour illustrer cette période dont l'exposition universelle de 1937 marque la fin avant la grande guerre de 1939 – et permettra de présenter deux œuvres particulièrement intéressantes : le pavillon de l'Union des artistes

modernes (Georges-Henri Pingusson) et le Pavillon de la lumière de Pingusson (Robert Mallet-Stevens).

LES ANNÉES 1923-1931

La première période, celle des années 1923-1931, m'a paru mériter un développement particulier car elle témoigne de la naissance de l'architecture moderne.

Elle trouve ses fondements dans les productions avant-gardistes des années 1903 à 1914, dans lesquelles Henri Sauvage et Auguste Perret à Paris, Tony Garnier à Lyon se distinguent par leurs créations originales, ainsi que dans les œuvres de El Lissitzky, Adolf Loos, Charles Rennie Mackintosh, et Josef Hoffmann qui exerça une grande influence sur le jeune Robert Mallet-Stevens, notamment lorsque son oncle Stoclet fera appel à l'architecte pour sa villa de Bruxelles en 1905 ("le palais Stoclet").

Depuis 1965 la France reconnaît le patrimoine architectural des années 1920-1930. Le premier monument historique du deuxième quart du XX^e siècle a été classé par André Malraux en 1965, pour sauver une œuvre majeure de Le Corbusier de la démolition : la villa Savoye, en région parisienne.

Parmi les édifices de cette décennie, protégés au titre des monuments historiques (inscrits ou classés) on compte, en 1995, moins d'une cinquantaine d'hôtels particuliers, villas d'artistes ou immeubles du mouvement moderne dont les intérieurs ont été le plus souvent modifiés comme la maison Guggenbühl (1926), œuvre d'André Lurçat, ou encore l'atelier du peintre d'Amédée Ozenfant (1923), œuvre de Le Corbusier.

De rares témoins conservent leur décor d'origine. Quelques tentatives sont entreprises aujourd'hui pour rendre aux édifices qui les ont perdus leurs volumes, leurs couleurs, leurs huisseries, et parfois leur mobilier. La précision, l'efficacité du détail, l'harmonie, l'unité caractérisent ces productions architecturales.

UNE PRODUCTION PARISIENNE

C'est à Paris et en région parisienne et dans une moindre mesure sur la Côte d'Azur, que s'expriment les architectes modernes.

• À Boulogne sous l'impulsion du maire André Morizet, qui confie la construction de son Hôtel de Ville à Tony Garnier, sont édifiés dans de nouveaux quartiers près du bois de Boulogne, de vastes hôtels particuliers. Pierre Patout, en 1928, alors qu'il œuvre avec le peintre Lombard sur le chantier du paquebot "Ile-de-France", conçoit pour ce dernier un atelier-villa en proue de vaisseau.

À proximité, dans la rue Denfert-Rochereau, sont construites entre 1926 et 1927 trois villas contiguës qui expriment l'unité du nouveau langage architectural et l'existence d'un mouvement d'architecture moderne : La villa Collinet de Robert Mallet-Stevens, aujourd'hui restaurée que caractérise la présence de la grande verticale

de l'escalier sommée d'un porte-à-faux en béton armé sur une verrière arrondie ; la villa Cook², de Le Corbusier, construite sur pilotis pour un peintre américain, et enfin la villa de Raymond Fischer dont les vastes volumes intérieurs étaient à l'origine aménagés avec des meubles de Leleu et des tapis de Da Silva Bruhn, et qui était connue pour les sculptures de Lipchitz ornant le jardin, contemporain de la construction.

• À Boulogne encore, dans la rue du Belvédère succède aux maisons presque jumelles d'Auguste Perret pour Marguerite Huré, peintre-verrier et Dora Gordin, sculpteur, construites entre 1928 et 1929 dans le style de l'architecte marqué par la présence de la grande corniche classique, la maison du sculpteur Foriep de Salis (1927) d'André Lurçat. Dans la maison Godefroy (1928) de Raymond Fischer, c'est avec le plus grand soin qu'ont été conservées ou copiées les huisseries métalliques aux profils très fins et les touches de couleur, employées dans la villa Godefroy, dont la façade arrondie épouse la courbe d'extrémité de la rue : rouge pour l'avent en porte-à-faux de l'escalier et vert pour les huisseries du rez-de-chaussée.

• À Paris dans une impasse du quatorzième arrondissement, la villa Seurat, où Auguste Perret conçut en 1926 l'atelier de Chana Orloff, une série de sept maisons et ateliers pour artistes seront construites par André Lurçat entre 1926 et 1927, sur un mode constructif économique. On y trouve en particulier les ateliers d'Arnold Huggler et de Grommaire et Gœrg, amis de Jean Lurçat, et l'atelier de l'écrivain et journaliste anglais Frank Townsend. Les élévations de l'atelier et de la maison mitoyenne construite par l'écrivain anglais Frank Townsend sont dessinées comme une œuvre cubiste où les tracés réguliers sont évidents et où le rapport entre les pleins et les vides atteint la perfection.

L'atelier est conçu comme un cube évidé en son centre du volume formé par la projection de la grande verrière à l'intérieur. L'étage évidé est porté par de minces poteaux de béton.

La structure porteuse est étudiée avec une grande précision pour construire un édifice solide avec une économie extrême de moyens : les dalles minces de béton armé (6 cm) sont portées par une série de fines poutrelles.

L'édifice qui n'a jamais cessé d'être entretenu témoigne comme la maison Bomsel de la qualité des premières œuvres d'André Lurçat.

• À Versailles, dans un quartier de maisons hétéroclites de la petite bourgeoisie, André Lurçat et Auguste Perret ont travaillé en même temps entre 1924 et 1926 pour construire trois maisons.

C'est à travers ces maisons privées, qu'André Lurçat entame, à partir de 1925, son œuvre d'architecte : les deux villas de Versailles, la villa Bomsel et la villa Michel expriment, par leur conception simple et toute leur rigueur, les nouveaux principes architecturaux.

² Ici sont appliqués très clairement les certitudes acquises jusqu'ici, les pilotis, le toit jardin, le plan libre, la façade libre, la fenêtre en longueur, coulissant latéralement. Le tracé régulateur est ici un tracé automatique fourni par les simples éléments architecturaux à l'échelle humaine, tels que la hauteur des étages, les dimensions des fenêtres, des portes et des balustrades.

La villa Bomsel, à Versailles, présente sur rue un bow-window semi-cylindrique : audace autorisée par l'emploi du béton. L'entrée y est marquée par un petit balcon surmonté d'un auvent.

Sur le jardin, la façade³, percée de longues fenêtres horizontales, est marquée par un avant-corps en saillie. La terrasse en quart de cercle donne accès à un petit jardin dessiné comme un tapis.

Après onze années consacrées à la réalisation d'œuvres majeures, c'est un retour à la maison individuelle pour Auguste Perret lorsqu'il construit pour le peintre mondain Cassandre (Adolphe Jean-Marie Mouron) une maison-atelier à Versailles.

La maison Cassandre, voisine de la villa Bomsel, est la marque de l'engagement de Perret : compromis avec la tradition classique qui caractérise son œuvre, mais avec plus de retenue qu'on ne verra par la suite.

Chaque façade est composée sur un axe de symétrie, le volume est inscrit dans un cube parfait, la distribution spatiale est claire. La rationalité rappelle celle de Paul Guadet : les poutres reposent sur les murs de façade et le poteau cher à Perret est ici absent.

On ne relève sur les élévations aucune tentative de réinterprétation des ordres : la corniche est réduite à une simple doucine en béton.

Cet édifice justifie que l'on ait pu l'apparenter aux expériences de l'avant-garde par les jeux des volumes intérieurs libérés grâce au système constructif et à l'emploi du béton armé.

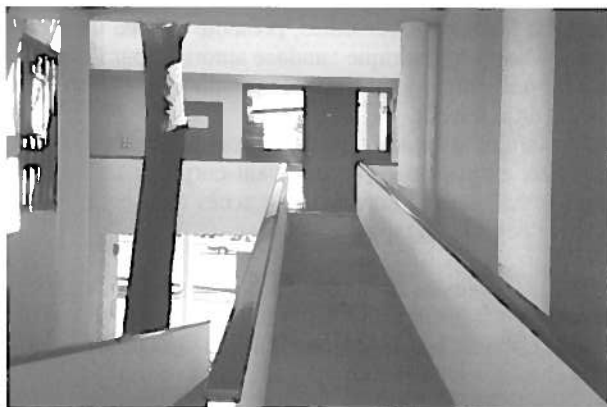
• À Paris, en 1926 et 1927, Robert Mallet-Stevens⁴ édifie les ateliers de la Rue Mallet-Stevens, chef-d'œuvre de l'architecte. Gabriel Guévrekian est chef d'agence pour ce projet qui comporte six maisons-ateliers. Mallet-Stevens fait appel à de nombreux artisans pour la décoration, en particulier au maître-verrier Barillet, aux sculpteurs Jan et Joël Martel avec qui il travaille régulièrement.

Pour l'atelier des frères Martel, Mallet-Stevens fait entrer les arts plastiques dans son architecture dès la phase de conception, afin de ne pas rompre la volumétrie intérieure.

La villa Savoye - Le Corbusier - 1929 : La villa Savoye avait été construite dans un site vierge sur un vaste terrain entouré de grands pâturages. Sous les pilotis, la grande courbe du rez-de-chaussée permet aux voitures l'accès au garage. Après avoir laissé sa voiture le propriétaire empruntait l'escalier à vis inspiré de Gropius, ou choisissait de gravir la longue rampe d'accès vers les pièces de séjour et l'immense terrasse intérieure.

³ En 1933 la façade sur le jardin sera sélectionnée pour illustrer l'architecture contemporaine dans *L'Art des origines à nos jours* publié chez Larousse sous la direction de Léon Deshaies, directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Beaux-Arts.

⁴ En 1929, Robert Mallet-Stevens fonda l'Union des artistes modernes avec Pierre Chareau. Ses dernières œuvres connues furent en 1932 la villa Cavois à Croix près de Roubaix et en 1937 ses pavillons pour l'exposition universelle.



Maison Le Corbusier à La Plata, Argentine.
Vue sur la longue rampe du patio vers l'étage d'habitation.
Photo : Ch. Schmückle-Mollard

Paradoxalement, alors que les intérieurs témoignent de la démarche d'esthète de Le Corbusier, la villa Savoye témoigne du peu de soins qu'il accordait aux problèmes techniques. Très rapidement les terrasses présenteront de nombreuses fuites.

Après la guerre la villa sera transformée en maison de jeunes et entourée des bâtiments d'un lycée et de terrains de sport. Elle se dégrada tellement rapidement que la municipalité propriétaire en décida la démolition. Elle sera sauvée grâce à l'intervention d'André Malraux, Ministre de la Culture, qui signa un arrêté de classement en 1965 mais sa restauration ne sera pas confiée à Le Corbusier de crainte qu'il n'y apporte des modifications.

Le Ministère de la Culture entretient et restaure régulièrement cet édifice non utilisé mais ouvert à la visite. Quelques meubles créés à partir de 1929 avec Charlotte Perriand y sont aujourd'hui présentés.

Dès 1923 Le Corbusier avait employé le système de construction sur pilotis (villas jumelles La Roche et Jeanneret à Paris), les tracés régulateurs pour les façades, et le recours à la couleur à l'intérieur : rose, vert anglais, terre de sienne, terre d'ombre ; tonalités que l'on retrouve à la villa Savoye.

Le cycle des villas s'achèvera pour Le Corbusier avec ce chef-d'œuvre construit avec beaucoup de difficultés et

un budget qui aura doublé entre le début et la fin du chantier.

En marge de ce mouvement qu'illustrent les villas et ateliers, quelques ingénieurs ou architectes essaient de nouveaux principes constructifs mêlant l'emploi du fer et du ciment armé :

L'Institut financier du Comptoir d'Afrique - A. et P. Fournier - 1921-1923 : L'immeuble situé au n° 34 rue Pasquier à Paris face à la Chapelle expiatoire, sépulture de Louis XVI, se caractérise par les sculptures en bas-reliefs de Georges Laurent Saupique, et par ses structures internes à ossatures métalliques et remplissage de béton.

Construit après 1921 par les frères A. et P. Fournier, ingénieurs théoriciens de la résistance du fer dans la construction, l'édifice s'élève sur sept étages dont trois en retrait dans un haut comble.

Le décor de Georges Laurent Saupique couvre les travées pleines entre les travées percées de fenêtres de format carré. Cette façade souvent comparée à celle du Palais permanent des colonies (Musée national des arts africains et océaniques).

L'implantation de la Bayerische Vereinsbank-France dans l'immeuble du 34 rue Pasquier a permis de restituer aux façades leur harmonie et homogénéité par la suppression de vitrines qui les défiguraient, de créer un vaste espace d'accueil, et de repenser l'organisation intérieure sur le principe du plan libre autorisé par le mode de construction.

Avant les travaux, l'édifice qui avait été maintes fois remanié et recloisonné par ses divers occupants ne comptait plus aucun élément intérieur d'origine à l'exception d'un ascenseur et de portes palières en métal, qui avaient été conservés.

Vidé de ses cloisonnements anarchiques, il a été entièrement retraité par Dominique Averland et Christiane Schmückle-Mollard.

Christiane SCHMÜCKLE-MOLLARD
Architecte en chef des monuments historiques

Le béton armé dans l'architecture tchèque du XX^e siècle

LE DÉBUT DU SIÈCLE SOUS LE SIGNE DE CONSTRUCTIONS ET DE MATÉRIAUX NOUVEAUX, EXPRESSION DE L'ARCHITECTURE RETROUVANT SES CERTITUDES PERDUES

En 1903, l'ingénieur Otakar Ott, conseiller du pays pour le bâtiment, publie dans la revue *Technický obzor* (Horizon technique)¹ un article intitulé "Le béton et l'acier dans le bâtiment depuis Monier jusqu'à Hennebique" où il informe en détail ses lecteurs sur les matériaux et les constructions en béton et en acier, "les deux matériaux étant combinés sous diverses formes constituent la partie principale de la construction". Ce nouveau matériau "qui a déjà fait ses preuves à l'étranger"² est ensuite décrit plus en détail avec force exemples tirés de l'étranger. Sa première réaction correspond à l'Exposition universelle qui s'est tenue en 1900 à Paris, où le béton armé enregistre un succès quasi inattendu. Il attire l'attention sur la construction d'un petit pont traversant un bras de la Vltava allant de Zofín à Prague. Ce dernier est cité comme exemple d'un système de répartition des structures porteuses antérieurement utilisé, mais où le béton servait de remplissage à un poteau en acier. "Lorsqu'on a compris que ce n'était pas le béton mais l'acier qui devait être protégé, il y eut un revirement d'opinion".³

Ce bouleversement, l'acier inclus dans le béton, a donné naissance à toute une série de constructions nouvelles qui, en liaison avec l'architecture, ont commencé à s'imposer comme système porteur du bâtiment, mais aussi comme moyen sémantique d'expression déterminant – lors de la réalisation de constructions en acier et en fer – leur caractère et leur aspect global. Néanmoins leur évolution dans ce sens dépendait de l'humeur du temps, des exigences de style et de la mode où le caractère du bâtiment en béton armé était soumis à l'enjolivement exigé par l'époque, au style, et ne s'imposait que peu à peu comme élément de l'art plastique. Il est surprenant de voir combien la communauté technique et

architecturale de l'époque était bien informée sur ce qui se faisait dans le monde en la matière. La liste des réalisations de cette époque est étonnamment complète.

Cependant, par suite de son éloignement des centres européens et mondiaux, la scène tchèque absorbe ce mouvement avec un certain retard, mais celui-ci, par rapport à l'histoire de l'architecture de la fin du XIX^e siècle et du début du XX^e siècle, n'est pas si considérable. Les premières mentions ont trait aux plafonds et aux systèmes de fondations dont l'avantage pour les constructions est apparu immédiatement. En premier lieu, ils présentaient un avantage économique pour le bâtiment. En second lieu, l'utilisation du béton armé dans les systèmes porteurs n'influait pas l'architecture qui était encore sous l'influence de l'éclectisme ou des tendances modernistes de l'Art nouveau, désigné en Bohême sous le terme de Sécession. Celle-ci avait adopté dans son style expressif une combinaison de verre, de fer, de bois ou de céramique, réprimant le caractère propre du béton. Même l'élément – conçu dans l'esprit de l'école de Wagner – de la salle d'attente du tramway avec son urinoir public, projeté en 1909 par l'architecte Emil Králík, bien que réalisé en béton armé, fait plutôt l'effet d'une construction en fer, correspondant tout à fait aux intentions de la Sécession viennoise. Je passe sous silence les constructions typiques des pays tchèques, ou plutôt centre-européens, caractérisées par un stuc abondant, un décor réalisé en mortier relativement mou et recouvrant la maçonnerie traditionnelle en briques du système de construction porteur où les murs sont parallèles à la façade. En parlant du début d'utilisation de ces constructions à Prague, je désigne ici la première décennie du XX^e siècle qui a imprimé à cette grande ville sa marque avec fougue. L'activité du bâtiment, influencée par la croissance économique du pays qui faisait alors partie de la monarchie austro-hongroise, était liée d'une part à certaines aspirations autochtones soutenues par l'élite culturelle, d'autre part à des tendances communes aux activités du bâtiment dans toute l'Europe. Dans le contexte pragoïse, les bâtiments utilisant les nouvelles technologies sont apparus vers le centre en s'orientant expressément vers un caractère multifonctionnel ; certains imitaient même la typologie des bureaux à grande surface de l'école de Chicago. Tous ces bâtiments importants, dans le centre, étaient à leur façon transparents, c'est-à-dire que leur rez-de-chaussée était généralement complété par des passages qui reliaient – et relient encore aujourd'hui – les différents

¹ *Technický obzor*, année XI, n° 2, 3, 4, début p. 9. La revue *Technický obzor* était publiée par l'Union des architectes et des ingénieurs du Royaume de Bohême comme supplément à la revue *Zpravy Spolku architektů a inženýrů* ; à partir de 1902 elle parut sous le titre *Architektonický obzor*.

² Idem, p. 9.

³ Ibid. p. 9.

blocs et rues pragoïses⁴. En 1907, l'architecte Osvald Polívka – fortement influencé par l'école wagnérienne – mit en valeur une nouvelle construction lors de l'édification de la Société tchèque d'assurance (Česká pojist'ovací společnost) dans la rue Spálená. Un examen historico-technique, effectué en 1987⁵, attire l'attention sur un trait fondamental ; il s'agit de l'intersection relativement compliquée de quatre types de constructions : un mur monolithique classique soutenant des voûtes, combiné avec un système de poteaux en béton armé, lequel est mêlé à un système de murs en briques formant deux travées et à une ossature intérieure régulière côté cour. En outre, dans une structure superposée datée de 1927, le même architecte a utilisé des fermes métalliques (acier) autoportantes et des murs de remplissage sur le pourtour avec une cloison légère, système Monier. La construction des ailes de cour rendit possible une technologie surprenante pour l'époque, connue de l'école de Chicago, mais difficilement acceptable dans les conditions relativement provinciales d'Europe centrale. Même si la nouveauté des éléments importés à partir de certaines découvertes de cette école s'était déjà projetée dans le vocabulaire formel des bâtiments tchèques (exemple : Bow Window...) une typologie de cette espèce issue d'une ossature métallique, n'avait pas encore fait son apparition. Ce n'est pas par hasard si, après tant de références citées dans les publications techniques et architecturales, l'architecte passait à l'utilisation du béton armé. Bien plus, en combinant des espaces commerciaux, administratifs et d'habitation, ce bâtiment atteste la tendance générale des bâtiments de grandes villes qui se faisait jour surtout à Prague.

La même année parut, dans les pages de la revue *Architektonický obzor*, un article signé du prof. C.K. Ing. L. Krysl et intitulé "Sur la décoration des bâtiments en béton armé"⁶. À la différence de ce qui précède – où l'auteur concentrait principalement son attention sur les problèmes techniques – celui-ci se consacrait – certainement pas par hasard – à l'effet esthétique du nouveau matériau utilisé. Cependant les bâtiments mentionnés dans cet article ont quelque chose en commun. Qu'il s'agisse de l'intérieur de la banque Vaudoise à Lausanne ou de l'intérieur du palais Excerpti à Milan (les deux bâtiments sont dûs à l'architecte M. Izzo), ces deux œuvres ne peuvent se plaindre de manquer de décoration. Cette ambiance artistique correspond au goût de l'époque pour les bâtiments destinés à cet usage, où l'esthétique de la construction moderne n'est pas encore admissible. L'auteur lui-même attribue un caractère constructif (structural) plutôt à des ouvrages techniques tels que les ponts et les ouvrages utilitaires, qu'à des immeubles somptueux de grande classe (désignés en

Europe centrale sous le terme de palais) qui ne pouvaient pas se tenir à l'écart d'une esthétique abondante comme l'exigeait cette époque. D'un autre côté, une remarque de l'auteur relative à la construction de l'Unité bancaire na *Príkope* de l'ex-banque Viennoise (Vídenská) – aujourd'hui Komerční – de 1906-1908, œuvre de l'architecte J. Zásche réalisée par la firme Nekvasil, mentionne succinctement que les travaux de béton armé ont été confiés à l'entreprise viennoise Wayss et Cie. Le résultat, sous l'influence de l'architecte lui-même, est une construction privée de décor dont l'organisation intérieure exprime la construction utilisée. C'est particulièrement visible dans la salle des guichets de l'édifice, élément apprécié de tous les établissements bancaires. L'économie de plus de 40 % obtenue grâce à l'utilisation de poutres rivetées au rez-de-chaussée y est même mentionnée.

En 1909 est réalisé à Prague un autre édifice ayant recours au béton armé, mais conservant le caractère de l'architecture traditionnelle richement ornée de stuc sur la façade et à l'intérieur. Même s'il s'agit ici d'un bâtiment unifonctionnel, l'Établissement pour les aveugles (Klárův ústav pro slepce) est le résultat de l'élargissement (bâtiment indépendant) d'un bâtiment classiciste déjà existant à son côté dans la "Ville Mineure" (Malá Strana). Ce qui est intéressant à propos de ce bâtiment comme d'ailleurs de celui de la compagnie d'assurance (Pojist'ovna), rue Spálená, c'est que l'architecte Josef Piskac a laissé la construction du plafond telle quelle, sans embellissement additionnel. Dans la plupart des salles, les poutres en béton armé sont visibles. Dans les salles à grande travée il y a des caissons architecturés. Ces plafonds ont pour l'époque une minceur extraordinaire, car ils n'ont que dix centimètres d'épaisseur (sans les poutres s'entend) y compris l'épaisseur du plancher qui n'est que d'un centimètre. Les plaques coudées des escaliers se présentent comme allant de soi. La première décennie de l'évolution de ces constructions se termine à Prague par un édifice plus que remarquable. C'est le palais Lucerna (la Lanterne). Cet édifice résume en soi toutes les nouvelles connaissances acquises sur les nouvelles constructions : le béton armé, la typologie en milieu urbain et l'architecture propre à cette maison. Ce bâtiment à fonctions multiples est l'exemple d'une mise en application conséquente de l'expression propre au béton armé qui est patente dans toutes ses parties. Sur la façade, elle évoque la sémantique des constructions de Perret, surtout du célèbre immeuble de la rue Franklin à Paris. Cette maison multifonctionnelle à l'intérieur de la ville est l'œuvre de Václav Havel, célèbre bâtisseur de l'époque. Ce bâtiment a été réalisé progressivement, eu égard à son étendue et à ses deux façades (côté rue Vodickova et côté rue Stepánská). L'aile côté Vodickova a été réalisée en 1907-1910, côté Stepánská en 1913-1921. Ce bâtiment commercial et administratif possédant un passage, un cinéma situé à l'étage – emplacement plutôt rare à Prague – un restaurant, comprend une grande salle (à l'origine un restaurant) au sous-sol où ont été utilisés des cadres massifs en béton armé de section 102/116, d'une portée de 17,60 m, conçue et calculée par le professeur Bechyně. Ce bâtiment est remarquable par sa claire répartition d'activités relativement complexes, son décor moderniste, sa remarquable conception spatiale créée sur un lotissement de terrain médiéval. La construction pénètre jusqu'à la façade où elle est paradoxalement plus hardie du côté Vodickova datant de 1910, que du côté Stepánská où elle est plus

traditionnelle tout en exprimant davantage le caractère du béton⁷.

Le palais Koruna et l'hôtel Ambassador sur la place Venceslas⁸ achèvent la série des bâtiments dont la transition stylistique a été accentuée par le milieu ambiant et le génie du lieu ainsi que par l'utilisation d'une construction en béton armé, moyen économiquement avantageux, mais avant tout moderne au vrai sens du mot. En outre les attributs mentionnés précédemment – tels que le bow window – soutenus par la nouvelle tendance artistique Art Déco le confirment. Ce modernisme ne consistait pas, dans le milieu pragoïse, en un répertoire de styles – arriérés en comparaison de ceux d'autres villes et œuvres – mais principalement dans l'utilisation d'une nouvelle typologie soulignée par une construction neuve et adéquate, ce qu'était alors précisément, en cette première décennie du XX^e siècle, le béton armé.

LES ANNÉES VINGT SOUS LE SIGNE D'UNE NETTE ÉMANCIPATION DES CONSTRUCTIONS EN BÉTON ARMÉ À L'INTÉRIEUR COMME À L'EXTÉRIEUR DU BÂTIMENT

Nous avons indiqué au chapitre précédent que l'architecture du début du siècle se dégageait progressivement des conceptions de style et de forme et que le béton armé ne s'imposait dans son expression que très lentement ; cependant au cours des années vingt, il marque une rupture stylistique.

À côté de la tendance qui se poursuit de construire des immeubles de bon standing (ou "palais") multifonctionnels dans des alignements traditionnels d'immeubles et sur des lotissements médiévaux, elle crée de nouveaux types en relation avec le développement du commerce et de l'industrie de la métropole devenue entre-temps la capitale d'un état indépendant. Elle s'émancipe par l'expression, en un temps où la pensée abstraite des avant-gardes s'impose à la conscience du monde des arts, donc aussi de l'architecture. Les idées d'abstraction jointes aux études théoriques de Malevitch d'un côté et Le Corbusier de l'autre sont les points fondamentaux de départ de l'activité moderne du bâtiment. Il faut ajouter que Prague est, dans un certain sens, un centre d'initiation. En 1924, est lancé un concours pour la construction d'un palais commercial des foires. Cette tâche, comme le note J. Stepánek dans la revue *Stavitel'* "est neuve pour Prague, sans exemple autochtone" ; en outre "les exemples étrangers ne sont pas tant des directives comme il pourrait sembler à première vue... les conditions imposées par la réglementation exercent une certaine influence." Le nouveau concept de bâtiment jouait là un rôle important de même que la nouvelle génération d'architectes qui avait adopté les idées d'abstraction. En outre,

la logique et la simplicité de la disposition, de même que celle de la construction étaient à la base de cette nouvelle forme d'expression qui s'était emparée de l'esprit de certains exemples pris comme modèles. Cette unité de pensée était issue des bons principes alors inculqués aux adeptes de l'architecture à l'Université technique (CVUT) par le corps enseignant, représenté par des noms tels que ceux des professeurs Stanislav Bechyně, Josef Bertl, Antonín Ausobsky.

Néanmoins les idées en provenance de l'étranger constituaient une force motrice capable d'imprimer à Prague une **expression** moderniste. Les visites et les conférences de Perret, Le Corbusier et d'autres ne demeurèrent pas sans écho.

La construction du palais des foires, dont le concours eut lieu dès 1924, marque une nouvelle étape avec l'édification de cet immeuble en 1926-1927 et son inauguration en 1928. Il devait servir de prototype à d'autres, sorte de modèle formé progressivement sur un seul terrain. Même s'il resta sans suites, cet exemple de bâtiment long de cent quarante mètres et large de soixante mètres fait encore partie des curiosités ("phénomènes") de la ville, si l'on y ajoute encore sa fonction actuelle de musée de l'art moderne de la Galerie Nationale.

Le béton armé y fut mis pleinement à contribution : il rendit possible les principes proclamés de l'architecture nouvelle : bandes de fenêtres par simple accentuation de la façade (une suite de fenêtres longue de cent dix mètres apparut sur la façade), lisibilité de la façade (partition du bâtiment en deux parties : foire et administration), conception spatiale de l'intérieur poussant à l'extrême les possibilités d'expression de cette époque. Ainsi fut créé un espace (hall) "restreint" mais en réalité gigantesque, considéré encore maintenant comme exceptionnel pour l'époque. Cette émancipation expressive du béton armé à l'intérieur d'un bâtiment est attestée par les premiers croquis de 1924 de Josef Fuchs où l'esthétique de la fonction est imbriquée à la construction. La réalisation de celle-ci fut confiée à l'entreprise Dr. Ing. Skorkovsky, l'une des plus grandes entreprises pragoïses, voire tchèques, qui s'orientait vers l'utilisation de la construction en béton armé.

Un langage abstrait devint ainsi le truchement du béton armé, quelque chose de nouveau unissant en soi la beauté de la technologie et la libération de l'espace intérieur. Cette libération était définie par l'ossature.

Il faut remarquer ici que le poteau était en train de perdre toutes les marques de sa division traditionnelle – c'est-à-dire sa division en trois parties – et n'était plus qu'un élément abstrait exprimant la stabilité de la construction, un archétype de la forme historique. Le principe architectonique des constructions cédait le pas au profit de la stéréotomie et du jeu des volumes.

LA SECONDE MOITIÉ DES ANNÉES VINGT : ACCESSION ET ÉMANCIPATION DE LA CONSTRUCTION EN BÉTON ARMÉ DANS L'EXTÉRIEUR URBAIN

La division en parcelles relativement étroites du bloc urbain à Prague (vieille ville et ville récente) a créé un type caractéristique de l'architecture fonctionnaliste pra-

⁴ Il convient ici de rappeler Christian Norberg Schulz et son *Genius Loci*, où il parle de Prague en relation avec cette particularité spatiale que constituent dans la vieille ville les Durchhäuser, maisons pénétrables des deux côtés "si bien que l'on a la possibilité de traverser des blocs sans passer par la rue." Ch. N. Schulz, *Genius Loci, Towards a Phenomenology of Architecture*, Academy Editions London, 1980, pp. 78-110. Ce phénomène est ensuite transposé à la ville des XIX^e et XX^e siècles. Avec son développement, de nouvelles constructions sont appliquées là où justement le béton armé joue un rôle déterminant à propos des passages.

⁵ SHP, étude réalisée par l'Institut SURPMO en 1987, Praha Nové mesto 76/2, Spálená ulice, bloc n° 1095, auteur responsable : Dr. L. Koberská.

⁶ *Architektonický obzor*, année VI, 1907, n° 1-2, pp.1 et 5.

⁷ Pour des informations plus détaillées sur ce bâtiment, voir *Stavětí Praha* 13/1983, pp. 133-146, part. Y. Janková, Palác Lucerna.

⁸ Le palais Koruna, n° 846, a été construit entre 1910 et 1914 par l'architecte A. Pfeiffer, les statues sont de Stanislav Sucharda et de Josef Stursa.

L'hôtel Ambassador n° 840 de 1912 est l'œuvre des architectes R. Klenka et F. Weyr.

⁹ *Stavitel'*, revue mensuelle d'architecture, année VI (1925) éditée par l'association Sdružení architektů v Praze, pp.1-7. Le palais des foires Veletržní paláce průmyslové a velkoobchodní City Velké Prahy, Josef Stepánek : poznámky k soutěži (remarques relatives au concours).

goise qui, bien que reniant tout lien avec l'histoire, devait néanmoins réagir avec le milieu ambiant et entamer un certain dialogue, en l'occurrence émancipé. La qualité de cette architecture était reflétée en définitive par sa reconnaissance à l'étranger dans des revues contemporaines (*L'Esprit nouveau*, *Élan*...) et par les appréciations des historiens contemporains (P. Roth, K. Frampton...)¹⁰. Sur la place Venceslas apparurent alors des palais multifonctionnels : principalement Lindt (1926-1927), Bat'a (1928-1929) et Styblo (1927-1929). L'auteur du siège de la société Lindt, Ludvík Kysela, proposa pour ce bâtiment dès 1925 une construction en béton armé afin d'exprimer d'une manière nouvelle la composition à fonctions multiples de cet immeuble. Celui-ci contenait à côté d'espaces commerciaux des zones de restaurants et de cafés (souterrain et mezzanine), de bureaux, d'ateliers et d'une salle de gymnastique aux étages supérieurs. La construction comportait de grandes poutres en béton armé de portée d'environ onze mètres soixante, en partie orientées vers la place Venceslas et des poutres de sept mètres en partie orientées vers la place Jungmann.

Cette ossature comportant deux grosses poutres est munie de poutrelles qui se croisent en sens perpendiculaire et délimitent des dalles à caissons armées dans les deux sens et renforcées grâce à des goussets. L'escalier est à trois volées (plaque coudée) : la partie centrale est encastrée dans le mur et appuyée sur une assise en porte-à-faux dans la partie des paliers. Intéressante est la conception du souterrain où le plafond est supporté par des poutres en diagonale dans la partie avant et qui permettent une ouverture de l'espace à deux niveaux, mais qui n'existent plus aujourd'hui. Tout comme au palais des foires, c'est l'entreprise K. Skorkovsky qui exécuta les travaux.

La façade "émancipée" est le premier signe (de même que le palais Olympic dans la rue Spálená, construction due également à l'architecte Jaromír Krejcar) d'une conception fonctionnaliste du changement de l'aspect de la rue, bien que la hauteur du larmier, en vertu du règlement en vigueur, est conforme au niveau défini au XIX^e siècle. Ce qui joue ici un rôle décisif ce n'est pas seulement la construction qui permet d'augmenter la surface des baies, mais encore la conception de l'architecture comme moyen de transmission d'un message par des surfaces fixes ou changeantes de publicité.

EXPOSITION CULTURELLE À BRNO EN 1928 : LE COMMERCE ET L'INDUSTRIE EN TANT QUE PHÉNOMÈNES CULTURELS, LE BÉTON ARMÉ EN TANT QUE MOYEN DE COMMUNICATION AVEC LES VISITEURS

En 1928, la République tchécoslovaque organisa, pour le dixième anniversaire de sa naissance, une exposition qui confirma, sur le plan architectural, une certaine vision des architectes tchèques, l'espoir que "la nouvelle époque trouverait dans le bâtiment l'expression à laquelle elle avait tant aspiré".¹¹ Dans le cadre d'un article sur la conférence de Jan Vísek réimprimé sur les pages de *Stavba*,

¹⁰ Voir par exemple, Kenneth Frampton, *Modern Architecture, a critical history*, Thames and Hudson, London, 1982, p. 248. The international Style.

¹¹ Extrait de la conférence de Jan Vísek, O podstate architektury, *Stavba*, année IV, 1926-27, pp. 1-5.

parut le projet de la salle d'exposition de l'architecte J. Valenta. Celui-ci ne différait pas beaucoup du projet final du palais commercial-industriel de Brno construit deux ans plus tard. Si nous revenons brièvement au texte de la conférence de Vísek où s'exprime plus qu'ailleurs l'esprit technique et, avec celui-ci, une vision constructiviste du problème de l'architecture du XX^e siècle, celle-ci est vue sous un angle international car "les ingénieurs ne trébuchent pas sur le problème des nationalités dans leur travail. L'ingénieur ne travaille pas seulement avec sa fantaisie bien qu'il obtienne des résultats fantastiques, mais avec une science exacte, l'expérience, la logique et l'effort de satisfaire aux exigences avec la machine ou la construction la plus parfaite... Son premier commandement est d'économiser l'énergie et le matériau".¹²

Cette tendance nullement inconnue en Europe centrale¹³ exalte la beauté de la machine, la finalité et la perfection de la construction de l'ingénieur. Ce n'est pas par hasard qu'est mentionnée l'élégance des hangars de Freyssinet et la thèse moderniste de la **maison-machine** en tant que résultat de la finalité et de la perfection technique : car, comme le dit Vísek lui-même (et on ne peut oublier Le Corbusier) "une construction parfaite de l'ingénieur est belle non pas parce que c'est l'œuvre d'un ingénieur, mais à cause de sa perfection". Lorsqu'il clame qu'une construction fonctionnelle doit être – comme moyen – non seulement respectée mais utilisée comme élément primordial définissant avec ses exigences, la forme d'un bâtiment à l'extérieur et à l'intérieur, qu'elle doit acheminer le produit – débarrassé de toute émotion propre à la nouvelle époque – vers l'architecture" on peut considérer comme une base conceptuelle d'ensemble le parc de Brno édifié à l'occasion de l'exposition de 1928.

La marche progressive du projet et la réalisation du principal bâtiment de ce parc, le palais commercial-industriel ne manquent pas de susciter l'intérêt. La première esquisse de l'architecte Jan Kalous semble copier¹⁴ un atelier de confection construit à Paris en 1919 par Auguste Perret. La logique basilicale en tant qu'idée reçue d'un espace de hall reflète le béton armé même du côté linguistique. La syntaxe de l'espace met en relief l'échelle et confère au bâtiment un caractère quasi mythique. Le projet original de Kalous qui "avait proposé des arcs porteurs en plein cintre et un plafond horizontal avec des lucarnes" fut modifié justement d'après le projet de Jaroslav Valenta afin d'exclure "la charge des arcs porteurs sur le centre desquels reposait le plafond"¹⁵. Ainsi naquit une construction brillante de voûte en berceau avec des arcs paraboliques munis de nervures en longueur recouverts d'une toiture en verre. Les premiers travaux commencèrent en novembre 1926 et le gros œuvre en béton fut terminé en décembre 1927. Chaque aile comportait trois couloirs de vingt à trente mètres de largeur ; la partie de l'entrée principale avait la forme d'une rotonde de trente mètres de diamètre avec douze nervures en arc de plein cintre atteignant une hauteur de trente-trois mètres. Une réaction immédiate à ce pavillon d'exposition due à la plume de

¹² *Idem.*, pp. 3-413.

¹³ C'est Karel Teige qui attire l'attention sur lui dans MSA I. 1929, en réimprimant l'article de Hubert Gordon Schauer paru pour la première fois dans les *Narodní listy* en 1890. K. Teige le considérait comme "un manifeste du constructivisme avant la lettre" MSA J. 1929, pp. 36-38. Odeon Prague.

¹⁴ *Stavba*, année V, 1926-27, p. 4.

¹⁵ *Stavitel*, année IX, 1928, Josef Stěpanek, Vystava soudobé kultury v Brně, p.139. Hlavní vystavní palác.



Palais des expositions, Brno, 1932
(Archives. Institut de théorie de l'architecture, Prague.)

Josef Stěpanek, sur les pages de la revue *Stavitel*,¹⁶ n'était guère enthousiaste. Elle retournait en pensée au premier projet de l'architecte Kalous (à la Perret) qui était pour lui une construction plus cohérente, tant au-dedans qu'à l'extérieur, et surtout de caractère horizontal. Celui-ci était primordial pour la manière de sentir fonctionnaliste. Il reprochait à Valenta d'avoir surélevé l'espace "principalement dans la rotonde où l'on sent particulièrement le manque de proportionnalité spatiale, c'est-à-dire l'influence de l'architecture sur la formation d'une conception personnelle. Le projeteur apprécie la clôture du plafond de la rotonde. A bon droit : l'effet esthétique est puissant, mais il est hors de doute qu'il a inclus le noyau dans une enveloppe hétérogène et le succès n'est pas aussi total qu'il le serait avec le tracé en ligne droite de l'un ou de l'autre projeteur"¹⁷.

Même dans cette critique perce l'acceptation d'une nouvelle forme et d'une nouvelle construction. La description des autres pavillons vient à l'appui : ceux-ci étaient construits analogiquement et apparaissaient comme des éléments donnant un aperçu des activités culturelles du nouvel état.

Telle était aussi la tour de plaisance due à l'architecte Josef Cermak (aujourd'hui restaurée par l'entreprise Bovis) et la présentation (à côté de l'exposition du Werkbund tchèque, Kolonie Nový Dvůr, qui se rattache à Stuttgart 1927, en dehors du parc des expositions de Brno) d'une maison moderne d'habitation de Oldřich Stary, exemple modèle d'économie quant à la disposition et quant à la construction, avec installations intérieures "sans préjudice du confort et de l'hygiène nécessaires"¹⁸ comme tentative de type destiné à être fabriqué en série.

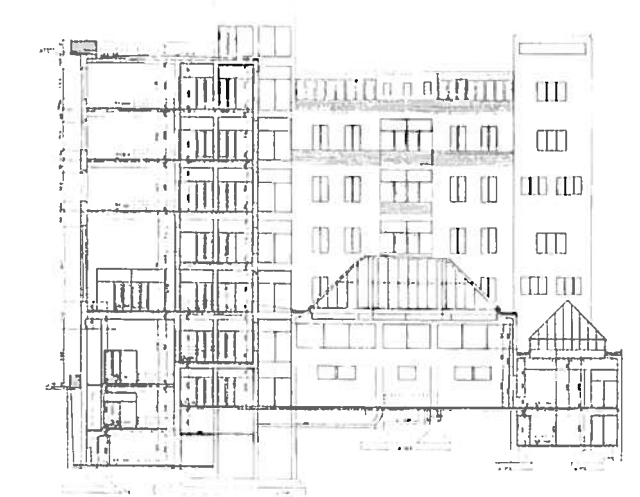
¹⁶ *Stavitel*, année 1928, pp. 133-152, Josef Stěpanek, Vystava soudobé kultury v Brně.

¹⁷ *Idem.*, p. 140.

¹⁸ *Ibid.*, p. 156.

La maison était constituée – du point de vue construction – de parties et de matériaux autochtones (agglomérés Isostone, cloisons en agglomérés Expressbeton...) L'isométrie présentée illustrait la nouvelle technologie comme une réalité directe.

Le contenu de cet événement soutenu – comme toutes les expositions de ce genre depuis le XIX^e siècle – par les nouveautés technologiques qui y sont présentées comme une réalité, constituait le phénomène culturel de toute l'exposition. L'emploi plus généralisé des nouveautés avait la voie facilitée. Il n'en était pas autrement pour le béton armé. Comme nous le noterons dans la dernière partie, il devint dans les années trente en Tchécoslovaquie le matériau "dirigeant" de l'architecture fonctionnaliste et traditionnaliste.



Oldřich Týl, maison de l'YWCA, Prague 2, 1926-1929
(Archives. Institut de théorie de l'architecture, Prague.)

LES CONSTRUCTIONS EN BÉTON ARMÉ DES ANNÉES TRENTE ET QUARANTE - CARACTÈRE "NATUREL" DU BÂTIMENT MODERNE

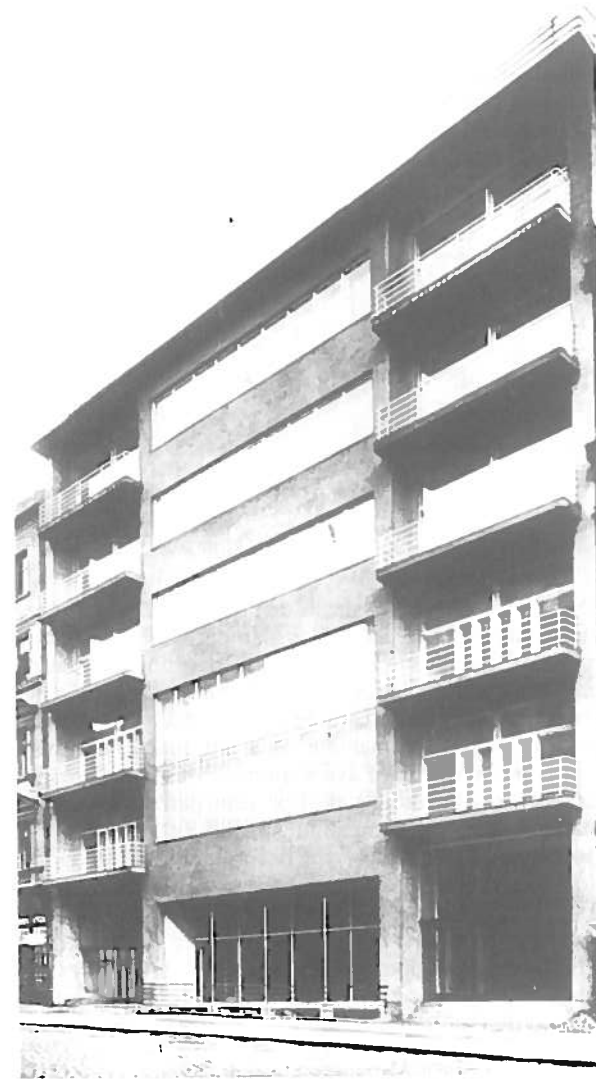
La fin des années vingt confirma, dans l'architecture tchèque, les tendances abstractionnistes et fut accompagnée par une brusque expansion des constructions en béton armé, lesquelles exprimaient mieux ces tendances que les constructions traditionnelles et métalliques.

L'ossature du bâtiment – d'ordinaire un squelette en béton armé – était devenue un système constructif libérant entièrement le plan de l'édifice ; les façades extérieures avec leurs grandes baies vitrées pouvaient entourer l'édifice sur son pourtour, sans piliers entre les fenêtres. C'est ce qu'incarne toute une pléiade de bâtiments à Prague, confirmant l'ascension de l'idéologie fonctionnaliste et de la construction, avec le soutien de quelques solides entreprises de bâtiment¹⁹.

On ne peut pas non plus oublier la construction de logements ; celle-ci ne se détournait pas de la logique constructive du béton armé, même si l'ossature, n'engendrait pas de disposition particulière. Elle demeurait fidèle à la notion traditionnelle de la triple travée héritée des systèmes en murs massifs. Les villas et maisons individuelles relevaient souvent d'une tendance analogue qui débouchait sur une conception proche de la ligne de transparence de Le Corbusier et de la fragilité de la forme abstraite, souvent très compliquée pour l'entretien et la conservation à l'état premier²⁰. Le béton armé est ici utilisé comme moyen artistique et esthétique univoque qui possède en propre une admirable sveltesse.

En 1931, le professeur Stanislav Bechyně publie dans la revue architecte SIA²¹, un article bilan de l'évolution contemporaine des constructions en béton armé et défend son utilisation, car "ces derniers temps dans les milieux du bâtiment on a mis quelque peu en doute le béton armé ; d'une part à cause de catastrophes récentes, d'autre part sous l'effet de l'alerte due à la corrosion des fondations en béton armé causée par les eaux souterraines. En réalité il n'y a aucune raison de s'alarmer... Les constructions en béton armé sont en pleine santé et capables de perfectionnement si l'on augmente leur portance et abaisse les frais de construction"²². Il est à remarquer que l'insuccès et l'effondrement de constructions en béton armé n'étaient pas dus au matériau même, mais à l'inobservance des règles sévères par certaines entreprises qui en tiraient profit en ne respectant pas les normes de qualité des mixtures de béton²³. C'est ce

qu'explique S. Bechyně lorsqu'il insiste sur les constructions réussies dans le monde, en les accompagnant d'une description détaillée et d'une riche documentation photographique. Cette apothéose et apologie de la construction est typique pour l'école des ingénieurs tchèques.



Oldrich Tyl, maison YWCA, Prague 2, rue Zitná, 1926-1929
(Archives. Institut de théorie de l'architecture, Prague.)

Je voudrais encore attirer l'attention sur l'effet esthétique du béton armé ou du béton combiné avec le verre dans l'architecture pragoise. Comme il a été dit au premier chapitre, les passages intérieurs sont un phénomène typiquement pragois qui a subi des changements d'expression depuis le Moyen Âge jusqu'au XIX^e siècle. Leur utilisation culmine dans les années trente où on les voit couverts de curieuses voûtes en berceau formées de nervures en béton armé entre lesquelles sont imbriquées des plaques ou briques de verre ; elles inspirent le respect, même maintenant. Même si elles se trouvent dans un état de délabrement, elles témoignent de la hardiesse spatiale et de la certitude constructive de l'architecture de l'entre-deux-guerres. Parmi les plus typiques et les plus hardies se situent le passage de la Rose noire (Cerná ruze) dû à Oldrich Tyl et la voûte de l'immeuble administratif et commercial Na Příkopě dû à Antonín Cerný et Bohumír

Kozák²⁴. Ce complexe béton-verre parvient même à figurer comme élément décoratif sur la façade de maisons, comme par exemple dans l'immeuble administratif et de rapport de la rue Palacký de František Zelenka. Tous ces exemples – dont on ne peut citer ici qu'un très petit nombre – ainsi que les ouvrages d'ordre technique (halls d'usines, ponts)²⁵ utilisant des constructions évoluées tels les plafonds champignons (port de Holesovice) illustrent les tendances modernes du bâtiment de la première moitié du XX^e siècle. Néanmoins, ceci est à souligner, leur effet esthétique a été en partie atténué par l'idéologie de l'abstraction (surtout dans les années vingt et trente). Celle-ci laissait leur principe constructif sous une forme nue, recouverte de crépi, souvent dissimulée derrière des faux plafonds ou des écrans de sorte que l'impression de dégagement (dématérialisation) et de stéréotomie de l'es-

pace fût maximale, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'édifice. Cette tendance a duré jusque vers les années cinquante où fut posée la question de l'éthique et de la véracité de l'expression constructive du bâtiment. Cette théorie représentée par les brutalistes opérait avec la notion de béton brut, ce qui était nouveau par rapport à l'esthétique architectonique finale. Celle-ci renoua avec l'expression architectonique du bâtiment tendant à l'extrême aux retours historisants dans des fragments et des déformations de rapports et d'échelles.

Petr URLICH

Maître de conférences à la
faculté d'architecture CVUT, Prague

¹⁹ Ce sont les bâtiments les plus connus, par exemple la Direction des tramways, Budova elektrických podniků, due aux architectes A. Benes et Josef Kriz, le bâtiment administratif et commercial Habich à Prague dû à Josef Havlíček et Jaroslav Polívka, la maison des jeunes filles, diverz dum YWCA, due à Oldrich Tyl, etc.

²⁰ L'exemple le plus caractéristique est sans doute la villa d'Eugène Linhart à Prague de 1927.

²¹ Stanislav Bechyně : Vvoj Zelezobetonových staveb, Architekt SIA, année XXX, 1931, dans la revue *Casopis ceskoslovenských architektů* SIA, pp. 25-30.

²² *Idem*, p. 25.

²³ C'est aussi l'exemple de l'activité de Oldrich Tyl qui en tant qu'entrepreneur de bâtiment eut un grand malheur – avec les ingénieurs Tereba et Mikyňa – dans la société Tekta, justement lors de la construction de la maison YWCA. La société fit ensuite banqueroute et O. Tyl cessa de travailler comme concepteur de projets.

²⁴ Voir l'article publié par Y. Janková, Jaroslav Polívka, *Architektura CSR*, 5/1986, p. 228.

²⁵ La construction de nombreux ponts à Prague est un moment de la progression du XX^e siècle : les ponts ont été généralement projetés par des ingénieurs civils en collaboration avec des architectes pour ce qui est de l'aspect définitif. Parmi ces ponts, citons le pont Manes (Manesuv most), œuvre des ingénieurs F. Mencl, A. Nový et des architectes M. Petru, A. Balsanek, 1911-1914, réalisé par la firme Kress & Bernard (c'était d'ordinaire des entreprises étrangères ayant suffisamment de moyens financiers) ; il avait quatre voûtes en béton, chacune à trois articulations, d'une longueur totale de cent quatre-vingt-six mètres ; le pont Hlávka (Hlávkuv most), dû à l'ingénieur František Mencl et à l'architecte Pavel Janák, enfin le pont de Liberi. Pour plus de détails voir *Praha 19. A 20. Století*, Technické proměny, des auteurs Jiri Kohout, Jiri Vancura, SNTL, Prague 1986, pp. 116-119.

Un intervenant

Le conférencier a souligné l'intérêt des étriers du béton armé d'Hennebique ; je précise que les étriers d'Hennebique étaient en tôle pliée. D'autres inventeurs du béton armé comme Edmond Coignet, le fils de François, avaient pratiqué tout de suite des aciers ronds, ce qui signifiait un progrès considérable adapté aux besoins, qui s'est généralisé par la suite. Peut-être Hennebique avait-il maintenu ses tôles pliées parce que cela figurait dans son brevet et que les autres étaient brevetées ; ceci expliquerait pourquoi il l'a maintenu. Cette intéressante conférence me fait aussi penser au développement du béton pré-contraint par la société qu'avait fondé Freyssinet, société qui avait des bureaux dans le monde entier comme celle d'Hennebique ; elle a gardé une part du marché pendant un certain temps grâce à un système de promotion identique à celui d'Hennebique (moniteurs et instructions techniques très détaillées) ; le succès du système a été dû à l'utilisation des mêmes méthodes d'intervention technologique sur le chantier et dans les entreprises

Gwenaël Delhumeau

Le parallèle est en effet très juste ; le rapprochement Coignet-Hennebique met en évidence la nécessité de respecter les brevets : avant 1910 si jamais un constructeur employait le système d'un autre, c'était la catastrophe, le chantier était immédiatement arrêté... Le parallèle entre Coignet et Hennebique est tout à fait judicieux.

Il y a de merveilleux exemples anglais qui se terminent par des conciliations du genre : "Bon, allez, on va en rester là parce que de toute façon il faut qu'on y aille, qu'on avance ; vous avez l'autre chantier à côté, vous ne voulez tout de même pas que je vous l'arrête aussi..." Cela aboutissait à des casse-têtes incroyables !

Mais je voudrais revenir à l'étrier Hennebique : s'il a maintenu son étrier ce n'est pas uniquement à cause du simple respect juridique des brevets ; en fait c'est aussi et surtout parce que c'était un outil tout à fait efficace sur le chantier. Son caractère manipulable, comme l'a dit Cyrille Simonnet, sa facilité d'usage en ont fait un outil véritablement pratique ; l'étrier tient dans la main – c'est vrai, j'en avais un tout à l'heure, je le tenais dans la main au moment où on disait cela. – C'est quelque chose de très simple à mettre en œuvre de même que les dispositifs d'étriers utilisés par les concurrents d'Hennebique. Les étriers de Coignet sont plus complexes à mettre en œuvre que ceux d'Hennebique ce qui explique le démarrage fulgurant de ce dernier ; il y avait toute une manipulation qui était un peu plus complexe. L'efficacité du système Hennebique est liée à l'usage de cette simplicité, de ce système de tôle pliée, qu'on pliait d'ailleurs à la demande sur le chantier.

Un intervenant

Monsieur Abram, vous avez dit, en évoquant la couverture de l'église du Raincy, qu'il n'y a pas de voûte ou

quelque chose comme cela ; pourriez-vous préciser la consistance technique de cette couverture s'il vous plaît ?

Joseph Abram

L'église du Raincy est toujours assimilée au modèle de l'église avec des voûtes qui se contrebutent ; or ce n'est pas du tout ce que dit la construction de Perret ; il y a un système "de voûte torique" qui n'est pas sans évoquer la solution adoptée aux hangars de Marignane après la guerre, hangars dont Esquilan fut l'ingénieur, et qui n'est pas non plus sans parenté avec ce qui a été finalement réalisé au CNIT.

Il y a cette couverture et à l'intérieur une "deuxième peau" si on veut qui, elle, est directement liée aux espaces du projet. Il y a ces voûtes qui se contrebutent d'un côté et puis cette nef qui est couverte par une voûte longitudinale. Or si on se pose la question de la manière dont est contreventé l'édifice on se rend compte que le toit fonctionne véritablement comme une plaque avec deux peaux. Cela n'a rien à voir avec le modèle que semble évoquer la spatialité de l'église

Cette attitude est véritablement chez Perret le produit de l'inflexion du hangar vers la typologie de l'église. C'est une manipulation qu'il explique très bien dans un texte inédit cité par Marcel Mayer, dans une monographie qui n'a jamais été publiée ; elle a été effacée par la monographie de Marcel Jamot qui a été publiée en 1926 dans laquelle il y a un texte absolument remarquable d'Auguste Perret expliquant toutes ses décisions constructives. Si on essaie d'expliquer rapidement la raison pour laquelle Perret tente de bâtir dans le même espace architecture et construction on se rend compte que le seul modèle utilisable est vraiment celui du jeu de construction où les choses sont positionnées les unes par rapport aux autres ; ceci implique une identification très claire des parties et aussi une vision très nette de la globalité ; c'est pour cette raison qu'il y a là une invention constructive. On pourrait définir la couverture du Raincy comme une plaque tridimensionnelle ce qui expliquerait le mystère de son contreventement, la raison pour laquelle elle peut porter sur des colonnes aussi fines : c'est un système remarquable très rarement compris. On dit souvent que Perret n'a pas contribué à l'évolution des techniques du béton armé ; en tout cas il a certainement contribué à l'évolution de la pensée des structures et de leur légèreté ; ce sont ces commandes d'entrepreneur qui permettent d'expliquer cela. Jamais il n'aurait pu passer du théâtre des Champs-Élysées à l'église du Raincy s'il n'avait gagné de l'argent comme entrepreneur et s'il n'avait expérimenté des solutions minimales sur des bâtiments dont les façades l'intéressaient fort peu. La plupart de ces hangars industriels sont des structures à l'intérieur de façades qu'il n'a pas dessinées lui-même. Il s'agit bien d'un problème de construction pur, traité comme tel par l'agence qui accumule une sorte de savoir technique qu'elle peut ensuite valoriser au moyen de l'architecture.

L'église du Raincy est associée à un deuxième projet, celui de la fameuse cathédrale Sainte-Jeanne d'Arc qui n'a jamais été construite ; c'est un projet presque utopique que Perret n'a pas bâti, fort heureusement car avec deux cents mètres de hauteur il y aurait des problèmes de restauration absolument insolubles...

Le Raincy constitue un tournant incroyable dans sa carrière avec la manière dont il récupère sur le plan architectural ce qu'il a investi dans le champ de la connaissance des procédés techniques et expérimenté concrètement, ce qui serait inconcevable si l'architecte était en dehors du processus de production ; en fait l'entreprise sert presque de laboratoire, elle accumule une connaissance, sa logique est présente dans l'agence.

Le Corbusier, dit Perret, annonce le constructeur du XX^e siècle, mais au même moment en 1926, il revendique comme modèle Victor Louis ; il souhaiterait revenir à la situation antérieure à la révolution industrielle, à l'époque où les architectes comme Victor Louis allaient choisir dans les forêts les arbres à abattre pour les structures qu'ils allaient bâtir.

Il y a véritablement là un accident de l'histoire qui n'a rien à voir avec l'expérience de Prouvé ; le mot "constructeur" chez Perret n'a pas la même signification que chez Prouvé. Il y a une très grande erreur qui est commise en général par rapport au modèle industriel.

Il est vrai que l'architecture quand elle est conçue en éléments comme au Raincy permet de faire les choses autrement ; on peut ensuite facilement l'industrialiser comme au Havre où on trouve cette architecture avec le front de mer sud et avec une standardisation des éléments qui a donné lieu à un chantier industrialisé, l'un des plus grands et des plus remarquables en France.

L'architecture de Perret permet cette pensée de la construction, mais ça n'est pas cette pensée de la construction qui informe ce découpage architecturo-constructif des éléments ; il y a des raisons beaucoup plus profondes qui sont internes à l'évolution. C'est la raison pour laquelle les phases obscures de 1892 à 1903 sont en réalité éclairantes pour comprendre les projets "ultimes" de Perret ; en effet, c'est dans cette phase-là où tout ce qui a été présenté comme naturel, la relation entre le béton et un certain mode de pensée architecturale, ne fonctionne pas ; on se rend compte que c'est le produit d'un très grand nombre de choix et que c'est une accumulation culturelle avec cette très grande diversité et cette richesse culturelle du naturalisme qui permet de positionner la relation entre le béton armé et un certain idéal architectural.

Bertrand Lemoine

Il me semble qu'on ne voit pas très clairement, malgré les travaux de Joseph Abram ou d'autres, cette importante articulation dans l'œuvre de Perret entre le travail d'architecte d'agence, d'architecte indépendant et le travail d'entreprise, de bureau d'études ; et pourtant on sait que l'entreprise a construit un certain nombre des grands projets de Perret, le musée des travaux publics – qui fut une commande directe à l'entreprise Perret sans adjudication – la tour Perret à Amiens – il y avait deux

entreprises, une locale et celle de Perret – donc il est clair qu'il y a une espèce de connivence entre les deux. En définitive, a-t-on une idée plus précise de la synergie économique et institutionnelle de l'agence et de l'entreprise – ce qui d'ailleurs est un peu paradoxal compte tenu de la position de l'architecte libéral que va défendre Perret qui fut, rappelons-le, le premier président de l'ordre des architectes ! – et simultanément de l'échange de savoir-faire, avec ces aller et retour qui informent l'architecte en tant que producteur de formes ? – On est tout de même aux premières loges lorsqu'on a une entreprise qui bénéficie d'une bonne implantation lui permettant les meilleurs choix techniques et architecturaux et la réalisation de choses comme les colonnes de Perret, véritables tours de force de coffrage avec à chaque fois des précisions incroyables de coffrage ! – Comment cet aller et retour, cet échange de savoirs s'opère-t-il en réalité ? Voit-on un peu plus clair dans cette situation si particulière au XX^e siècle ?

Joseph Abram

Je ne voudrais pas mobiliser la parole mais il est vrai que dès qu'on parle de Perret, il occupe tout le terrain et c'est assez normal.

Cette question est effectivement très importante et je pense qu'on a les moyens d'avancer aujourd'hui.

Les fonds d'archives offrent plusieurs pistes : c'est surtout dans la correspondance, dans les pièces écrites qui ont été, comme on le sait, cachées pendant plusieurs années et auxquelles on a maintenant accès que l'on peut trouver des éléments de réponse à ce problème.

La question "institutionnelle" doit être posée très rapidement parce qu'il y a une énigme sur le statut. Perret représente un cas dans l'histoire de l'architecture française ; il est positionné comme tel dans les années vingt et on parle d'un "cas Perret" dans les années trente et ce jusqu'à sa mort.

Il y a un dossier assez extraordinaire à Amiens où, comme on le sait, la tour a posé énormément de problèmes, et où Perret a emporté l'adjudication avec l'entreprise Bouvet & fils qui était une entreprise locale : à un moment donné il a fallu réévaluer le financement de la tour et la Cour des comptes a dû s'en mêler plusieurs fois. Ces documents sont précieux car, à cause de ce regard très pointu qui est posé sur l'économie du projet, on a accès à certains débats qui figurent dans les rapports et on se rend compte par exemple que certains soulevaient le problème de l'anomalie d'un marché remporté par un architecte qui agissait en tant qu'entrepreneur ; cela créait une source d'embarras très vive. Un membre de la commission a même répondu : "Ça dure comme ça depuis le théâtre des Champs-Élysées. Perret est le premier président de l'ordre des architectes ; si l'ordre s'y retrouve on ne va quand même pas s'en mêler !"

Or l'explication "réelle" on la connaît, lorsque Perret est interviewé en 1926, il s'oppose à la notion d'ordre des architectes.

On lui pose la question car on sait qu'elle est dans l'air ; le code Gadet faisait alors un peu office d'éthique pro-

fessionnelle. Perret est gêné car il a depuis longtemps des problèmes – en 1926 on l'accuse d'être le représentant des trusts du béton armé ; cela explique les démêlés que Perret a eu avec la profession d'architecte. – Donc à l'époque il n'y a pas d'ordre des architectes et Perret est contre. Par la suite, il y a l'évolution de sa carrière, il entre comme on le sait à l'Institut en 1943 et on a des lettres fantastiques de Le Corbusier et de Guilbert qui donnent leur point de vue sur la question. Elle est perçue comme une sorte de victoire sur l'institution même : Le Corbusier salue l'entrée de Perret à l'Institut en 1943 en disant : "Vous les avez bien eus !" En ce qui concerne l'ordre des architectes c'est la même chose, cela signifie que Perret a une position que lui seul peut se permettre ; en fait, sa stature sur le plan international s'est bâtie dans les années trente ; c'est l'époque où il est reconnu nationalement par ses conférences à l'Institut d'art et d'archéologie et internationalement par ses invitations à l'étranger : après Le Raincy on le publie aux États-Unis et en Angleterre. Sa correspondance l'atteste : il répond à l'époque à des courriers d'éminents architectes américains, ou d'architectes suisses comme Dreyer sur des questions techniques ; il est considéré comme un expert hors normes en béton armé.

Cela ne signifie pas que cela se passe bien ; il a en fait énormément de difficultés et d'ailleurs le dossier d'Amiens apporte des éléments de compréhension ; voilà pour le côté institutionnel.

L'autre question concerne les traces qui restent de l'entreprise dans le fonds d'archives ; il y a une période extraordinaire, celle où Perret est obligé de rendre des comptes à la commission d'épuration car il a tout de même travaillé pendant la guerre. Il a continué de travailler sur un projet pour la marine nationale auquel on reconnaît un certain caractère stratégique. Il est donc obligé de s'expliquer si bien que l'on a des éléments de débat.

Il y a une dizaine d'années, lors de l'exposition Perret, un ami anglais avait écrit : "Perret c'est un peu le Pétain de l'architecture". Cela a entraîné un tollé chez les anciens de Perret. Erno Beltinger notamment s'est élevé contre cette thèse car il existe de nombreuses preuves que Perret a eu une attitude tout à fait rigoureuse. Il était en liaison avec Dalloz dont on connaît le rôle éminent dans la Résistance – il existe des lettres assez extraordinaires –. En définitive, grâce à cette commission d'épuration, on a des listes de travaux et d'ouvriers : pour une fois on a le nom des gens...

Ce fonds est d'une richesse extraordinaire pas seulement pour comprendre l'œuvre de Perret, pas seulement du point de vue historique ou monographique mais aussi pour comprendre véritablement le fonctionnement de la profession et de cette structure particulière ; il y a des pièces à étudier que l'on est parfois surpris de trouver là où on ne les attend pas : des documents vraiment essentiels se trouvent notamment au sein de la correspondance qui ne concerne pas l'entreprise.

Béton et monuments historiques

UNE HISTOIRE PARALLÈLE

Nécessairement moderne, souvent brutal, tant comme technique que comme matériau, le béton et surtout le béton armé, semble bien opposé à toute idée de patrimoine, plutôt évocatrice d'ancienneté vénérable et de certitude rassurante. Pourtant, un examen plus attentif du développement parallèle de ces deux domaines révèle une étonnante similitude de parcours, remplie de coïncidences et de croisements qu'il semble difficile d'attribuer aux seuls hasards de l'histoire. À défaut d'une recherche qui reste à écrire, nous esquisserons ici ce qui pourrait en constituer la trame.

La genèse, tout d'abord, se situe dans les deux cas durant la dernière décennie du XVIII^e siècle : si la révolution française "invente" la notion comme le vocable de "monument historique", le terme de "ciment romain" est donné en 1796 en Angleterre "à une espèce de chaux hydraulique à prise très énergique obtenue par la cuisson d'un calcaire très argileux", explique à la rubrique "ciment" le dictionnaire de la construction de Pierre Chabat publié en 1881¹. De son côté, Peter Collins dans son ouvrage *Concrete*² récemment traduit, attribue au Français François Cointeraux la paternité de cette technique dans les années 1786-1787. Bien sûr, on est loin de la conception actuelle du béton, mais la description qu'il donne du "modèle d'une citerne en béton imitant la forme d'un œuf" reste néanmoins d'une étonnante actualité.

Le XIX^e siècle va permettre, dans les deux domaines et de façon parallèle, de développer et d'organiser les méthodes et surtout de les réglementer. Dans chacun des cas, l'enjeu est considérable ; à la fin de la première moitié du siècle, l'institution des monuments historiques est arrêtée dans ses grandes lignes, le ciment armé dispose de ses premiers brevets (Coignet) ; trente ans plus tard, les deux systèmes sont définitivement organisés avec leurs cadres techniques, réglementaires, voire leurs systèmes de monopole ; tout est en place pour la rencontre.

En réalité elle s'est déjà amorcée sur deux plans différents : premièrement par un usage, tout d'abord modéré, du béton en tant que matériau permettant des consolida-

tions ou reprises en sous-œuvre, limitant ainsi des démontages-reconstructions nuisibles à l'authenticité archéologique de l'édifice (cathédrale de Bayeux par Eugène Flachat - 1859) ; d'autre part, par la construction d'édifices, d'abord de taille modeste, puis plus monumentaux comme l'église du Vésinet en 1864 par l'architecte Louis Auguste Boileau et François Coignet entrepreneur, et surtout l'église Saint-Jean de Montmartre (système Cottancin) conçue en 1894 par Anatole de Baudot, architecte des monuments historiques, qui en appliquant les principes constructifs structurels de Viollet-le-Duc confère au matériau ses lettres de noblesse, dix ans avant les premières réalisations emblématiques de Perret : l'immeuble de la rue Franklin (1903) ou le garage de la rue de Ponthieu (1907) à Paris.

La fin du XIX^e siècle voit simultanément le service des monuments historiques achever de se structurer et le béton céder définitivement la place au béton armé. L'année 1893 est tout à la fois celle du premier concours de recrutement d'architectes en chef des monuments historiques et celle, notoire, du dépôt des brevets de François Hennebique. Pure coïncidence, sans doute, mais Peter Collins ne manque pas de noter que l'armature métallique du béton armé n'est autre que le procédé qu'Henri Labrousse utilise en armant de "grillage à poules" les coupes en plâtre de la bibliothèque Sainte-Genève³. Or, on sait que Labrousse, l'un des pères fondateurs du service français des monuments historiques, a dans son atelier Julien Guadet, qui, nommé en 1894 professeur de théorie à l'école des Beaux-Arts de Paris va avoir comme élève le plus illustre Auguste Perret. "Où le fils du tailleur de pierre construit le temple du béton armé" titrait récemment une publication consacrée au théâtre des Champs-Élysées, faisant allusion au métier de Claude-Marie Perret, père de Gustave et Auguste⁴ : raccourci peut-être un peu rapide mais moins innocent qu'il n'y paraît à propos d'une œuvre datée de 1913, année plus connue des milieux patrimoniaux pour le vote de la loi du 31 décembre sur les monuments historiques.

Plus discrètement, cette même année 1913 voit la réalisation à Paris du collège Jules Ferry, conçu par l'architecte en chef des monuments historiques, Pierre Paquet et salué récemment par le dictionnaire de l'architecture du XX^e siècle⁵, pourtant peu prolixe sur la production des

¹ *Dictionnaire des termes employés dans la construction*, Pierre Chabat, Ed. Morel et Cie, Paris, 1881.

² *Concrete*, Peter Collins, 1959, traduction française : *Splendeur du béton*, Ed. Hazan, 1995.

³ *Idem*.

⁴ *La perspective Montaigne*, Lucien Maillard, L'avant-mémoire, 1991.

⁵ *Dictionnaire de l'architecture du XX^e siècle*, Ed. Hazan Institut français d'architecture, 1996.

architectes officiels, (à peu près aucun des architectes en chef des monuments historiques ou des bâtiments civils et palais nationaux n'est cité), comme "remarquable pour son plan, sa structure de béton armé et ses toits-terrasses, sans doute un des bâtiments les plus modernes en France en son temps". Même constat de modernité en 1913 encore pour l'immeuble en ciment armé d'Henri Deneux rue Belliard à Paris.

La guerre de 1914-1918 va jouer bien sûr un rôle déterminant dans l'expansion de l'usage du béton armé ; en devenant l'unique matériau susceptible d'offrir une protection face aux progrès de l'artillerie, la filière béton s'organise à grande échelle au niveau de la production des cimentiers et du développement des savoir-faire. Les années de l'immédiat après-guerre vont profiter de cet acquis et resserrer le lien déjà amorcé entre béton et monuments historiques : qu'il s'agisse des campagnes de restauration telles que la célèbre reconstruction par Henri Deneux de la charpente de la cathédrale de Reims sous forme d'éléments préfabriqués légers assemblés, ou de l'activité multiforme d'architectes des monuments historiques comme André Ventre, qui tout à la fois restaure les monuments sinistrés de la Meuse, prône une doctrine régionaliste pour la reconstruction des villages détruits et réalise en 1931 avec Émile Aillaud et Roger Henri Expert la gare de Versailles-Chantiers, remarquable exemple d'utilisation du béton armé. C'est déjà en béton qu'André Ventre avait construit en 1921 "l'ouvrage" de la tranchée des baïonnettes à Verdun, monument tant commémoratif qu'historique puisqu'il sera consacré dès l'année suivante par la première mesure de classement d'un édifice du XX^e siècle ; bien sûr, le matériau n'est en aucun cas la motivation de la protection. Il n'empêche que, quelques années seulement après la généralisation de son usage, le béton peut aussi bien être admis à restaurer les édifices les plus précieux de notre patrimoine, qu'à faire partie intégrante de celui-ci. Même s'il ne s'agit là que de cas isolés, une telle bienveillance à l'égard de la nouveauté n'en demeure pas moins troublante de la part d'un système dont la doctrine arrête alors l'histoire (et encore), à la fin du XVIII^e siècle.

La deuxième guerre mondiale va poursuivre, à une échelle bien supérieure, le processus déjà engagé et les vingt années de reconstruction qui la suivent vont définitivement faire du béton armé le matériau incontournable de la construction et dans une moindre mesure de la restauration. Quelques ouvrages récents ont analysé les raisons qui ont amené la filière béton à exercer un quasi monopole dans le domaine du bâtiment⁶ : Développement sans précédent des usines de production de ciment pour alimenter les chantiers de fortification allemands durant l'occupation, rôle déterminant des ingénieurs des ponts et chaussées dans l'organisation de la reconstruction, etc. Un fait est certain, à la différence de nombreux pays étrangers, le béton ne laissera aucune place en France aux autres filières constructives, qui resteront la plupart du temps au stade de prototypes ou de réalisations isolées malgré l'inlassable énergie d'un Jean Prouvé par exemple dans le domaine de la préfabrication métallique.

Mais si les historiens de l'architecture commencent à travailler sur ces années dites des "trente glorieuses", aucune recherche ne semble jusqu'à présent s'être intéressée au rôle joué par les architectes du service des monuments historiques durant cette période, qui est pourtant loin d'être négligeable, même si elle ne constitue pas comme on peut l'imaginer leur principale source de fierté (peut-être à tort). Nombreux sont les architectes en chef des monuments historiques exerçant également les fonctions d'architectes des bâtiments civils et palais nationaux qui au lendemain de la guerre vont avoir en charge soit en tant que maîtres d'œuvre, soit comme architectes conseils, la reconstruction des villes détruites et qui, comme leurs confrères, vont donner au béton une place prépondérante au sein de démarches bien diverses : régionaliste comme Sylvain Stym-Popper et Robert Vassas qui proposent une technique de panneaux de placage en pierre sur des murs en béton banché (H.B.M. de Meudon en 1949), ou moderniste comme Robert Camelot qui met au point avec Bernard Laffaille (l'ingénieur entre autre de Notre-Dame de Royan) un prototype d'école circulaire (1952) avant de réaliser, associé à Jean de Mailly, Bernard Zehrüss, Jean Prouvé et Nicolas Esquillan le bâtiment du CNIT, aboutissement de la technologie des coques en béton mince (1959).

En marge du service des monuments historiques, plusieurs architectes mènent parallèlement une réflexion patrimoniale et contribuent à innover dans la construction en béton à l'instar de Pol Abraham (immeubles préfabriqués expérimentaux à Orléans en 1946), plus connu pour sa réfutation de l'analyse des structures gothiques de Viollet-le-Duc, ou Albert Laprade qui débute sa carrière par la reconstruction de Lille et développe une pensée historiciste avant de devenir dans les années cinquante l'architecte associé à la réalisation des grands barrages hydroélectriques.

Est-ce une coïncidence si le béton, incontournable dans la construction neuve, devient dès la fin des années quarante de plus en plus présent dans les opérations de sauvetage des monuments ? Les procédés élaborés par Jean-Pierre Paquet à cette époque se développent au point que les entreprises, spécialisées dans le domaine de la restauration en revendiquent explicitement la maîtrise technique : en témoignent leurs publicités dans le milieu des années cinquante où elles n'hésitent pas à faire figurer leur qualification "béton armé" exactement sur le même plan que les savoir-faire "nobles" issus du compagnonnage : la maçonnerie, la taille de pierre ou la sculpture⁷.

Ainsi, l'usage du béton, loin d'opposer de façon simpliste radicaux, héritiers du mouvement moderne et traditionalistes, défenseurs du patrimoine, semblerait plutôt réunir les deux camps dans une savoureuse ambiguïté, peut-être trop oubliée, et que consacrerait définitivement en 1957 le premier classement d'une réalisation architecturale à part entière du XX^e siècle, le théâtre des Champs-Élysées précisément. Si la personnalité d'Auguste Perret, décédé trois ans plus tôt, modère en apparence l'audace du geste, le béton remporte là une victoire significative, confirmée en 1964 par une nouvelle étape, l'inscription à

l'inventaire supplémentaire des monuments historiques, du vivant de l'architecte, d'un autre manifeste, combien plus dérangeant, de l'architecture moderne en France, l'unité d'habitation de Marseille, terminée en 1952. Le pas est franchi, la villa Savoye sera classée l'année suivante.

L'intérêt technique suffirait-il à lui seul à expliquer l'aisance avec laquelle le béton a réussi son "intégration", allant jusqu'à faire oublier presque sans le moindre remords le principe fondateur de tout acte moderne de restauration, celui de la réversibilité ? Matériau fondamentalement "patrimonial" dans le sens où il ne peut être réemployé et où sa démolition s'avère souvent impossible, du moins économiquement, — on connaît les exemples fameux de la ligne "Maginot" ou du mur de l'Atlantique — le béton nous condamnerait-il à savoir l'entretenir ou le restaurer, dans une démarche extrême de conservation, aboutissement ultime de notre monde patrimonial où la négligence conduirait à la disparition de l'espèce ? C'est peut-être cette question que nous posent aujourd'hui les centrales nucléaires, application actuelle la plus élaborée et la plus symbolique d'un matériau qui semble être à la construction ce que le patrimoine est à la pensée contemporaine : une obligation incontournable, génératrice en permanence du meilleur comme du pire.

LA PROTECTION EN RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR

Les services du ministère de la Culture se sont engagés en région Provence-Alpes-Côte d'Azur depuis une dizaine d'années dans une politique d'étude et de protection des témoins architecturaux du XX^e siècle les plus significatifs. Dès la création de la COREPHAE en 1985, une place prépondérante a été donnée à ce secteur, bien sûr en raison du rôle privilégié qu'a pu tenir la côte d'Azur dans le développement du mouvement moderne, mais aussi grâce au travail obstiné de chercheurs et d'enseignants dont on ne citera que Gérard Monnier, alors professeur à l'université d'Aix-en-Provence. Dans le seul domaine de l'architecture, une quarantaine de réalisations sont aujourd'hui classées ou inscrites à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques, représentatives des principaux courants de création qui ont marqué les années 1920-1970. Or, malgré la diversité des programmes et des typologies représentés, un dénominateur commun lie la presque totalité de ces ouvrages : l'usage constructif du béton armé.

Les précurseurs

Trop rapidement peut-être assimilé au mouvement moderne, le béton armé est déjà largement utilisé dès les premières années du siècle dans la réalisation des structures de programmes importants : c'est le cas de l'hôtel Negresco à Nice, construit par Edouard Niermans en 1912, dont les photos d'archives nous montrent une ossature en béton que ne laisse guère deviner le décor éclectique qui la recouvre. Bien plus qu'un usage réel du béton, le mouvement moderne va surtout s'employer à lui conférer une esthétique propre, quitte à recourir à de fréquents artifices ; l'exemple le plus significatif nous est donné par la construction de la villa de Charles et Marie-Laure de Noailles à Hyères (1924), véritable manifeste

du courant naissant. Robert Mallet-Stevens conçoit une architecture de béton, mais les difficultés de réalisation amènent le commanditaire à se contenter d'une image "cubique". La construction se fera en pierre du pays et le béton ne sera, comme souvent, utilisé que pour régler les problèmes de linteaux ou de porte-à-faux des balcons. Dans le club-house de Beauvallon (Grimaud), construit par Pierre Chareau et Bernard Bijvoët en 1927, le béton est plus largement utilisé mais l'effet de grande portée d'un voile mince sur la terrasse est réglé par sa suspension à une trame de poutres, non visibles, largement dimensionnées.

De même pour Georges Henri Pingusson et Paul Furiat à la villa Romée à Cannes (1928), où l'architecte, visiblement influencé par Wright, joue sur une ambiguë juxtaposition de références modernes et traditionnelles et où le béton permet surtout la réalisation de baies en bandeau provoquant une esthétique forcément indissociable du matériau. À la villa l'Artaud au Pradet (Var), Le Corbusier en 1930 inverse les rôles : le béton sert aux structures horizontales, mais elles reposent sur des murs porteurs périphériques en pierre du pays apparente : la perception d'une volumétrie inhérente à l'emploi du béton l'emporte sur la réalité constructive, pourtant si visible, d'une maçonnerie en pierre traditionnelle.

Dans les constructions emblématiques du mouvement moderne d'Eileen Gray (E. 1027 à Roquebrune Cap-Martin en 1926-1929 ou "Tempe à Païa" à Menton en 1932-1934), le béton paraît omniprésent, mais, là encore, il s'agit plutôt de brique enduite aux arêtes vives, son seul usage étant réservé au traitement des difficultés techniques particulières. Dans l'hôtel "Latitude 43" que réalise à Saint-Tropez Pingusson en 1932, la structure est cette fois en béton armé mais le programme est d'une toute autre ampleur. En fait, on voit clairement que bien plus qu'un rôle novateur sur le plan technique dans le développement de l'usage du matériau, le mouvement moderne vise surtout à un changement des mentalités : l'esthétique du béton est désormais compatible, pour une élite moderniste, avec l'image d'une villégiature de luxe, jusqu'alors plutôt habituée aux références éclectico-régionalistes. Choix délibéré ou plutôt résultat de contraintes techniques et économiques — contrairement à l'idée reçue, le béton coûte cher pour de petits programmes, surtout dans une région où les entreprises, épargnées par la commande militaire de la première guerre mondiale ont peut-être moins développé leurs savoir-faire —, qui permet à Louis Hauteœur en 1929 de souligner la contradiction : "Dans certains hôtels particuliers bâtis par de jeunes architectes, la construction se dissimule derrière un crépi et parfois on serait tenté de juger leur sobriété spartiate quelque peu ostentatoire. En fait leurs maisons de briques, de moellons ou d'agglomérés imitent les formes rigides du béton armé : ces jeunes architectes savent bien que ce matériau serait trop coûteux pour de petits édifices mais ils cèdent à la mode du jour"⁸.

Les grands programmes

C'est tout naturellement dans les programmes de construction importants, souvent en marge du mouvement moderne, que l'usage du béton armé va pouvoir

⁶ *Reconstruction - Déconstruction*, Bruno Vayssière, Ed. Picard, 1988. *Architecture - Une anthologie*, sous la direction de Jean-Pierre Epron, Mardaga, 1992.

⁷ Catalogue de l'exposition du congrès international des architectes et techniciens des monuments historiques, Palais de Chaillot, mai 1957.

⁸ *Considération sur l'art d'aujourd'hui*, Louis Hauteœur, Librairie de France, 1929.

se développer avec un réel intérêt constructif ou économique. Tout d'abord dans l'entre-deux-guerres, qu'il s'agisse de programmes d'habitation comme l'immeuble de rapport "Gloria Mansions" à Nice réalisé en 1932-1934 par les frères Hovnanian dans un style emprunté aux arts décoratifs, ou de projets culturels où les possibilités du béton vont permettre tout à la fois de combiner prouesses techniques et recherches formelles. C'est le cas de l'église Sainte-Jeanne-d'Arc de Nice, construite par l'architecte Jacques Droz en 1934 sous forme d'une juxtaposition de coupes qui permettent de réduire au minimum le nombre et la dimension des points d'appui. Même principe de dégagement de l'espace à l'église Saint-Louis de Marseille réalisée en 1935 par l'architecte Jean-Louis Sourdeau où le béton sert, non seulement à la réalisation de la structure et de la coupole, mais également aux sculptures et au sertissage des vitraux en dalle de verre. Si les années trente sont celles de la diffusion générale de l'usage du béton en Europe comme dans les colonies (il est d'ailleurs amusant de noter comment les rapports d'inspection à l'occasion des dossiers de protection continuent à traiter le béton armé dans cette période comme un matériau expérimental, preuve s'il en est de son caractère d'éternelle jeunesse), les grands programmes de la reconstruction et des années soixante vont bien évidemment systématiser son usage. On notera ici les exemples protégés au titre des monuments historiques de quelques uns de ces grands équipements caractéristiques des IV^e et V^e Républiques dans la région : programme d'habitation comme l'unité d'habitation "cité radieuse" de Marseille de Le Corbusier (1952), programmes industriels : l'usine barrage André Blondel sur le Rhône à Bollène, réalisée par un élève de Perret, Théo Sardnal en 1952, l'un des plus grands chantiers de la IV^e République, ou l'usine hydroélectrique de Jouques (Bouches-du-Rhône) que réalise en 1959 l'architecte Jean Crozet sous forme d'une vigoureuse barre de béton brut incrustée dans la montagne. Programme scolaire, le lycée agricole de Cantarel à Avignon (architectes Roland Bechmann, Pierre Biscop, Charles André, François Girard) en 1966-1969 ou programme religieux comme l'église Saint-Joseph-Travailleur que construit à Avignon Guillaume Gillet en 1967-1969.

Les utilisations parallèles du matériau

À côté de la mise en œuvre traditionnelle (qu'il soit traité dans son épiderme ou laissé à l'état brut), le béton armé va également faire l'objet de recherches (à vrai dire peu nombreuses), de la part de constructeurs curieux dont Fernand Pouillon offre certainement le meilleur exemple : la mise au point dans les années cinquante de ce système constructif qu'il qualifie lui-même de "pierre banchée" et qui consiste à couler le béton dans un coffrage perdu dont la face extérieure est constituée d'un appareillage de pierre d'épaisseur moyenne ; cette technique mise au point à l'occasion des programmes de reconstruction qui lui sont confiés pour le Vieux Port de Marseille (achèvement en 1952), connaîtra un succès régional important avant de retomber presque définitivement dans l'oubli.

À ce procédé aux références puisées dans la tradition, s'oppose évidemment l'autre voie, développement géné-

ralisé des recherches de quelques esprits inventifs des années trente : la préfabrication et l'industrialisation lourde du béton armé. Omniprésente dans nos paysages de banlieues urbaines, cette technique reste probablement l'un des derniers secteurs de la construction à avoir entièrement échappé aux appétits protecteurs du service des monuments historiques ; nous n'en citerons ici qu'un exemple (bien sage) au travers de la villa Seynave que Jean Prouvé et Neil Hutchinson construisent en 1961 à Grimaud (Var), où les modules en béton, posés de champ, servent de support et de contreventement à la structure métallique qui forme l'ossature de la maison.

Restent enfin les quelques initiatives, plutôt marginales, nées des expériences menées dans les années 1960-1970 par Jacques Coïelle ou Anti Lovac autour du béton projeté et des formes organiques qu'il génère. L'initiative restera sans suite, sans mériter pour autant le mépris avec lequel profession et critique unanimes la traiteront, sans doute pour l'insouciance avec laquelle elle avait osé ne pas faire du monument moderne le référent incontournable.

Les perspectives

L'immense champ exploratoire offert depuis son origine par l'utilisation du béton dans la construction oblige évidemment à pratiquer une sélection drastique dans le choix des protections à initier. Toutefois, c'est ici l'occasion d'attirer l'attention sur les menaces quotidiennes que connaissent bon nombre d'ouvrages en béton dont la survie momentanée tient souvent uniquement aux difficultés techniques et économiques de leur destruction. C'est le cas du silo d'Arenc, figure emblématique du port de Marseille, en sursis depuis maintenant deux ans. Plus encore peut-être que dans d'autres domaines de l'architecture, la protection des ouvrages en béton nécessite une connaissance appuyée sur la recherche, aujourd'hui encore bien lacunaire, de la multitude des techniques et procédés innovants que les ingénieurs, trop souvent occultés par les architectes, ont élaborés depuis plus d'un siècle et tout particulièrement depuis la dernière guerre. Si la rotonde SNCF d'Avignon, première réalisation de ce type en 1945 due à l'ingénieur Bernard Laffaille (co-concepteur, souvent oublié, avec Guillaume Gillet de l'église Notre-Dame de Royan grâce à son procédé de poteau en V) a été inscrite à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques, ce n'est pas le cas d'un autre exemple marquant de la recherche dans le domaine des coques minces en béton armé que constituent les hangars d'aviation de Marignane (Nicolas Esquillan, ingénieur - Auguste Perret, architecte) ou dans un domaine bien différent du centre de recherche IBM de Marcel Breuer à la Gaude (Alpes Maritimes). Bien sûr, la protection au titre des monuments historiques est loin de régler toutes les questions, surtout lorsqu'il s'agit de bâtiments industriels objets d'enjeux économiques importants ; néanmoins, elle reste souvent, dans le contexte actuel de nos institutions, le seul moyen d'empêcher la disparition pure et simple de ces témoins majeurs de l'inventivité constructive de notre siècle.

François GOVEN
Conservateur régional
des monuments historiques de PACA

Techniques de fabrication, composition et pathologies

* *Mémoires d'un architecte*, Fernand Pouillon, Edit. du Seuil, 1968.

Le béton : Histoire et évolution de sa composition et de sa mise en œuvre

"Quand la chaux sera éteinte, il la faudra mesler avec le sable en telles proportions qu'il y ait trois parties de sable de cave, ou deux parties de sable de rivière ou de mer, contre une de chaux, car c'est la plus juste proportion de leur mélange, qui sera encore beaucoup meilleur si on y rajoute une troisième partie de tuileaux pilés et passés".

Vitruve, Livre II, Ch. IV (Trad. de Claude Perrault)

L'objet de ce colloque, comme le manifeste la totalité des exposés, est la contribution du béton, très généralement le béton armé, à la stabilité et à la beauté des constructions.

Le béton non armé a été utilisé avec succès en remplacement de la maçonnerie pour réaliser des ouvrages aussi imposants que les barrages-voûtes, sans poser de problème particulier de durabilité ; il s'agit du prolongement de concepts très anciens auxquels l'apparition du ciment artificiel au XIX^e siècle a donné un champ d'utilisation nouveau. Par contre, le béton armé est un matériau composite dont la durabilité a imposé de nouvelles exigences de formulation et de mise en œuvre.

Cette petite rétrospective n'a d'autre prétention que de montrer qu'à travers l'évolution des compositions et méthodes d'emploi, les mêmes principes fondamentaux de constitution se retrouvent.

QU'EST-CE-QUE LE BÉTON ?

Le béton est essentiellement un mélange de deux composants :

- des granulats, sables et graviers, naturels ou concassés
- une pâte liante, constituée de ciment (ou anciennement de chaux hydraulique + pouzzolanes) et d'eau.

Par réaction chimique du liant et de l'eau, la pâte en durcissant donne au mélange la structure et les propriétés d'une roche.

Granulométrie

De même que les roches pouvant être micro ou macro-grenues, les bétons peuvent être composés de très gros éléments, jusqu'à 400 mm pour les corps de barrages, comparables aux brèches ; ils peuvent aussi être très fins, comme les bétons de sable, comparables au grès.

Les règles de compositions qui se sont développées, ont toutes pour objectif d'obtenir une compacité maximale compatible avec les conditions de mise en œuvre ; nous y reviendrons.

Composition de la pâte liante

La pâte liante est constituée de **ciment**, d'**eau** et d'**air**. En plus de l'air occlus restant dans le mélange compacté, peut se trouver de l'air **entraîné**, volontairement obtenu par l'ajout d'un agent chimique.

La pâte occupe environ 25 à 35 % du volume total compacté pour des dosages en ciment de 250 à 450 kg/m³ de béton. Les grains de ciment, de dimension moyenne de 20 microns environ, contribuent pour 7 à 14 % du volume total, l'eau et l'air pour 15 à 20 %.

La Fig. 1 montre que pour un béton courant dosé à 300 kg/m³, les granulats occupent 69 % et la pâte 31 % du total. Le mortier de ce béton (pâte + sable), qui a une teneur en ciment voisine de celle du mortier standard d'essai des ciments (480 kg/m³) est nettement plus riche en ciment qu'un mortier courant de jointement (~ 300 kg/m³).

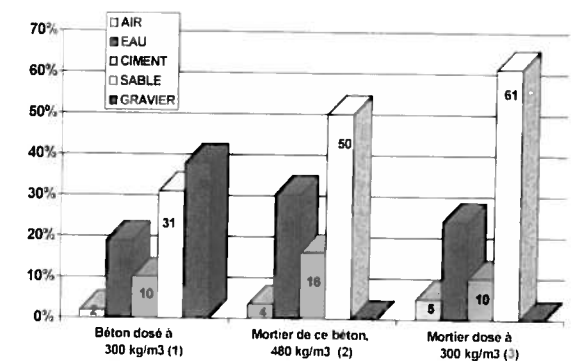


Figure 1 - Du mortier au béton courant

Spécifications relatives au béton armé

Le **béton pour béton armé** (et pour le béton précontraint qui comporte généralement des armatures ordinaires en plus des câbles) doit pouvoir :

- pénétrer facilement dans ce que l'on nomme le fer-

raillage, de 50 à 100 kg/m³ jusqu'à 400 à 500 kg/m³ dans les parties très sollicitées des grands ouvrages (soit pour 400 kg/m³, 5 % du volume du béton armé),
 – enrober parfaitement les armatures périphériques de la pièce (les recouvrir de 20 à 50 mm d'un béton de la même compacité que celle du corps)
 – et après durcissement, protéger l'acier contre la corrosion.

Ces besoins se traduisent en exigences concernant le **béton frais** : diamètre maximal D des granulats, consistance du béton en fonction des méthodes de serrage en place utilisables, et le **béton durci** : dosage minimal en ciment d'une classe de résistance suffisante et d'une nature adaptée à l'agressivité chimique de l'environnement et surtout limitation de la quantité d'eau de la pâte de ciment (donc du béton).

Prévision des résistances en compression du béton

Feret a formulé dès 1882 une loi qui relie la résistance du béton à la composition de la pâte (Réf. 1) :

$$R = K_X \left(\frac{C}{c + e + \varnothing} \right)^2$$

avec *c*, *e*, *∅*, les volumes de ciment, d'eau et d'air de la pâte
K, un coefficient fonction des granulats, du ciment et du compactage.

Par exemple, pour le béton courant de la Fig. 1, dosé à 300 kg/m³ d'un ciment de classe 32,5 MPa avec cent quatre vingt-dix litres d'eau, des granulats de Seine et un coefficient d'énergie de 240 MPa, la résistance du béton à la compression sera de 25 MPa environ, mesurée à vingt-huit jours d'âge.

Cette formule, dont la validité n'a pas été démentie depuis, démontre la **très grande sensibilité de la résistance du béton à toute variation du dosage en eau**, qui est dans la pratique des chantiers, **l'ennemi public n°1 de la qualité**.

D'autres chercheurs, dont Abrams et Balomey ont donné des expressions approchées de cette loi en introduisant le rapport massique eau/ciment dans lequel l'eau est l'eau **efficace** du béton compacté, ne prenant pas en compte l'eau absorbée par les granulats. Pratiquement, la formule s'exprime actuellement de la façon suivante :

$$R_{\text{Béton}} = R_{\text{ciment}} \times G \times (C/E - 0,5) \text{ (Dreux Réf. 2)}$$

C, *E*, masses de liant et d'eau au m³

G, coefficient lié aux granulats (environ 0,5 pour granulats de bonne qualité)

R_{ciment}, résistance normalisée du ciment par laquelle le producteur de ciment contrôle son produit.

BREF HISTORIQUE DU BÉTON

Il faut distinguer le béton non armé dont le principe de composition ne distingue pas les liants naturels et les liants artificiels, et le béton armé, composé né du gain de performances qu'apportaient les ciments artificiels.

Le béton non armé

De l'*opus caementicum* de Vitruve (Réf. 3, Fig. 2) au béton aggloméré de François Coignet dans les années

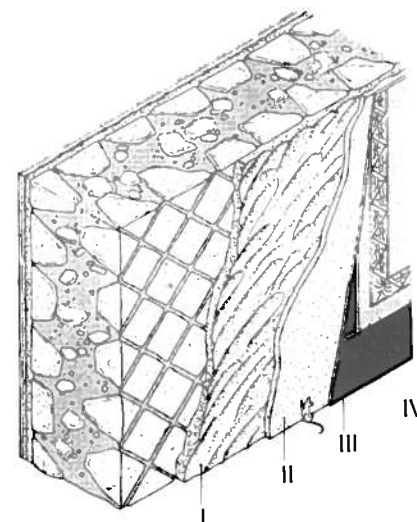


Figure 2 - Maçonnerie réticulée enduite

- I - Couche d'enduit recouvrant la maçonnerie et rendue rugueuse par des empreintes faites à la truelle
- II - Couche plus fine, talochée afin d'obtenir un support plan
- III - Couche plus subtile recevant le décor peint (JP. Adam, La construction romaine)
- IV - Opus caementicum (caementum = pierres brutes)

1840/1880, il y a continuité et les mêmes limitations : la faible énergie du liant limitant les contraintes de compression admissibles à 2,5 à 3 kg/cm – pour les appuis de la coupole du Panthéon romain, à environ 50 kg/cm – pour le béton aggloméré des grandes voûtes (trente-cinq mètres de portée et plus) de l'aqueduc de la Vanne (1868/1872) (Fig. 3). De plus, ces bétons n'auraient pu



Figure 3 - Aqueduc de la Vanne (F. Coignet, 1869)

protéger efficacement les armatures d'acier. Des romains aux prédécesseurs de Coignet (Fig. 4), il s'agissait d'un béton de blocage : un mortier de chaux additionné de pouzzolanes ou à défaut de tuileaux broyés [terre cuite à plus haute température que celles suffisantes pour produire des briques à l'activité pouzzolanique une fois broyées pratiquement nulle (Réf. 4)] ; pour Coignet, un mélange de sable tout venant et parfois de gravillons avec un liant composé de chaux, de cendres diverses,

voire de briques broyées et d'un peu de ciment considéré comme un adjuvant accélérateur de prise, le tout après mélange intime additionné de très peu d'eau et pilonné

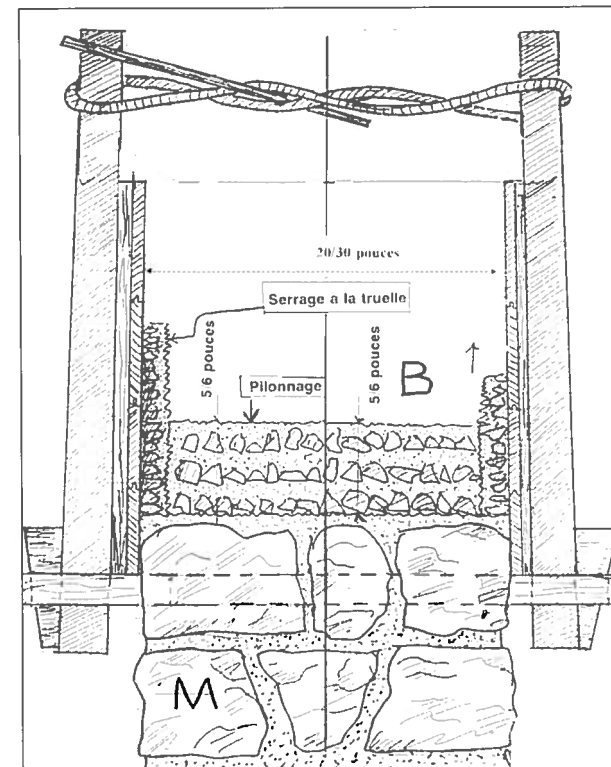


Figure 4 - Maçonnerie de cailloutage ou de blocage d'après Pelouze, 1829

énergiquement entre les mêmes bandes que le jeune lyonnais avait vu utilisées en Bresse pour édifier les murs en pisé (Réf. 5, Fig. 5).



Figure 5 - Nouveau mode de construction en béton. (L'Illustration, 1858)

Deux objectifs pour Coignet et ses émules :

– remplacer les constructions en pierre de taille très coûteuses, par des édifices de même aspect, mais en béton moulé sur place (Immeuble de la Rue de Miromesnil, Église du Vésinet, riches villas (Fig. 6),

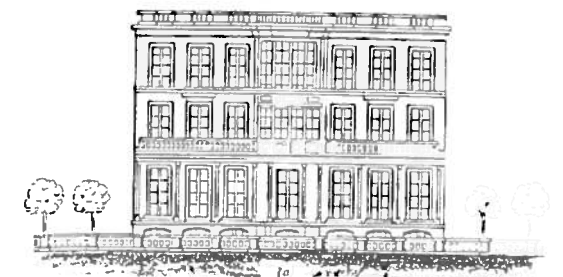


Figure 6 - Hôtels particuliers en béton (F. Coignet, Saint-Denis, 1853 - W.E. Ward, Port-Chester, 1872)

– réaliser des conduites et égouts étanches ou des voûtes comme celles supportant l'aqueduc de la Vanne à la traversée de la forêt de Fontainebleau [éviter d'avoir à charrier des moellons à travers la forêt, utiliser le sable de quartz extrait sur place, ou bien produire des pierres artificielles ou des objets moulés de même résistance, dureté et aspect que la pierre calcaire (Fig. 7)].

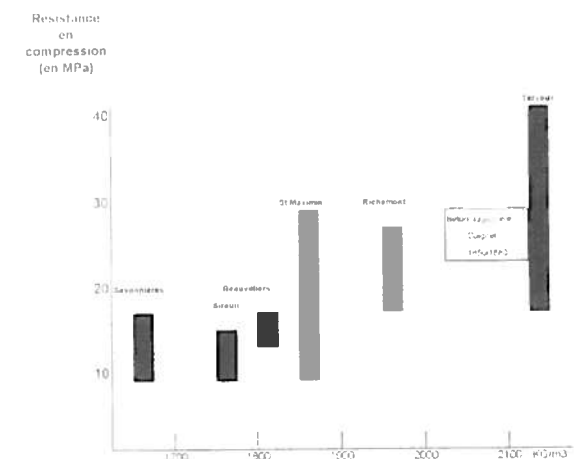


Figure 7 - Pierres calcaires tendres et demi-fortes comparées au béton Coignet. Catalogue Rocamat - 1994

François Coignet avec son béton aggloméré proposait de remplacer les pierres de taille (variante économique). Il était entrepreneur.

Les ciments modernes

Les travaux de Aspdin (Brevet d'un ciment "Portland" artificiel en 1824) introduisirent le ciment artificiel, dont le nom "Portland" provient de la ressemblance de couleur avec le calcaire de l'île voisine de Portland. Les travaux de Louis Vicat (1820-1850) précisèrent les conditions de sélection des matières premières et aboutirent au développement d'un ciment dit "naturel", chaux hydraulique spéciale, plus tard appelée "ciment prompt naturel".

Dès le milieu du XIX^e siècle, cette "véritable révolution dans l'art de construire" (Réf. 6) accompagna et accéléra de part et d'autre de l'Atlantique la mise en place d'une industrialisation des procédés de construction. Elle donna lieu par ailleurs au développement d'une nouvelle industrie : depuis le four à chaux de nos ancêtres (on en trouvait encore en pleine activité il y a vingt ans à Java) aux fours droits, puis aux fours rotatifs (Fig. 8, Réf. 6 et Fig. 9).

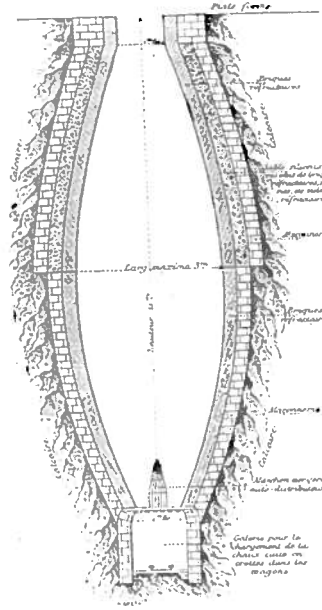


Figure 8 - Four à chaux hydraulique.
Le four de Louvières (XIX^e siècle) in E. Candlot (Réf.5)

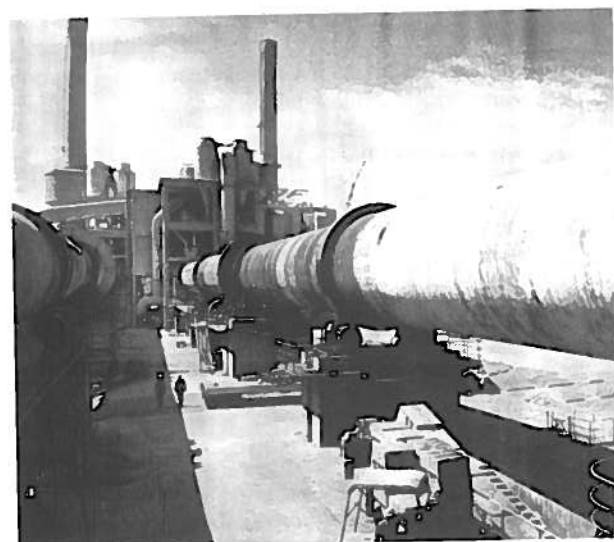


Figure 9 - Four long de cimenterie 1970

Ces usines sont implantées à proximité immédiate d'une carrière de calcaire, celui-ci entrant pour 70 % environ dans la fabrication du ciment ; de ce fait, beaucoup d'entre elles, qui représentent par ailleurs de très lourds investissements, se sont totalement transformées tout en restant sur le même emplacement.

L'évolution de la fabrication a été guidée par la puissance croissante des outils, mais surtout par l'évolution des coûts de l'énergie.

Cuisson en voie humide

Le "cru", mélange de calcaire et d'argile, était après broyage, mélangé à de l'eau ou à une pâte, pour obtenir un mélange homogène. Cette pâte crue comportait environ 30 % d'eau et était introduite dans un four de très grande longueur (plus de cent mètres) dans lequel se produisaient successivement (Fig. 9) :

- le séchage
- la décarbonatation du calcaire (600 / 900°C)
- la clinkérisation (1300 / 1450°C)

Les granules de roche artificielle obtenues, refroidies brutalement à l'air, constituent ce que l'on appelle le **clinker** (nom anglais, par analogie aux fragments de brique vitrifiés). Ce minéral est essentiellement composé de silicates de calcium et d'un peu d'aluminate de calcium.

L'énergie thermique était pour près de 40 % utilisée à éliminer l'eau introduite dans la pâte. À partir de 1960 des procédés se sont développés pour réduire, puis éliminer ce facteur de coût : voie semi-humide ou semi-sèche avec fabrication de granules de cru à 10-12 % d'eau, puis voie sèche intégrale.

Cuisson en voie sèche

Dans le procédé moderne, le mélange cru est préhomogénéisé, broyé, puis homogénéisé pour constituer la **farine**. Celle-ci est alors décarbonatée dans une unité de précalcination utilisant les gaz chauds du four, puis introduite au four pour clinkérisation. La taille de ce dernier est réduite à cinquante, soixante mètres. L'économie thermique ainsi réalisée est de l'ordre de 40 à 50 % (Fig. 10 et Fig. 11).

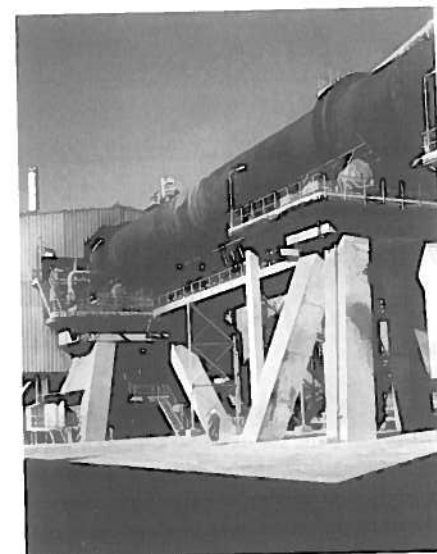


Figure 10 - Four moderne en voie sèche

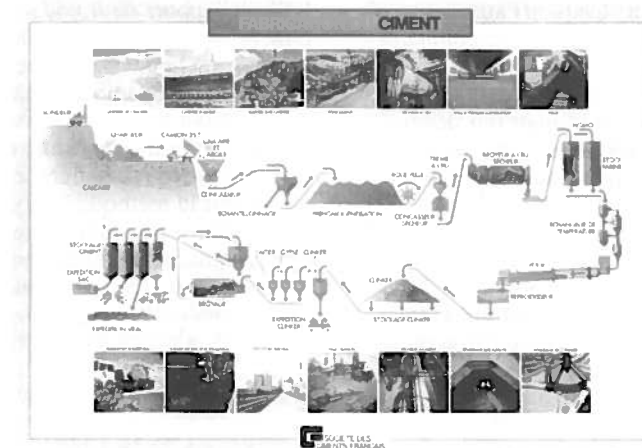


Figure 11 - Synopses de fabrication du ciment

Broyage et conditionnement

Le clinker est une roche artificielle extrêmement dure. Le broyage des granules, auxquelles on ajoute du gypse, régulateur de prise, et divers ajouts suivant le type de ciment désiré, se fait généralement dans des broyeurs horizontaux à boulets, avec une importante consommation d'énergie électrique de l'ordre de 30 à 40 kWh/t. Le produit fini est caractérisé par :

- la nature du clinker
- la nature et la proportion des ajouts (cendres volantes, laitier de hauts fourneaux, fines calcaires)
- la finesse de mouture.

Il est stocké en silos et conditionné en sacs (~ 30 %) ou livré en citernes (~ 70 %)(Fig. 11).

Contrôle qualité et normalisation des ciments

En France, où le nombre de cimenteries est passé d'environ cent cinquante au début du siècle à trente-neuf en 1996, la fabrication est rigoureusement surveillée par le producteur - contrôle interne - et par des prélèvements effectués au titre de la marque NF-Liants Hydrauliques - contrôle externe - qui vérifie la conformité à la norme de spécification. Cette norme est remise à jour dès que les progrès des fabrications ou l'apparition de nouveaux besoins des utilisateurs le nécessite. La norme NF-P 15 301 de 1981 a été ainsi révisée en 1994, notamment pour tenir compte de l'avancement d'une norme européenne des ciments en gestation. En France, l'industrie cimentière propose aux utilisateurs (et à l'exportation) une gamme de produits très diversifiés : par la composition des CPA aux CPJ (Portland composés) aux ciments de laitier et de laitier/cendres, par la classe de résistance en MPa : 32,5, 42,5 et 52,5 et la sous-classe : ordinaire et rapide, où l'utilisation spécifique : pour travaux à la mer (PM) ou pour ouvrages soumis à l'agression sulfatique (ES) comme les fondations en région parisienne, les travaux du métro.

Deux fascicules de documentation publiés par l'AFNOR permettent au constructeur de choisir le ciment le plus adapté à l'environnement et aux diverses contraintes de l'ouvrage à édifier : P 18011 - **bétons, classification des environnements agressifs**, P 15010 - **Liants hydrauliques, guide d'utilisation des ciments**. En outre, la norme P 18305 sur le béton prêt à l'emploi publiée en décembre 1994 classe tous les environnements possibles (de non agressifs à très agressifs) en se basant sur la classification européenne très diversifiée en cours de mise au point définitive (projet EN 206).

L'évolution de la composition des bétons

Comme nous venons de le voir, on est parti d'un mortier de liant à prise très lente à un durcissement aussi lent que modeste, plus ou moins chargé en pierrailles, au béton pour béton armé (on disait dans les années 1900-1930 en "ciment armé"), à un béton de ciment Portland à prise de plus en plus rapide (de quelques heures à moins d'une heure) et à durcissement presque définitif, obtenu à quatre-vingt-dix jours (Circulaire de 1904) puis à vingt-huit jours (Circulaire de 1934, Cf. Fig. 12). On est parti d'une composition en volumes apparents de matériaux : ciment / sable / graviers des 1/2/4 aux 1/1/2 des Britanniques, aux formulations françaises en poids de ciment par volume apparent de granulats : de 250 à 450 kg de ciment pour 400 l de sable et 800 l de gravillons (les bétons parisiens), aux formulations basées rationnellement sur la loi de Férét ou de Bolomey pour la pâte liante (rapport eau/ciment) et sur des considérations théoriques sur la composition optimale du mélange gra-

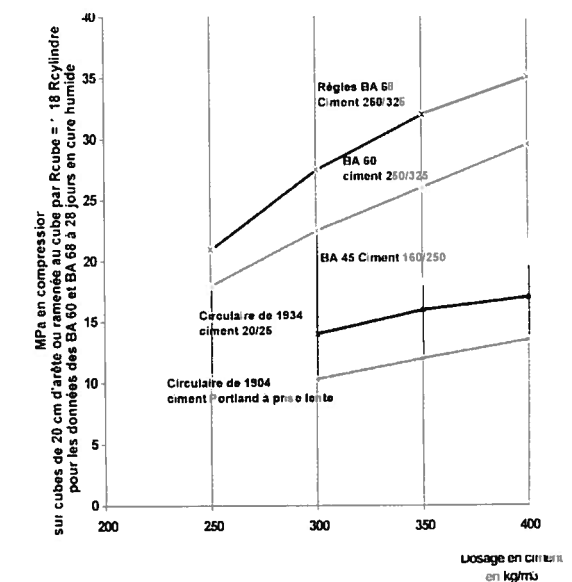


Figure 12 - Résistance administrative des bétons

Evolution de 1904 à 1968 en fonction des progrès des ciments Formulation de principe 400 l/m³ de sable pour 800 l/m³ de gravillons jusqu'aux années soixante-dix-quatre-vingt pour les ouvrages d'art pour les Q350 et Q400, dosage en eau totale de 10 à 190 l/m³, affaissement autour de 5 cm seulement (LCPC/SETRA), pas d'adjuvant.

nulaire (de Fuller/Bolomey à Caquot/Faury, voire Vallette). Ce n'est pas l'objet de cet exposé de comparer ces méthodes aux méthodes présentement appliquées, méthodes qui ont pourtant permis à nos prédécesseurs de construire des ouvrages qui, pour la plupart ont dépassé la cinquantaine sans trop de problèmes (cf. l'enquête récente du ministère de l'équipement sur la tenue des ponts en béton armé).

Paramètres de composition

• **Eau de gâchage** : 40 à 50 % en est consommé par l'hydratation du ciment. Le reste est un lubrifiant qui permet la mise en place, mais limite la compacité du béton durci et donc sa résistance et sa durabilité. Ce besoin en eau de mise en place est d'autant plus élevé que la granulométrie des bétons est fine et que les conditions de ferraillage et de coffrage exigent une plasticité élevée.

• **Rapport sable/graviers** : Tant qu'il n'existait pas de moyens chimiques (adjuvants) pour limiter l'eau, de vives controverses opposaient les ingénieurs sur le meilleur compromis entre la facilité de mise en place, la limitation du dosage en eau et la résistance. Les lois de composition granulaire continue, dérivées des lois de Fuller, étaient opposées aux lois dites discontinues de type Faury. Dans la pratique, c'est la disponibilité locale en granulats qui imposait sa loi : dans 95 % des bétons et pour tous les bétons courants, le rapport sable/gravier varie de 0,75 à 0,90 (Fig. 13).

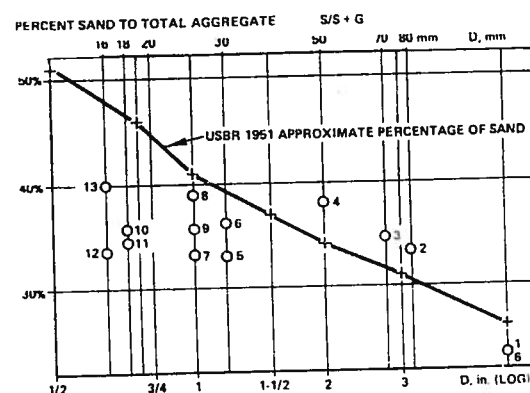


Figure 13 - Rapport sable / (sable + gravillons). Pratiques américaine et française

En fonction du diamètre maximal des gravillons, recommandations de l'ACI et du Bureau of Reclamation, dosages d'ouvrages français points encadrés numérotés de 1 à 13, in ACI Journal (August 1975)

• **Dosage en ciment** : De l'ordre de 300 kg/m³ pour le béton ordinaire au début du siècle, le dosage a baissé depuis l'introduction des adjuvants à une valeur actuelle de l'ordre de 250 kg/m³. La norme actuelle NF-18305 en fixe les minima en fonction des types d'environnement.

Quelques exemples

Pour les bétons utilisés jusqu'aux années soixante-dix, ceux des constructions de plus de vingt ans dont la durabilité nous préoccupe, il faut souligner que :

• **Pour les grands ouvrages en béton armé d'avant 1914**, les grands constructeurs adaptaient les formulations volumétriques passe-partout aux besoins de leurs ouvrages très ferraillés ; ainsi Hennebique employait la formule : ciment 300 kg, sable 0,400 m³, graviers 0,385 m³ ; ainsi au lieu d'un rapport sable / graviers de

0,5, un rapport de 1,04, pour Boussiron, toujours pour ciment 300 kg, Sable 0,350 m³ et graviers 0,370 m³, d'où sable / graviers = 0,94 proche de la pratique actuelle en région parisienne pour le bâtiment (Réf. 8).

• **Pour les ponts courants**, dans les années soixante-dix, le ministère de l'équipement agréait des compositions basées sur la méthode Faury et conçues pour une consistance (affaissement au cône d'Abrams) de 3/5 cm, avec une granularité de 20 mm.

Ouvrages	Ciment C	Eau totale Et	Et / C	Sable (sable+gravillons)
Piles/culées	350 kg	180/190 l/m ³	0,53	0,35 / 0,40
Tabliers	400 kg	185/195 l/m ³	0,475	0,35/0,40

Ceci pour les granulats d'origine alluvionnaires dits "roulés" (sable sans fines).

• **Dans le bâtiment** et les constructions civiles, le dosage en ciment variait de 300 à 350 kg/m³, mais, en vue d'obtenir une consistance moins ferme et ceci malgré l'utilisation générale de la vibration interne (par aiguilles vibrantes de diamètre 30 à 50 mm), on pratiquait des affaissements de 12 à 15 cm et donc des rapports eau totale / ciment de l'ordre de 0,65 et avec des granulats alluvionnaires silico-calcaires de la région parisienne de faible absorption des rapports eau efficace / ciment autour de 0,60.

Pour des enrobages d'armature de 20 mm, cet excès d'eau concentrée après vibration interne dans la peau du béton, conduit à une très forte porosité ouverte de surface (> 20 %) et à une carbonatation rapide de l'épaisseur d'enrobage. La corrosion peut alors se manifester en moins de dix ans.

Remarque : Les adjuvants réducteurs d'eau, apparus dans les années soixante-dix, ont permis de réduire de 10 à 15 % le besoin en eau des bétons et donc d'augmenter, à plasticité constante, les résistances. Le corollaire en a été pour les bétons courants une diminution des dosages en ciment, sans résoudre pour autant le problème des rajouts d'eau.

LA FABRICATION DU BÉTON ET SON ÉVOLUTION

De la bétonnière de Coignet vers les années mille huit cent soixante (Fig. 14), des bétonnières de Ransome avec leur cuve à axe oblique, aux malaxeurs modernes à axe vertical, on est passé de cinq à dix minutes pour obtenir un mélange homogène, à moins de quarante secondes par gâchée de 1 à 2 m³.

Du dosage amont des constituants en volumétrie au dosage pondéral avec commande et enregistrement automatique, on réussit à obtenir une précision des proportions qui, cependant, ne peut atteindre la précision des dosages effectués lors de l'étude en laboratoire, qui fixe la formulation. Il subsiste une marge d'erreur encore significative qui conduit à viser par sécurité des résistances majorées de 10 à 15 % par rapport aux résistances spécifiées.

En effet, la norme européenne ENV 206 admet encore que les quantités de ciment, d'eau et de granulats soient obtenues à plus ou moins 3 % près, ce qui signifie pour le ciment à plus ou moins 10 kg/m³ près, et pour l'eau à plus

ou moins 5 l/m³ près. Précision très difficile à atteindre puisque l'eau apportée par les granulats varie avec les livraisons quotidiennes et que le conditionnement intégral des stocks, techniquement possible, majorerait par trop le coût du béton, d'où une tolérance de plus ou moins 0,03 à 0,05 sur le E/C, suivant les spécifications. Ainsi, pour garantir un rapport E/C de 0,55, il faudrait obtenir 0,50 avec la formulation nominale. Du temps des bétonnières alimentées en volumétrie, la variation devait atteindre plus ou moins 10 % et c'est pourquoi, faute de pouvoir contrôler ce paramètre essentiel, on s'en tenait à surveiller la consistance du béton (obtenir celle déterminée par l'étude préalable basée sur la configuration de l'ouvrage), d'abord visuellement et à partir des années vingt-cinq, sur cet instrument d'une simplicité et d'une efficacité incomparable : le cône d'Abrams (Réf. 9). À partir des années quatre-vingt, le Laboratoire central des ponts et chaussées a imposé pour les chantiers de l'administration, le wattmètre différentiel, branché sur le malaxeur dont il suit la consommation d'énergie, méthode souple et efficace pour les mélanges peu fermes et plastiques, utilisés pour les ouvrages d'art de l'époque.

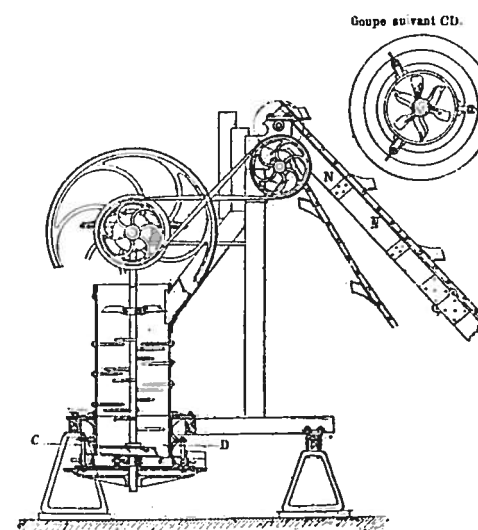


Figure 14 - Le malaxeur Coignet employé pour la fabrication du béton aggloméré

Pour les bétons destinés à la fabrication en usine, de pièces armées ou non, l'approche a été de tous temps très différente : au pilonnage manuel intense, on a substitué un pilonnage mécanique puis une vibration des moules très puissante : on peut ainsi remplir parfaitement les moules avec un béton de consistance "terre humide" (no-slump concrete) comme ce fut le cas pour les voussoirs du tunnel sous la Manche dans l'usine de Sangatte.

MISE EN ŒUVRE ET ÉVOLUTION DU BÉTON

La construction en béton et surtout en béton armé est comme la guerre, un art "tout d'exécution". Si les progrès de la fabrication des liants hydrauliques ont permis de construire des ouvrages de plus en plus hardis : des voûtes de François Coignet aux arcs du pont de Plougastel d'Eugène Freyssinet, les méthodes d'exécution ont accompagné et quelquefois précédé. L'eau nécessaire à l'hydratation du ciment (près de 25 % de sa masse) et à l'obtention d'un mélange "ouvrable" après malaxage peut lorsqu'elle est en excès être consi-

dérée comme l'ennemi n° 1 de la résistance mécanique et de la durabilité, surtout s'il s'agit de protéger les aciers de la corrosion. D'où deux voies pour le constructeur, avant l'apparition des adjuvants et leur utilisation généralisée :

• **Première voie : Béton très ferme à minimum d'eau.**

Mise en œuvre par pilonnage énergique de faibles couches, on est parti de la technique du pisé avec Coignet (Fig. 5) et on aboutit à la circulaire ministérielle de 1906 : le béton, à prise lente "sera damé avec le plus grand soin par couches dont l'épaisseur sera en rapport avec les dimensions des matériaux employés et des intervalles des armatures et ne dépassera pas 0,05 m après damage...". Valable, mais pénible avec des bétons comportant 50 kg d'acier au m³, inapplicable aux parties d'ouvrages comportant de 100 à 150 kg d'armatures au m³ ; que l'on pense aux ponts en bow-string !

Les bétons ainsi pilonnés, malgré des dosages faibles en liants faibles, ont pu atteindre une résistance de 20 MPa, résistance des carottes extraites récemment d'une des arches Coignet de l'aqueduc de la Vanne (Fig. 3).

• **Deuxième voie : Béton très plastique, voire mou** (affaissement de 12 à 20 cm)

C'est le "wet concrete" préconisé par Ransome aux États-Unis dans les années mille neuf cent (Réf. 10) et largement pratiqué en France. Le béton était amené en place par de longues goulottes, il était "coulé" en place et non déposé avec une benne d'où de nombreux déboires (fissuration de retrait, corrosion des armatures).

Avec l'apparition de la vibration interne avec des aiguilles pneumatiques, vers 1920, retour à des bétons moins mous, voire fermes : pour les travaux dépendant des Ponts et chaussées, les dosages en eau totale variaient de 185 à 195 l/m³ ce qui permettait d'obtenir des consistances dépassant rarement cinq centimètres.

Le transport du béton de pompage qui s'est généralisé en France à partir de 1970 a conduit à s'écarter des compositions du type Faury et Dreux et à privilégier les formulations continues, plus riches en mortier donc en sable : "d'enlever à une formule traditionnelle de béton armé ou précontraint une certaine quantité de gros gravillons et de la remplacer par le même poids de sable" (Réf. 11) ["dégradation du béton" déclaraient les puristes], mais amélioration car pour éviter toute ségrégation lors du pompage, la teneur en eau devait être limitée plus rigoureusement.

MISE EN ŒUVRE DU BÉTON ET DURABILITÉ DES OUVRAGES

Il ne suffit pas d'étudier et de spécifier une formulation tenant compte de la configuration de l'ouvrage (difficulté de remplissage correct de certaines parties, comme des talons des poutres précontraintes classiques) et des agressions climatiques ou autres, à envisager vu l'environnement de l'ouvrage et ses contraintes de service ; il faut que le béton produit et conduit à pied d'œuvre soit mis en place, compacté et protégé ensuite contre les chocs, les surcharges de chantier et la dessiccation pour lui permettre d'atteindre un durcissement suffisant (5 MPa pour un décoffrage précautionneux, 40 % au moins de sa résistance de contrôle à vingt-huit jours pour la cure humide). La figure suivante (Fig. 15) extraite du guide du Comité européen du béton, pour obtenir des ouvrages

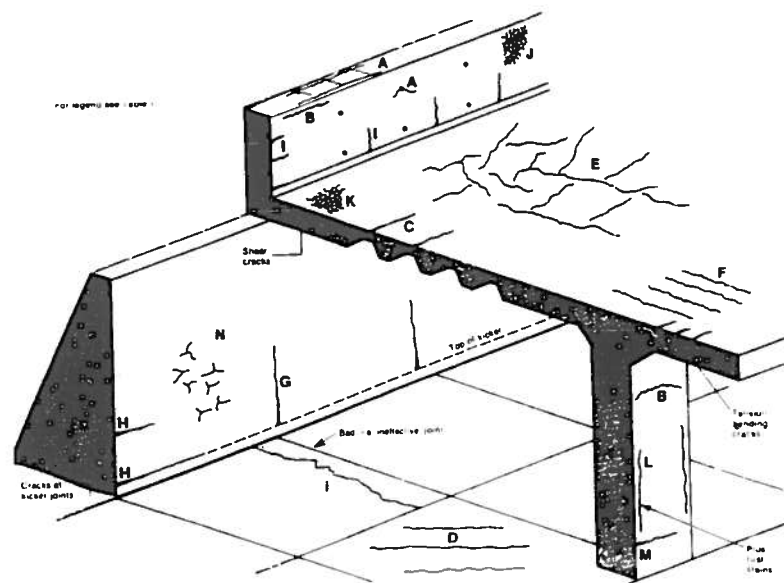


Figure 15 - Les fissurations intrinsèques du béton

Exemples :

- A - Retrait de tassement immédiat au droit d'armatures
- B - Retrait de tassement immédiat en haut d'un poteau
- C - Retrait de tassement immédiat d'un changement de section (planchers)
- D - Retrait immédiat, diagonale aux angles d'une dalle
- E - Retrait immédiat, en faïençage (dalle armée)
- F - Retrait immédiat, au droit des armatures
- G - Contraction thermique empêchée (ouvrages hyperstatiques)

- H - Contraction thermique gradient de température dans l'épaisseur
- I - Retrait hydraulique (long terme, dalles minces, pas de joints)
- J - Faïençage (effet du coffrage, parements "fins")
- K - Faïençage (effet du lissage excessif des dalles)
- L - Corrosion des armatures (béton sain mais assez poreux)
- M - Corrosion des armatures par des chlorures (internes ou externes)
- N - Réactions alcalis-granulats (gonflement interne)

durables (1985) relève les fissurations d'origines diverses qui peuvent se manifester à plus ou moins long terme et qui ouvrent la porte aux agents corrosifs véhiculés par l'air ou par l'eau. Sur 14 causes de ces fissurations qualifiées d'intrinsèques ou aussi de spontanées, car non imputables aux contraintes de traction résultant des charges de service :

- trois, ont pour cause la conception de l'ouvrage (enrobage des armatures spécifié insuffisant (F, I, L))
- six, l'utilisation de composants inadaptés (G, H, M, N)
- une, le coffrage (J)
- quatre, un surfaçage excessif (K) ou un accident climatique (A, B, C)

Le guide n'envisage, dans cette figure, que la fissuration, mais les nids de cailloux et les manques de remplissage interne résultant d'une formulation mal adaptée et d'une déficience du compactage, sont aussi à imputer à la mise en œuvre.

CONCLUSION

Le potentiel de résistance et de durabilité de ce matériau n'a cessé d'augmenter. En 1941, Eugène Freyssinet écrivait "si, avec un granulats très résistant on fabrique un béton avec les moyens de chantier normaux, on obtient une résistance beaucoup plus faible que celle de l'agrégat et sans rapport simple avec celle-ci. Il y a trente ans, on aurait tenu pour bon un chiffre de 200 kg/cm². Actuellement on atteint aisément le double. Mais

l'écart subsistant par rapport à l'agrégat demeure considérable.

À l'heure actuelle, avec des ciments plus puissants, l'utilisation en dose massive d'adjuvant et des ajouts de pouzzolanes ultra réactives, on réalise des bétons à plus de 100 MPa de résistance sur certains chantiers. En corollaire, les bétons de bâtiment, qui représentent la grande majorité des bétons utilisés se sont banalisés et appauvris à l'extrême et ont vu leur résistance limitée aux strictes exigences des calculs de bureau d'étude, avec une baisse moyenne de plus de 15 % des dosages en ciment. Le transfert de charge dans la structure est assuré, mais la protection des armatures contre la corrosion l'est-elle encore ?

Parallèlement au développement de nouvelles structures rendues possible par l'utilisation des potentiels de résistance et de durabilité des bétons modernes, il serait bon d'exploiter mieux ce béton pour les ouvrages courants en prenant en compte non seulement les exigences de la résistance des matériaux, mais également celle de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures. Déjà prise en compte dans la norme béton, cette exigence devra être prise en compte dans les codes de calcul pour avoir son plein effet.

Pierre JAUGEY
CALCIÀ - Directeur Recherche et Développement
Paul POITEVIN
Ingénieur Conseil

Bibliographie

1. R. FERET, "Sur la compacité des mortiers hydrauliques", *Annales des Ponts et Chaussées*, 1892, II, p. 1-164 et 4 pl. (juillet).
2. G. DREUX, *Nouveau guide du béton*, Eyrolles, 1985.
3. J.-P. ADAM, *La construction romaine, matériaux et techniques*, Picard, 1984.
4. L. BINDA and G. BARONIO, "Byzantine concretes : the role of thick masonry joints containing crushed bricks", in *Béton, du matériau à la structure*, Séminaire ENS/RILEM, Arles, septembre 1996.
5. F. COIGNET, "Bétons agglomérés appliqués à l'art de construire notamment à l'état monolithe... et à l'état de pierre artificielle...", Paris, E. Lacroix, 1861.
6. L. VICAT en 1853, avertissement de son traité, cité par E. CANDLOT in *Ciments et chaux hydrauliques, fabrication, propriétés, emploi*, Ch. Béranger, 1906.
7. M. VENUAT et M. PAPADAKIS, *Contrôle et essais des ciments, mortiers, bétons*, Eyrolles, 1961.
8. Agenda DUNOD, *Bâtiment*, 42^e édition, 1923.
9. C. DULIEU, "Rhéologie des bétons frais et sa variation dans le temps, méthodes d'essai", in *Colloque International sur les laitiers et ciments à ajout*, Mons, septembre 1981.
10. E.L. RANSOME and A. SAURBREY, "Reinforced concrete buildings", Mc Graw Hill, 1912, in *American Concrete Institute SP-42*, 1976.
11. LCPC / SETRA, Guide de chantier, niveau 3, "Utilisation des pompes pour le transport du béton", avril 1973.
12. E. FREYSSINET, *Une révolution dans les techniques du béton*, Eyrolles, 1939.

Pathologies du matériau béton

RÉSUMÉ

Le béton est un matériau durable si sa composition et sa formulation sont adaptées à son usage et si sa mise en œuvre est conforme aux règles de l'art.

Sa durabilité dépend de trois facteurs principaux interdépendants qui sont : la composition chimique et minéralogique du liant qui détermine la "basicité" du système et par conséquent sa plus ou moins grande sensibilité à l'environnement ; la microstructure dont dépendent les propriétés de transfert (diffusivité, perméabilité) ; l'environnement et particulièrement l'humidité relative du milieu, l'eau étant le vecteur des agents agressifs.

Les mécanismes d'agression se divisent en deux grands groupes : mécanismes de dissolution (éventuellement avec hydrolyse ou échanges ioniques) qui conduisent à l'érosion progressive du matériau par lixiviation de la chaux des hydrates calciques $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et C-S-H ; mécanismes d'expansion par cristallisation de sels gonflants (eaux chargées en sulfates), formation de gels expansifs (alcali-réaction), production d'oxydes de fer (corrosion des armatures), pression hydraulique ou osmotique (gel-dégel).

Les principaux agents agressifs suivants sont passés en revue : eaux douces et eaux de pluies acides, eaux chargées en sulfates, eau de mer ainsi que les mécanismes liés à la réaction alcalis-granulats, à la corrosion des armatures et au gel-dégel.

INTRODUCTION

Bien que les règles qui conditionnent leur longévité soient maintenant assez bien maîtrisées, tout au moins dans les conditions habituelles d'emploi, les bétons sont susceptibles de se dégrader plus ou moins : soit parce que les règles n'ont pas été appliquées ou qu'elles n'étaient pas bien connues au moment de la construction, soit en raison de défauts de mise en œuvre, ou de modification de l'environnement ou encore en raison du vieillissement normal de la structure.

Les mécanismes et les causes de dégradation du béton sont multiples et pour bien les comprendre il sera fait un bref rappel de la composition et de la structure interne du matériau qui déterminent son aptitude à résister aux différentes agressions.

STRUCTURE DU BÉTON

Le béton est une roche artificielle formée :

– d'un squelette granulaire (gravillons + sable + fines) de nature pétrographique variable (calcaire, siliceuse, silico-calcaire...) plus ou moins stable chimiquement suivant sa composition minéralogique : les granulats calcaires peuvent être attaqués par les solutions acides ; certaines roches siliceuses sont sensibles, dans certaines conditions, aux solutions alcalines (réactions alcalis-granulats) ;

– d'un liant plus ou moins poreux et perméable qui remplit les espaces inter-granulaires et assure la cohésion du squelette. Ce liant résulte de l'hydratation progressive des constituants anhydres du ciment qui sont principalement : le silicate tricalcique ($\text{C}_3\text{S} = 50$ à 60 %), le silicate bicalcique ($\text{C}_2\text{S} = 15$ à 20 %), l'aluminate tricalcique ($\text{C}_3\text{A} = 1$ à 12 %), l'alumino-ferrite tétracalcique ($\text{C}_4\text{AF} = 8$ à 20).

À ces quatre constituants principaux est ajouté un régulateur de prise qui est un sulfate de calcium (gypse ou hémi-hydrate ou anhydrite).

L'hydratation des silicates conduit à la formation d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de silicates de calcium hydratés C-S-H.

L'hydratation de l'aluminate tricalcique, en présence du gypse régulateur de prise, donne naissance, suivant les teneurs respectives des deux composés, trisulfo-aluminate (ettringite) ou au monosulfo-aluminate et éventuellement à un aluminate de calcium.

La phase C_4AF dont l'hydratation est très lente donne naissance à des hydro-grenats et peut subsister très longtemps après la mise en œuvre du béton. De même, l'hydratation des silicates est rarement totale et il reste fréquemment de nombreux résidus anhydres dans les bétons anciens.

Le réseau de pores et de capillaires du liant est plus ou moins saturé par une phase liquide interstitielle très fortement basique (pH 12,5 à 13,5) riche en oxydes alcalins (Na_2O et K_2O), siège d'échanges permanents avec les phases solides du liant et véhicule privilégié des agents agressifs par diffusion.

Il y a lieu de signaler également l'importance des interfaces : liant / granulats peuvent former des zones de faiblesses en raison de la microstructure souvent plus poreuse observée à ce niveau. Ces interfaces poreuses ou "auréoles de transition" peuvent constituer des amorces de fissuration ou des points de passage privilégiés des fluides agressifs. Elles sont très réduites dans les nouveaux bétons hautes performances.

LES CRITÈRES DE DURABILITÉ

La résistance du béton aux agents agressifs dépend de trois paramètres principaux interdépendants :

- **Composition chimique et minéralogique du liant** qui détermine la basicité du système elle-même fonction de la teneur globale en CaO.

Les liants riches en C₃S tels que les CPA dont l'hydratation génère une forte quantité d'hydroxyde de calcium (15 à 20 % du liant) sont moins résistants chimiquement que les ciments avec ajouts pouzzolaniques (cendres volantes silico-alumineuses, laitiers vitreux de haut fourneau, fumées de silice). Ces ajouts réduisent la teneur globale en chaux du système et consomment l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation des silicates de calcium. L'hydroxyde de calcium constitue en effet le composé le plus sensible du liant hydraté. Sa disparition par dissolution progressive provoque un affaiblissement du liant où les C-S-H peuvent à leur tour libérer tout ou partie de leur calcium. Dans les ciments avec ajouts pouzzolaniques ces C-S-H sont plus résistants.

De même les liants riches en aluminat tricalcique sont sensibles aux attaques sulfatiques par formation de sulfo-aluminates expansifs. Ici encore l'addition des constituants secondaires laitiers, cendres volantes, fumées de silice, permettent de réduire voire d'annihiler cette sensibilité. C'est ainsi par exemple que les CLK, ciments de laitier au clinker qui renferment 80 % de laitier, peuvent être recommandés dans le cas des bétons exposés aux milieux riches en sulfates.

- **Microstructure du liant** qui dépend du mode d'assemblage et du faciès des différents composés hydratés qui peuvent varier en fonction de la nature du ciment, de son dosage, de la teneur en eau de gâchage, de la cure et des conditions climatiques environnantes (température, humidité relative).

De la microstructure (distribution et faciès des hydrates, porosité) vont dépendre les propriétés de transfert du béton : diffusion sous gradient de concentrations des espèces ioniques agressives (Cl⁻, K⁺, SO₄²⁻...) et perméation sous gradient de pression hydraulique. De ce point de vue les ciments avec ajouts ont encore, toutes choses égales par ailleurs, des performances supérieures à celles des CPA.

- **Nature des environnements agressifs** qui sont très variés et dont une classification en fonction du degré d'agressivité est donnée dans le fascicule de documentation P18-011 "Classification des environnements agressifs" qui contient également les principales mesures pré-

ventives à prendre dans les cas les plus courants (choix du ciment, dosage, rapport eau / ciment, protection supplémentaire éventuelle).

La norme NF P18-305 "Béton prêt à l'emploi" [2] ainsi que la pré-norme européenne ENV 206 (NF P18-325) "Béton : performances, production, mise en œuvre et critères de performance" [3] définissent également les milieux agressifs et les précautions d'emploi des bétons.

MÉCANISMES D'AGRESSION

Schématiquement les mécanismes d'agression se divisent en deux grands groupes plus ou moins conjugués : mécanismes de **dissolution** d'une part et mécanismes d'**expansion** d'autre part.

Mécanismes de dissolution :

- Dissolution simple telle que celle de Ca(OH)₂ ;
- dissolution avec hydrolyse lorsque les ions résultant de la dissociation d'un sel d'acide faible ou de base faible réagissent avec l'eau qui se dissocie avec production de protons H⁺ et d'hydroxydes OH⁻. C'est le cas des C-S-H par exemple qui peuvent être considérés comme des sels d'un acide faible (acide silicique) et d'une base forte (hydroxyde de calcium) ;
- dissolution avec échange d'ion et formation de sels plus ou moins solubles ; par exemple la transformation des C-S-H au contact des sels de magnésium de l'eau de mer où se produit une substitution plus ou moins complète du calcium par le magnésium et formation de (C,M)-S-H ou M-S-H.

Les conséquences des mécanismes de dissolution peuvent être une érosion du béton, un accroissement de la porosité, une perte de masse et une diminution de la résistance.

Mécanismes d'expansion

Les mécanismes d'expansion peuvent être liés à différents types de phénomènes :

- **Pression de cristallisation** d'un sel qui précipite à partir de la solution. La pression de cristallisation est fonction du taux de sursaturation de la solution. Par exemple, la pression théorique engendrée par la cristallisation du gypse peut varier théoriquement de quelques dizaines de MPa à plus de 100 MPa suivant le taux de sursaturation. Ces pressions sont très supérieures à la résistance en traction des bétons et peuvent être à l'origine de dégradation (desquamation et fissuration des parements soumis aux pluies acides par exemple). Un autre exemple très important d'expansion due à la pression de cristallisation d'un sel expansif est celui de l'ettringite, trisulfo-aluminate de calcium 3CaO.A₁₂O₃.3CaSO₄.32H₂O dont les effets néfastes dans les bétons soumis aux solutions riches en sulfates sont redoutés. Ce type d'ettringite dite "secondaire", qui se forme dans des conditions particulières, ne doit pas être confondue avec l'ettringite dite "primaire", non expansive, formée lors de la prise du ciment au contact du régulateur de prise.

- **Pression d'hydratation** d'un sel qui fixe de l'eau avec augmentation du volume molaire. La pression, qui s'exerce sur les parois des pores, peut atteindre des valeurs supérieures à 10 MPa. Un exemple de ce type d'expansion est donné par l'hydratation de sels par remontées d'eau capillaire dans certaines maçonneries (par exemple transformation de thénardite Na₂SO₄ en mirabilite Na₂SO₄.10H₂O).

- **Pression d'imbibition ou pression osmotique** telle que celle qui se développe au sein des gels issus des réactions alcalis-granulats.

REVUE DES PRINCIPAUX AGENTS AGRESSIFS

Les principaux agents agressifs sont classés dans le fascicule de documentation P18-011 "Bétons. Classification des environnements agressifs" qui donne, en fonction de quatre degrés d'agressivité (faiblement, moyennement, fortement et très fortement agressif), les trois niveaux de protection à adopter : pas de protection particulière, adaptation de la composition et de la mise en œuvre, protection supplémentaire.

La norme NF P18-305 et la pré-norme européenne ENV 206 (J P18-325) précisent également les conditions d'obtention de bétons durables en fonction de l'agressivité du milieu.

Eaux douces

Les eaux douces naturelles sont généralement classées dans la catégorie des environnements non agressifs ou faiblement agressifs vis-à-vis du béton. Elles agissent essentiellement suivant un processus de **dissolution** des composés calciques Ca(OH)₂ et C-S-H du ciment avec érosion superficielle ou percolation dans le matériau et accroissement de porosité. Leur degré d'agressivité dépend de leur pH, de leur dureté (caractérisée par le titre alcalimétrique) et de leur teneur en CO₂ agressif. Les eaux incrustantes où la teneur en dioxyde de carbone libre est inférieure au CO₂ équilibrant ne sont pas agressives.

L'intensité de l'attaque dépend également des possibilités de renouvellement de l'eau (eau circulante ou non), de la température et de la nature du ciment. La résistance à la dissolution est d'autant plus grande que la teneur globale en chaux du liant est faible. C'est pourquoi les ciments avec ajouts (laitier, cendres volantes...) ont un meilleur comportement.

Pluies acides

La pollution de l'atmosphère par les oxydes d'azote et de soufre de types NO_x et SO_x d'origine industrielle ou domestique peut entraîner la formation d'acide nitrique HNO₃ et surtout d'acide sulfurique H₂SO₄ très hygroscopique. Le pH des pluies acides peut ainsi atteindre des valeurs pouvant aller jusqu'à quatre correspondant à des milieux fortement agressifs.

Les mécanismes de dégradation induits sont souvent doubles : mécanisme de dissolution dû à la fonction

acide de la solution d'une part, et mécanisme d'expansion dû aux ions SO₄ associés à l'acide d'autre part. Ces derniers conduisent, par réaction avec l'hydroxyde de calcium du béton, à la cristallisation expansive d'ettringite ou de gypse. C'est souvent ce dernier qui dans les villes est à l'origine de la dégradation des pierres calcaires et des parements en béton.

Solutions chargées en sulfates

Les sulfates contenus dans les eaux ou les sols au contact du béton agissent essentiellement suivant des mécanismes d'expansion qui entraînent la fissuration du béton.

Le composé responsable de l'expansion est l'ettringite déjà citée, à laquelle peut être associé du gypse de formation secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise.

L'ettringite se forme par réaction entre l'aluminat tricalcique C₃A du ciment ou les aluminates hydratés du liant durci et les ions sulfates généralement d'origine externe. Le produit formé se présente sous forme d'amas massifs de cristaux en aiguilles. Sa formation entraîne un accroissement de volume de plus du double de celui des produits de départ.

Il est très important d'insister sur le fait que seule l'ettringite dite "secondaire" possède des propriétés expansives. L'ettringite dite "primaire" formée aux premiers stades de l'hydratation du ciment par réaction avec le régulateur de prise et précipitation dans les interstices du matériau n'a aucun caractère expansif.

Le caractère gonflant de l'ettringite secondaire est en relation avec les conditions de sa formation dans un matériau durci structuré à partir d'une solution en quantité réduite (solution interstitielle) très fortement sursaturée et donc engendrant localement des pressions de cristallisation très élevées (effet de coin). Eu égard à ces conditions particulières de cristallisation, la formation de l'ettringite secondaire peut être considérée quasiment comme une formation "à l'état solide" sans passage réel en solution, alors que l'ettringite primaire non expansive précipite à partir d'une solution plus abondante peu sursaturée dans un matériau encore très poreux et faiblement structuré.

Dans certaines conditions d'environnement et de composition (présence de CO₂ et de silice plus ou moins colloïdale provenant d'argiles ou des C-S-H), l'ettringite peut se transformer ou être accompagnée du minéral thaumasite de formule CaSO₄.CaSiO₃.CaCO₃.15H₂O. Ce minéral est expansif et peut se rencontrer dans des sols stabilisés au ciment ou se former à long terme dans des bétons soumis aux agressions marines.

La meilleure prévention contre les effets des solutions sulfatiques réside dans l'utilisation de ciments à teneur limitée en aluminat tricalcique C₃A et/ou contenant les ajouts déjà cités (laitier, cendres volantes...) qui limitent la production d'hydroxyde de calcium. La norme NF P15-319 [4] définit les caractéristiques requises pour les ciments destinés aux travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

Eau de mer

L'eau de mer est principalement une solution de chlorure de sodium (et à un degré moindre de magnésium) et de sulfate de magnésium auxquels sont associés en quantités très inférieures des carbonates.

Les mécanismes d'agression qu'elle met en œuvre sont complexes et multiples :

- Mécanismes d'expansion avec formation d'ettringite secondaire par réaction des aluminates du ciment avec les ions sulfates de l'eau de mer. Le mécanisme de formation de l'ettringite est tempéré par l'action des chlorures qui se combine partiellement aux aluminates avec formation de chloro-aluminates moins expansifs : La partie des aluminates combinée aux chlorures peut à terme se transformer en ettringite par apport nouveau de sulfates.
- Mécanismes de dissolution avec échange d'ions de l'hydroxyde de calcium et des C-S-H sous l'action des chlorures de sodium et de magnésium.
- Carbonatation par action du CO_2 sur l'hydroxyde de calcium et les C-S-H.

La carbonatation du béton peut avoir un effet protecteur en raison de la couche de calcite plus ou moins imperméable qui se forme à la surface du matériau. De même la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ qui précipite en surface du béton peut aussi ralentir la pénétration des ions agressifs. Mais sauf dans le cas d'un traitement spécifique préalable de carbonatation, ces effets demeurent très insuffisants pour protéger définitivement le matériau.

Bien entendu l'attaque par l'eau de mer varie en fonction de son mode d'action : elle est maximale dans les zones de marnage et d'aspersion où les cycles d'humidification-dessiccation aggravent les phénomènes de dégradation. Elle dépend de l'éloignement des côtes dans les zones soumises aux embruns. Elle est relativement faible dans les zones toujours immergées pour lesquelles on peut considérer l'eau de mer comme un milieu moyennement agressif. En tout état de cause en raison de la présence des chlorures ce milieu est moins agressif qu'une solution purement sulfatique de même concentration. Aux effets chimiques de l'eau de mer peuvent se combiner des effets mécaniques (chocs des vagues, érosion par les sables) et des effets biologiques.

La norme NF P15-317 [5] donne les prescriptions concernant les ciments destinés aux travaux à la mer. Ces ciments doivent avoir une teneur limitée en C_3A ($< 10\%$) et peuvent être des ciments avec ajouts de laitier ou cendres volantes.

Réactions alcalis-granulats

Il existe trois types de réactions alcalis-granulats [6] : les réactions alcalis-silice qui sont de loin les plus fréquentes, les réactions alcalis-silicates et les réactions alcalis-carbonates.

Dans le cas des réactions alcalis-silices, les granulats contenant des variétés de silice mal cristallisée (opale, calcédoine, micro-quartz de recristallisation...) peuvent au contact de la solution interstitielle alcaline du béton donner naissance à des gels silico-alcalins ou silico-calco-alcalins expansifs.

La formation de ces gels dépend de trois paramètres essentiels :

- La teneur en oxydes alcalins du béton. Dans le cas de granulats potentiellement réactifs cette teneur est limitée suivant les cas à une valeur comprise entre 2,5 et 3,5 % en masse par rapport au béton ;
- l'humidité relative du milieu environnant. Les réactions ne se manifestent que dans des milieux où l'humidité relative est supérieure à 75-80 % ;
- la teneur en silice réactive des granulats pour laquelle il existe une teneur pessimale pour laquelle la réaction est maximale. Cette teneur se situe aux environs de 3 à 5 %. En deçà les réactions sont très faibles ou nulles. Au-delà, elles décroissent en intensité jusqu'à une teneur en silice réactive de l'ordre de 60 %.

Les réactions alcalis-silicates, plus rares, se produisent avec certains silicates de métamorphisme tels que par exemple la wollastonite $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, la préhnite $\text{Ca}_2\text{Al}_2[\text{SiO}_{10}](\text{OH})_2$ ou la stévensite $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ qui peuvent donner lieu également à la formation de gels ou à des produits de transformation proches de certaines argiles. Dans certains cas les réactions se manifestent en surface et conduisent à la formation de petits cônes d'éclatement (*pop out* dans le langage anglo-saxon).

Les réactions alcalis-carbonates très peu fréquentes en France, se produisent avec des granulats calcaires dolomitiques. Elles se traduisent généralement par une décohésion de l'interface pâte de ciment/granat avec néoformation de brucite et de calcite.

Les recommandations pour la prévention des risques d'alcali-réaction [7] publiées par le Laboratoire central des Ponts-et-chaussées précisent les dispositions à prendre pour limiter les risques induits par ces réactions qui peuvent conduire à des fissurations importantes de certaines parties d'ouvrage particulièrement exposées aux intempéries.

Corrosion des armatures

Normalement l'alcalinité du béton ($\text{pH} > 12,5$) protège les aciers de la corrosion par formation d'une couche passivante d'hydroxyde de fer.

Toutefois la pénétration du CO_2 dans le béton provoque la diminution du pH au niveau de l'armature ($\text{pH} < 9$) avec destruction de la couche de passivation et possibilité de formation d'oxydes et d'hydroxydes de fer expansifs de type goethite FeOOH . La diffusion de chlorures au contact des aciers peut également provoquer leur dépassement.

Le processus est fortement influencé par les conditions d'humidité relative du milieu qui vont déterminer la résistivité du béton et les coefficients de diffusion du CO_2 , de l'oxygène gazeux et des espèces ioniques (Cl^-) en solution. La compacité du béton joue également un rôle primordial de même que l'épaisseur de recouvrement des armatures.

Carbonatation

Ainsi que cela a déjà été mentionné plus haut, l'hydroxyde de calcium et à un degré moindre les silicates de

calcium hydratés sont susceptibles de se transformer en calcite CaCO_3 au contact du CO_2 atmosphérique ou dissous suivant la réaction de base :

La carbonatation des C-S-H conduit également à la formation de carbonates de calcium (calcite, aragonite, vaterite) qui induit une diminution du rapport molaire CaO/SiO_2 et à long terme la formation de silice colloïdale.

La carbonatation des bétons a des effets positifs et des effets négatifs.

Parmi les effets positifs on peut citer l'accroissement de la compacité superficielle du béton par formation d'une couche de calcite dense. Cette couche, relativement mince lors de la carbonatation en milieu naturel, peut être très épaisse si le matériau est carbonaté artificiellement en enceinte sous CO_2 . Elle augmente alors la résistance mécanique du matériau ainsi que sa résistance chimique dans des proportions notables.

Parmi les effets négatifs, la dépassement suivie de la corrosion des armatures a déjà été signalée plus haut. Mais on peut citer encore les problèmes d'efflorescences ou de variations de teinte inesthétiques qui peuvent se produire par carbonatation de la laitance superficielle ou par exsudation de solutions riches en chaux à travers le béton et formation rapide de calcite.

Action du gel

Les dégradations du béton par le gel sont essentiellement provoquées par des mouvements de l'eau interstitielle dans le réseau de capillaires du béton [8].

Différentes théories plus ou moins complémentaires ont été proposées pour expliquer ces mouvements d'eau :

- théorie des pressions hydrauliques : l'augmentation de volume dû à la formation de glace force l'eau à progresser dans les capillaires où les contraintes importantes générées peuvent provoquer la fissuration progressive du matériau ;
- théorie des pressions osmotiques : la formation de glace qui induit un accroissement local de concentration ionique de la solution. Le rééquilibrage entre les points de concentrations différentes génère des pressions osmotiques et des mouvements de la solution dans le réseau capillaire. Comme dans le cas des pressions hydrauliques, les mouvements d'eau induisent des contraintes et des fissurations.

Les paramètres qui conditionnent les dégradations par le gel sont les suivants :

- température minimale atteinte, vitesse de refroidissement, cycle de gel-dégel
- taux de saturation en eau du béton (les bétons saturés en eau sont plus sensibles)
- formulation du béton (dosage en ciment, rapport eau/ciment), cure préalable à l'exposition au cycles de gel-dégel (la cure doit être suffisante de manière à assurer un bon durcissement et une bonne compacité du béton)

La principale mesure préventive contre les dégradations par le gel est l'introduction d'un entraîneur d'air lors du malaxage du béton. L'entraîneur d'air, convenablement dosé, développe un réseau de bulles qui peuvent servir de vases d'expansion lors des mouvements d'eau. Les bulles, de diamètre compris en moyenne entre 10 et 100 μm , doivent être distribuées régulièrement dans le béton et avoir un espacement compris entre environ 250 et 350 μm suivant la nature du béton et les conditions de gel. Les bétons ainsi traités résistent bien au gel.

CONCLUSIONS

L'inventaire, non exhaustif, effectué ci-dessus montre que les causes de pathologie des bétons sont multiples et plus ou moins complexes. Toutefois, dans la plupart des cas, les mécanismes de base associés aux dégradations sont assez bien connus et les moyens de réduire les risques, à défaut de les écarter, existent.

Bien entendu il reste encore des zones d'ombre que les chercheurs des différents laboratoires impliqués tentent d'éclaircir notamment dans le domaine de la prévision à long terme pour laquelle des modèles sont en cours d'élaboration. Ces modèles sont établis à l'aide d'essais spécifiques en laboratoires (modèles de diffusion, de perméation...) mais aussi par l'observation du comportement des ouvrages anciens. De ce point de vue le concept assez récent d'analogues anciens devrait permettre à terme, par reconstruction patiente de l'histoire chimique, minéralogique et environnementale d'un matériau ancien, d'alimenter les modèles avec des données tirées de comportement réels et de prévoir, par analogie, le futur des bétons actuels.

En tout état de cause, l'application des normes, DTU, avis techniques, recommandations permettent d'obtenir des bétons durables dans les applications courantes. Par ailleurs dans tous les cas où il est nécessaire d'effectuer des réparations celles-ci doivent être précédées d'une étude la plus exhaustive possible des conditions liées aux dégradations :

- Conditions environnementales (température, humidité, cycles climatiques, nature des agents agressifs, conditions locales) ;
- caractéristiques du matériau (nature du liant, des granulats, microstructure...) ;
- mécanisme(s) d'agression en jeu.

Seule la connaissance de ces paramètres peut permettre un choix pertinent des interventions à réaliser, des méthodes à utiliser et des matériaux de restauration à mettre en œuvre.

Hugues HORNAIN
Laboratoire d'études
et de recherches sur les matériaux (LERM)

Bibliographie

1. *La durabilité des bétons*, Presses de l'Ecole nationale des Ponts-et-chaussées, 28 rue des Saints Pères, 75007 Paris, 1992
2. Norme expérimentale P18-305 " Béton - Béton prêt à l'emploi ", 1994
3. Norme expérimentale P18-325 et prénorme européenne ENV 206 " Béton - Performances, production, mise en œuvre et critères de conformité ", 1991
4. Norme NF P15-319 " Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ", 1995
5. Norme NF P15-317 " Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer ", 1995
6. HORNAIN H., "Mécanismes physico-chimiques d'alcalis-réactions", *Annales de l'ITBTP*, n° 517, Octobre 1993, série : BETON 303
7. Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction. LCPC 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15, 1994
8. PIGEON M., PLEAU R., *Durability of concrete in cold climates*, publié par E FN SPON, an imprint of Chapman Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK (1995)

Église Saint-Joseph du Havre Altérations et diagnostic

RÉSUMÉ

Immeubles de Le Corbusier, églises de Guillaume Gillet ou œuvres d'Auguste Perret, plus de cent cinquante édifices en béton armé sont actuellement classés monuments historiques en France. Ces édifices dont le plus ancien date de 1880 sont souvent très altérés. Depuis 1992, des recherches financées par le Cercle des partenaires du patrimoine, sont menées afin de mieux connaître ces bétons anciens et leurs mécanismes de dégradation. À ces fins, quelques édifices, dont l'église Saint-Joseph du Havre ont été soumis à une série de tests.

L'église Saint-Joseph, construite en 1955, a été sélectionnée pour l'intérêt de son environnement : elle est soumise aux embruns marins par sa façade Ouest et à une pollution industrielle par sa façade Est.

Une campagne d'essais sur site ainsi qu'une série d'analyses en laboratoire ont permis de caractériser ce béton ancien et d'établir un diagnostic précis de ses altérations. La comparaison des résultats d'analyse obtenus sur les différentes faces de l'édifice a également permis d'évaluer l'influence de facteurs environnementaux sur la progression des dégradations.

INTRODUCTION

L'église Saint-Joseph du Havre, construite sous la direction d'Auguste Perret, après la seconde guerre mondiale, a fait l'objet d'une campagne complète d'analyses. Les effets du vieillissement du béton de cette église sont particulièrement intéressants du fait de sa localisation en bordure de mer et de la proximité d'industries polluantes. Des essais réalisés sur site et en laboratoire ont permis de caractériser ce béton datant de 1955, d'inventorier les formes d'altération en présence et d'évaluer l'influence des sources extérieures de chlorures et de sulfates sur ces altérations.

HISTORIQUE DE LA CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT

Historique de la construction

Bombardée de 1940 à 1944, la ville du Havre a été presque entièrement rasée lors de la seconde guerre mondiale. La reconstruction de la ville débuta dès janvier 1945. Le ministère de la reconstruction chargea Auguste Perret et son équipe de réédifier la majeure partie du

centre ville, avec la collaboration de Raymond Audigier, architecte havrais. La reconstruction de l'église Saint-Joseph dura quatre ans, de 1951 à 1955.

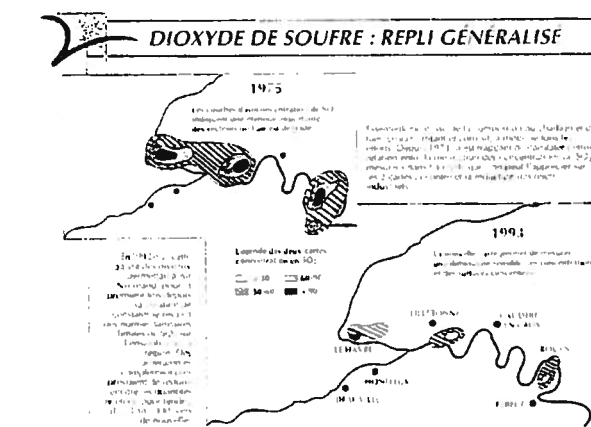
Constituée de trois étages, surmontés d'une tour octogonale, la base de l'église est un carré de quarante mètres soixante de côté, auquel s'ajoutent, à l'ouest l'entrée principale et la tribune, et à l'est, la chapelle d'hiver et les sacristies. Le clocher qui culmine à cent sept mètres est éclairé du haut en bas par une claire-voie fermée par des verres de couleur dont les teintes s'éclaircissent du bas du clocher, vers son sommet.

L'unique matériau de construction utilisé est le béton armé. Ce béton est brut de décoffrage sur tous les piliers et poutres, tandis que les murs sont constitués d'une alternance de dalles de béton lavé et de petits poteaux et poutres de béton brut.

Quatre mille deux cent mètres cubes de béton, sept cents tonnes d'acier et douze mille sept cent soixante-huit pièces de verre furent nécessaires pour bâtir cette église qui a été classée monument historique le 11 octobre 1965.

Environnement

L'originalité de l'environnement de cette église tient à une localisation proche du littoral. Au rez-de-chaussée et au premier étage, les immeubles environnants constituent une barrière protectrice, mais dès le second étage et jusqu'en haut du clocher, la façade Ouest de l'édifice est directement exposée aux embruns.



L'église est également soumise par sa façade Est à une pollution industrielle, liée notamment à la proximité de raffineries de pétrole.

INVENTAIRE DES DÉGRADATIONS VISIBLES

Un examen visuel approfondi a révélé la présence :

- d'épaufrures laissant apparaître les armatures corrodées (elles sont essentiellement localisées, sur les piliers, les poutres et le clocher).
- d'un écaillage généralisé des poteaux de décoration,
- de salissures noires, dans les parties basses de l'édifice, ainsi que d'encroûtements dans les zones non lessivées,
- de nids de cailloux aux sites probables des pieds de coffrage et des reprises de bétonnage.
- d'un recouvrement biologique dont les espèces semblent varier en fonction de l'orientation,
- et d'un aspect grenu du béton brut sur les portions d'église les plus exposées aux intempéries (sur la façade Ouest principalement). Dans ces zones, la peau du béton a pratiquement disparu pour laisser les granulats déchaussés apparents. Sur la façade Est, où ce phénomène d'érosion est moins important, les veines du bois ayant servi au coffrage sont encore visibles. Toutes orientations confondues, c'est le premier étage qui semble avoir le plus souffert de cette érosion.

Mais il n'a pas été noté de fissuration marquée.

Les dégradations les plus importantes sont liées aux épaufrures.

ANALYSES SUR SITE ET EN LABORATOIRE

Les analyses sur site et en laboratoire avaient deux objectifs. Le premier était de caractériser aussi précisément que possible ce béton ancien et ses altérations. Le second était d'évaluer l'influence d'un environnement à la fois riche en chlorures et en sulfates (mer et pollution), a priori corrosif vis-à-vis du béton sur l'état de conservation de l'édifice.

Six zones d'étude ont été sélectionnées en tenant compte de l'orientation de l'édifice vis-à-vis des agents agressifs et de la hauteur des bâtiments environnants. Elles se situent au rez-de-chaussée, au premier et au deuxième étages (dès le deuxième étage, l'église domine les immeubles voisins) des façades Ouest (face à la mer) et Est (face aux pollutions industrielles) de l'édifice, au niveau de piliers de structure, en béton brut de décoffrage.

Caractérisation du béton et de ses altérations

Diamètre et position des armatures

La localisation, le diamètre et l'enrobage des armatures ont été évalués au moyen d'un appareil de profométrie (pachomètre). Les diamètres des armatures varient de cinq à quinze millimètres. Sur les piliers du rez-de-chaussée et du premier étage, les armatures sont localisées à environ cinq, six centimètres de la surface. Les limites de l'appareil ont été plusieurs fois atteintes. L'épaisseur d'enrobage est donc parfois supérieure à six centimètres.

Au deuxième étage, les armatures sont en moyenne à une profondeur de quatre centimètres et demi.

Des mesures ont également été réalisées au premier étage, au niveau des poutres et poteaux de décoration. Les épaisseurs d'enrobage y sont de l'ordre de deux à trois centimètres.

Ces premières mesures montrent que les épaisseurs d'enrobage dans les six zones testées semblent suffisamment importantes pour que le béton protège efficacement les armatures. À l'inverse, les armatures des poutres et poteaux décoratifs, plus proches de la surface du béton, ont probablement, par leur oxydation, été à l'origine des nombreux écaillages et épaufrures observés sur ces éléments.

Degré de corrosion des armatures

Des mesures de potentiel électrique par rapport à une électrode de référence au cuivre/sulfate de cuivre saturé (Cu/CuSO₄Sat) ont été réalisées dans les six zones d'étude.

Au premier étage Est, ainsi qu'au second étage, aucune mesure n'a été possible, le béton étant probablement trop "sec".

Dans les autres zones les résultats sont contrastés. Les épaisseurs d'enrobage des armatures mesurées précédemment laissaient supposer une passivation satisfaisante des armatures des piliers de structure.

Si au premier étage Ouest, les armatures sont passivées, au rez-de-chaussée Ouest, elles sont dans le domaine de corrosion possible du sol à quarante centimètres, mais passivées au-dessus de quarante centimètres. Au rez-de-chaussée Est, elles sont dans le domaine d'enrouillement certain de zéro à vingt-cinq centimètres et dans le domaine d'enrouillement possible au dessus de vingt-cinq centimètres. Des photos datant de la construction, montrent que la base de l'édifice était armée d'éléments métalliques horizontaux qui ont probablement été sectionnés au ras de la peau et recouverts d'une mince pellicule de béton, insuffisante pour les protéger (cf. Fig. 2).

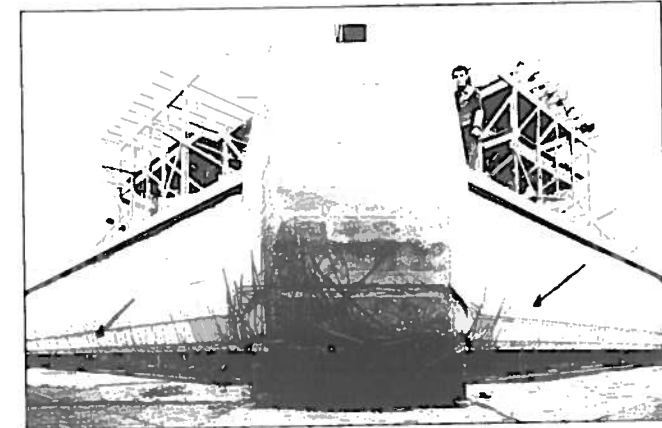


Figure 2 - Armatures métalliques émergeant à la surface du béton. Photographie prise lors de la construction de l'église

Profondeur de carbonatation

La carbonatation qui est un phénomène de vieillissement naturel du béton, s'accompagne d'une diminution de pH (de 12,5 à < 9) lors de la transformation de la portlandite en calcite. Le pH diminuant, l'environnement protecteur que représentait le béton pour les armatures va devenir propice au développement d'une corrosion (cf. Fig. 3).

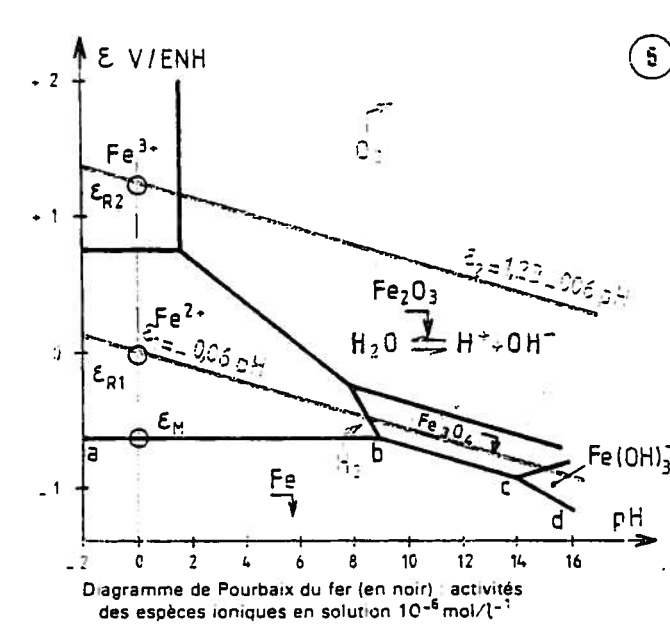


Figure 3 - Diagramme de Pourbaix. [2]

Les profondeurs de carbonatation, évaluées par coloration à la phénolphthaléine sur cassures fraîches de carottes de béton, sont relativement importantes. Elles varient de zéro à quatre centimètres (cf. Tableau 1).

Orientation	Profondeur de carbonatation mesurée à la phénolphthaléine (en cm)
2 W	0,05 < Pc < 1,5 cm
1 W	2 < Pc < 4 cm
1 E	0,2 < Pc < 0,5 cm
RDC W	0 < Pc < 0,3 cm
RDC E	0 < Pc < 1 cm

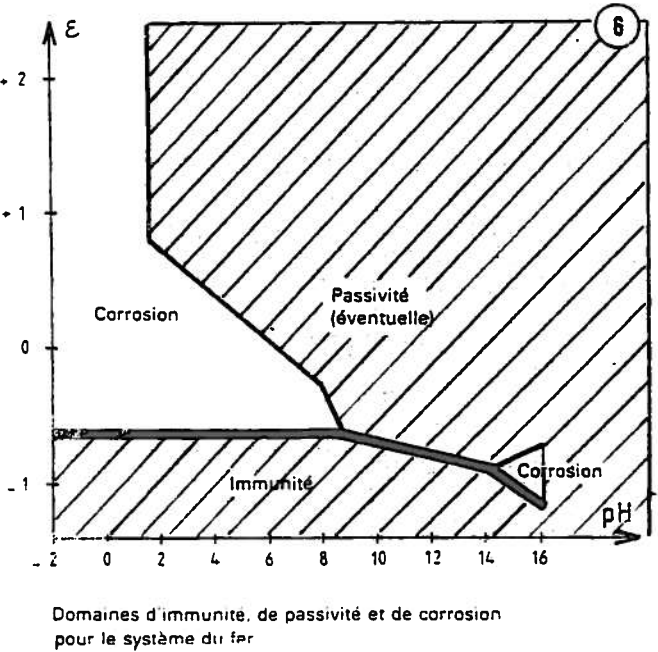
Tableau 1 - Profondeurs de carbonatation

Porosité totale accessible à l'eau et masse volumique du béton

La porosité totale accessible à l'eau et la masse volumique du béton ont été mesurées par pesée hydrostatique selon la norme ISO 5017. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 2.

Orientation	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité accessible à l'eau (%)
2 W	2,23	13,9
1 W	2,21	15,5
1 E	2,27	12,9
RDC W	2,23	14,8
RDC E	2,19	16,5
Valeur Moyenne	2,23 ± 0,03	14,7 ± 1,4

Tableau 2 - Résultats des mesures de masse volumique et porosité



Ces valeurs de porosité sont relativement homogènes et sont indicatives de bétons de **compacité moyenne**.

Porométrie au mercure

Les mesures de porosité au mercure n'ont pas révélé d'anomalie, hormis quelques particularités dans la distribution du volume poreux :

- importance relative de la classe moyenne des pores (0,01 à 1µm) par rapport à un béton "classique" à base de CPA,
- faiblesse relative des faibles diamètres de pores (< 0,01 µm) compte tenu de l'âge du béton,
- légère abondance des pores en "bouteille"...

Sections polies

L'examen du béton en sections polies au microscope optique en lumière réfléchie révèle que le liant utilisé contient encore de nombreux grains clinkérisés anhydres, de composition minéralogique normale, leur taille étant comprise entre 20 et 100 µm. Les silicates tricalciques (C₃S) sont bien développés en cristaux polygonaux. Les silicates bicalciques (C₂S), relativement fréquents, se présentent sous une forme arrondie et striée, certains grains pouvant montrer un faciès en doigts de gants. La phase interstitielle, en quantité normale se compose d'aluminate tricalcique (C₃A), relativement abondant (cf. Fig. 4) ; et d'alumino-ferrite de calcium (C₄AF).

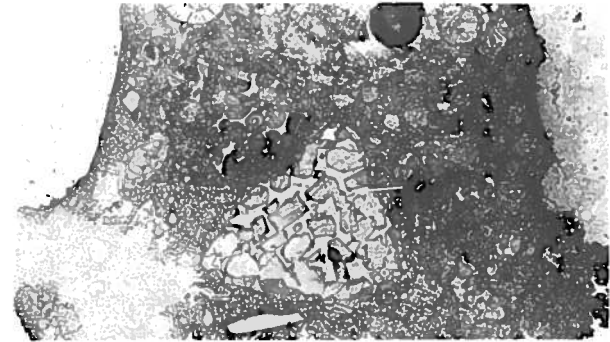


Figure 4 - Premier étage Ouest. Section polie observée en lumière réfléchie : Grains anhydres de clinker dans le béton phases C₃S (1), C₂S (2), C₃A (3), C₄AF (4), grain de laitier (5).

De nombreux grains de laitier sont observés (de 15 à 20 %). Leur taille moyenne est d'environ 80 µm. Ces grains montrent tous une auréole d'hydratation pseudo-morphique, relativement peu développée compte tenu de l'âge du béton.

Ces observations permettent d'identifier le ciment utilisé comme étant un CPA-L c'est-à-dire au laitier (ancienne dénomination).

Péetrographie

L'observation du béton en lames minces montre que la répartition des granulats dans la masse du béton est satisfaisante, la distribution granulaire paraissant continue. Les gravillons sont constitués essentiellement de silex de la craie, pouvant localement inclure des impuretés carbonatées. Des éléments calcaires sont également présents (calcaires dolomitiques à matrice sparitique ; biomicrites légèrement dolomitiques, parfois silicifiées ; calcaires oolithiques et des calcaires silicifiés à quartz auto-morphes, calcédoine, calcite spathique...)

Un calcaire bioclastique sableux à glauconies, voire algaire est identifié dans l'échantillon du rez-de-chaussée Ouest. Sporadiquement, des granitoïdes sont remarqués, ainsi que des quartzites et des roches effusives, localement très altérées. Les grains de sable sont en majorité anguleux, le quartz étant très majoritaire. Les autres grains sont représentés par des silex, feldspaths, calcaire, quartzite, glauconie...

Les granulats utilisés sont de nature **silico-calcaire d'origine alluvionnaire**. Ils sont potentiellement réactifs (PR) voire potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP) vis-à-vis de l'alcali-réaction (d'après le fascicule de documentation AFNOR P 18-542).

Ces observations montrent également que la pâte de ciment est le plus souvent vacuolaire et que les profondeurs de carbonatation varient en général de moins de cinq millimètres à plus de deux centimètres.

Composition minéralogique

Deux analyses chimiques complètes du béton ont été réalisées sur deux échantillons. Elles ont été effectuées sur la fraction soluble dans l'acide nitrique au 1/50°. Les cations ont été dosés par spectrométrie d'émission plasma (ICP) et les sulfates par chromatographie ionique. L'analyse chimique de la fraction soluble après attaque acide ménagée permet d'obtenir les teneurs des oxydes de la phase liante et des carbonates présents dans les bétons. L'analyse thermogravimétrique (effectuée dans l'azote) permet d'effectuer la distinction des départs d'eau, de CO₂ et de Ca(OH)₂ correspondant à la perte au feu. Ces dosages et ces mesures sont indispensables au calcul de la composition minéralogique des bétons selon la méthode F. X. Deloye (programme Minéraux du LCPC). L'hypothèse retenue pour le calcul minéralogique a été celle d'un ciment Portland avec ajout de laitier. À partir des résultats des analyses chimiques et thermogravimétriques, le calcul informatique permet de déterminer la composition minéralogique du béton (dosage en ciment exprimé en pourcentage par rapport au béton et quantité des différentes espèces minéralogiques de granulats : calcite, dolomite, quartz et silicates).

Les résultats sont donnés dans le tableau 3.

Composition calculée du liant	Échantillon 1 (%)	Échantillon 2 (%)
SiO ₂	27,5	27,5
Al ₂ O ₃	5,2	5,3
Fe ₂ O ₃	2,3	2,4
CaO	60,5	60,5
MgO	1,6	1,6
Sable siliceux en % massique	67,3	61,3
Sable calcaire en % massique	14,9	18,9
Ciment anhydre en % massique	12,7	14,4
Dosage en ciment en kg/m ³ de béton (5 %)	280 ± 15	315 ± 15
Estimation du rapport E/C	> 0,6	> 0,6

Tableau 3 : Composition calculée du béton

Il ressort de ce calcul que le dosage en ciment de type CPA-L varie entre 280 et 315 kg/m³ (± 15 kg), valeur satisfaisante pour un ouvrage de cette taille. Il est à souligner que le ciment apparaît nettement siliceux, semblant indiquer un rapport Si/Al élevé du laitier utilisé.

L'estimation du rapport E/C par un calcul prenant en compte l'eau "libre" (imputée à la porosité) et l'eau "liée" (provenant des hydrates du type C-S-H, Ca(OH)₂, ettringite, etc.) donne un résultat élevé, probablement supérieur à 0,6.

Recouvrement biologique

Lors de l'examen visuel, la présence d'un recouvrement biologique varié a été constaté. Quelques échantillons ont été prélevés au deuxième étage, au Nord et au Sud, puis analysés.

L'analyse des dépôts vert vif prélevés sur la façade Nord, montre qu'il s'agit d'algues ou des lichens imparfaits, foliacés et encroûtants. Ces derniers peuvent contribuer à la décohésion de la peau du béton en s'enracinant, comme sur les pierres naturelles. Il serait intéressant de le vérifier.

L'examen des prélèvements de la façade Sud, d'un vert plus sombre, révèle une combinaison de dépôts noirs (probablement non biologiques), et de recouvrements d'algues et de lichens (Caloplaca).

Enfin les encroûtements noirs, prélevés en zone non lessivée (sous un escalier), ne semblent pas être d'origine biologique.

Impact de l'environnement

Afin d'évaluer l'impact à la fois de la mer et des pollutions industrielles, des dosages de chlorures et de sulfates ont été réalisés. Pour chaque zone de prélèvement, les dosages ont concerné la surface et différentes profondeurs (quatre tranches : surface-1 cm, 1-2 cm, 2-3 cm, 5-6 cm), afin d'établir des profils de pénétration. Les sulfates ont été dosés par chromatographie ionique et les

chlorures par potentiométrie, après une attaque acide ménagée des échantillons. Des observations au microscope électronique à balayage, sont venues compléter ces dosages quantitatifs (par la recherche de néoformations...) mais aussi les précédentes analyses du béton (traces de carbonatation...)

Sulfates

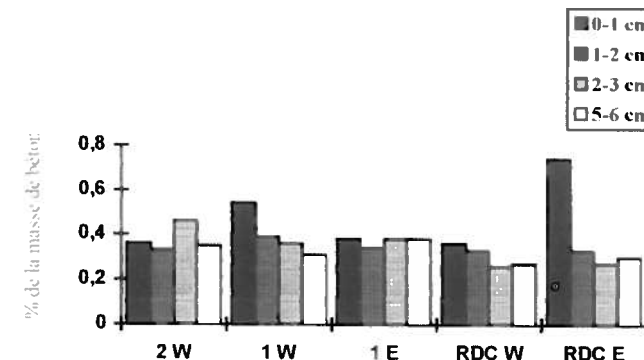


Figure 5 - Teneurs en sulfates (dans le béton)

La concentration en sulfates est maximale et particulièrement élevée par rapport aux autres résultats, sur la tranche 0-1 cm du rez-de-chaussée de la façade Est (cf. Fig. 5). Mais la carotte du rez de chaussée Est, contrairement aux autres prélèvements, présentait une pellicule noire en surface. Cette couche noire probablement constituée de suies est certainement à l'origine de cette teneur massique en sulfates de 0,74 %, qui n'est pas réellement représentative de l'édifice. C'est pourquoi, bien qu'indicative d'une pollution, qui semblerait provenir de l'Est, du côté des industries (raffineries...) et de l'agglomération du Havre (circulation automobile), elle est exclue des statistiques suivantes.

La moyenne de toutes les analyses confondues est de 0,35 % en pourcentage massique. Cette valeur non négligeable peut traduire, compte tenu du dosage relativement important en ciment, un enrichissement extérieur.

Un gradient de concentration, révélateur de cet apport extérieur, apparaît avec la profondeur. La moyenne des concentrations dans la tranche de surface (0-1 cm) est de 0,41 %, contre 0,32 % dans la tranche 5-6 cm.

Néanmoins, les écarts de concentration entre la façade Est et la façade Ouest ne sont pas suffisamment marqués pour pouvoir conclure sur l'origine de la source de sulfates sous la forme de SO₂. Les pollutions atmosphériques issues de l'agglomération du Havre, liées à la circulation automobile ou d'origine industrielle, contribuent certainement à ces concentrations en sulfates. Mais un apport maritime est également possible.

Chlorures

Par potentiométrie, après attaque acide, des pourcentages massiques par rapport à la masse de béton ont été évalués. Pour pouvoir se référer aux prescriptions de la norme P 18-011 sur la classification des environnements agressifs, les pourcentages massiques par rapport à la masse de ciment ont été calculés, en utilisant le pourcentage massique moyen de ciment dans le béton obtenu par calcul minéralogique du liant (cf. Fig. 6).

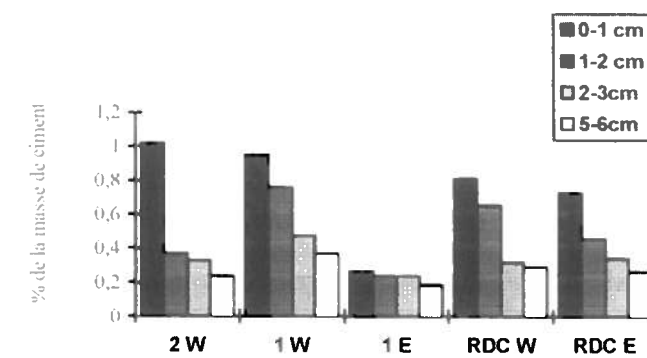


Figure 6 - Teneurs en chlorures (dans le ciment)

Ce sont les échantillons de la façade Ouest qui contiennent le plus de chlorures, la surface du second étage présentant la teneur maximale. Ces concentrations, non négligeables, sont à relier à la proximité de la mer, la façade Ouest étant la plus exposée, en particulier les parties hautes de l'édifice, l'église dominant les bâtiments voisins à partir du second étage.

La moyenne de toutes les analyses confondues est de 0,46 % de la masse de ciment. Cette valeur relativement importante dans un béton "aérien" traduit un apport extérieur.

Un gradient de concentration apparaît également, très nettement, avec la profondeur. La moyenne des concentrations dans la tranche de surface 0-1 cm est en effet de 0,76 %, alors qu'elle est de 0,27 % dans la tranche 5-6 cm. D'autre part, la moyenne des concentrations sur la façade Ouest est de 0,55 %, contre 0,34 % à l'Est. La source principale de chlorures se trouve donc vers l'Ouest, du côté de la mer.

Il apparaît également que les plus fortes concentrations cumulées se trouvent au niveau du deuxième étage. Les chlorures sont donc véhiculés par les embruns à une hauteur non négligeable (quarante mètres environ).

Selon le fascicule de documentation P18-011, la teneur limite admissible en ions chlorure dans un béton armé est de 0,65 % de la masse de ciment.

Cette valeur limite est dépassée systématiquement dans la tranche 0-1 cm, sur la façade Ouest. Elle l'est également ponctuellement au rez-de-chaussée de la façade Est, sur la même tranche. Néanmoins, dans la tranche 5-6 cm, correspondant aux profondeurs moyennes où les armatures ont été détectées dans les piliers, la teneur en ions chlore reste inférieure à 0,65 % de la masse de ciment. Ces concentrations en chlorure bien que non négligeables, ne constituent pas encore une menace de corrosion pour les armatures des piliers.

Dans le cas des poteaux de décoration, les armatures ont été localisées en moyenne à 2-3 cm. Malgré l'absence de dosage des chlorures du béton de ces poteaux, il est probable que la concentration limite en ions chlorure acceptable soit dépassée dans la zone des armatures, créant un risque de corrosion.

Examen au microscope électronique à balayage (MEB)

Des fragments de carottes ont été observés au MEB, après métallisation à l'or. Pour chaque zone de

prélèvement, des échantillons prélevés à la surface et à différentes profondeurs ont été examinés.

Façade Ouest

L'examen des surfaces aux différents niveaux de la façade Ouest révèle des granulats (grains de sable et graviers) en général dénudés, voire déchaussés. Une dissolution affecte la pâte de ciment (pauvre en calcium à l'analyse à l'EDS), qui apparaît également carbonatée et fortement microporeuse.

Localement, des cristaux de gypse (au premier étage) sont observés dans les empreintes de granulats (document 12). La microanalyse de la pâte de ciment révèle un signal léger mais constant en chlore, et plus rarement en soufre (appartenant aux sulfates de calcium).

De nombreux micro-organismes filamenteux ou sphériques apparaissent en surface. Leur microanalyse révèle la présence de chlore. Ces micro-organismes, intimement liés à la matrice, semblent participer à sa décohésion une fois celle-ci amorcée (Fig. 7 et 8), ce qui confirme l'examen du recouvrement biologique.

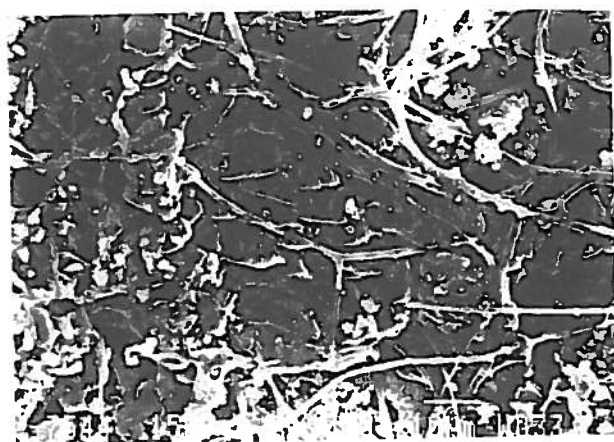


Figure 7 - Premier étage Ouest
Gypse dans une empreinte de granulat en surface de l'échantillon (1 = gypse 2 = micro-organisme fibreux).

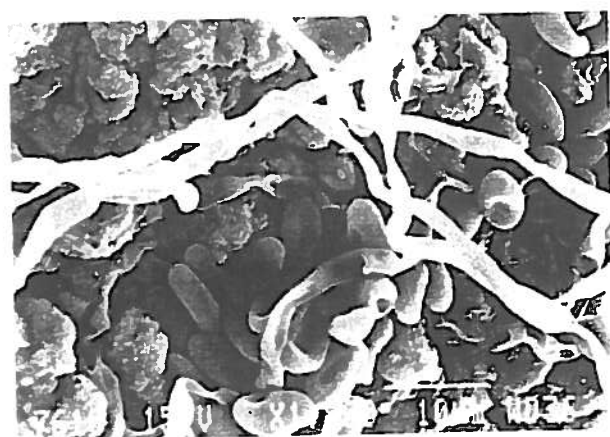


Figure 8 - Deuxième étage Ouest
Micro-organismes fibreux et arrondis.

Profondeur

Un fragment du premier étage a ensuite été observé depuis la surface, jusqu'à dix centimètres de profondeur. Du gypse est rencontré depuis la surface, jusqu'à dix mil-

limètres de profondeur. Ce gypse est présent dans les vacuoles, mais aussi dans la pâte de ciment, où il est bien intégré. De l'ettringite à faciès expansif est également observée dans les quinze premiers millimètres, plus rarement ensuite.

À partir de dix millimètres et jusqu'à quatre centimètres de profondeur, de nombreux cristaux de chloroaluminates de calcium hexagonaux sont observés, dans les vacuoles, mais aussi à l'intérieur de la pâte (cf. Fig. 9 et 10).

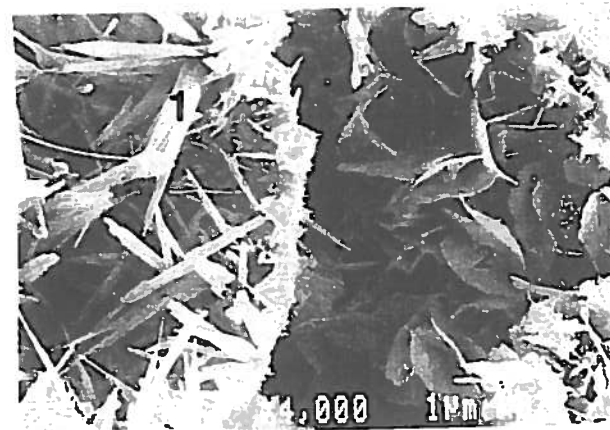


Figure 9 - Premier étage Ouest
Pâte de ciment à 10 mm de profondeur (1 = ettringite, 2 = chloro-aluminate de calcium).



Figure 10 - Premier étage Ouest
Chloro-aluminate de calcium à proximité de la surface (1 = chloro-aluminate de calcium, 2 = pâte de ciment composée de C-S-H denses).

Par ailleurs, la pâte de ciment montre une microporosité variable, renfermant des aluminates de calcium hexagonaux en quantité importante, présents dans les zones microporeuses mais aussi dans les zones plus denses. Enfin la portlandite Ca(OH)_2 , absente dans les premiers millimètres (probablement carbonatée et lixiviée), devient assez fréquente au-delà de six millimètres de profondeur, sous la forme de grandes plaquettes hexagonales (cf. Fig. 11). Sa fréquence sous cette forme invite à penser qu'il y a eu gâchage avec une quantité d'eau relativement élevée (E/C important), ce qui confirme les résultats du calcul minéralogique. Les signes de carbonatation (cristaux de portlandite ronds et recouverts de calcite) se retrouvent jusqu'à dix

centimètres de profondeur ! Ce qui va bien au-delà des valeurs obtenues à la phénolphthaleïne.

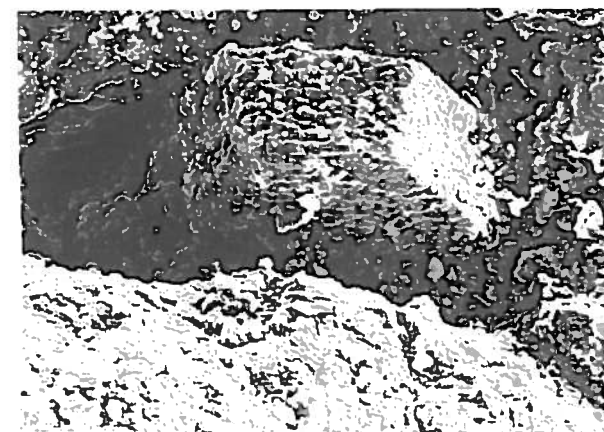


Figure 11 - Premier étage Ouest
Portlandite carbonatée à 40 mm de profondeur.

Façade Est

Les surfaces des échantillons de la façade Est sont plus lisses que celles de la façade Ouest. Cependant, la présence de nombreuses marques de lixiviation et de carbonatation est constatée.

Au rez-de-chaussée l'état de surface diffère de celui du premier étage. De nombreux cristaux de gypse apparaissent à l'intérieur des pores, le chlore n'est quasiment pas détecté et les micro-organismes sont rares. Les cristaux de gypse sont vraisemblablement à relier aux nombreuses salissures noirâtres, en général riches en SO_2 . L'examen d'une écaille également prélevée au rez-de-chaussée Est, en bordure de fenêtre confirme cette hypothèse. Sa surface noirâtre à jaunâtre est totalement recouverte de gypse bien cristallisé, associé à des cendres volantes poreuses, riches en carbone et en soufre (sues) (cf. Fig. 12).

La surface de l'échantillon du premier étage Est est plus comparable à ce qui a été observé sur la façade Ouest et à l'inverse de l'échantillon du rez-de-chaussée Est, l'élément chlore y est détecté, alors que le gypse est absent.



Figure 12 - Rez-de-chaussée Est
Aspect général de la surface (1 = gypse, 2 = cendre riche en carbonate et en soufre).

Profondeur

La microstructure de la pâte de ciment apparaît globalement hétérogène, avec des zones microporeuses comprenant des silicates de calcium hydratés (C-S-H) fibreux et bien individualisés, d'autres zones étant au contraire denses, constituées d'assemblages compacts de C-S-H (cf. Fig. 13, 14 et 15).

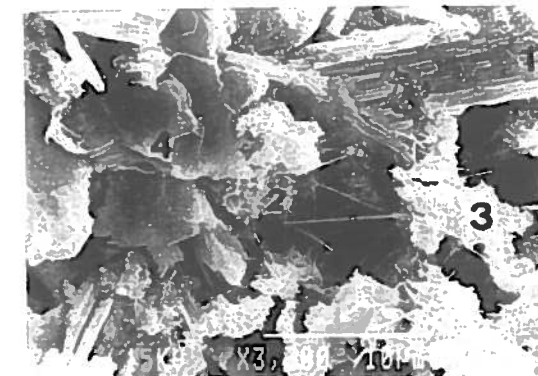


Figure 13 - Premier étage Est
Pâte de ciment dans une zone microporeuse (1 = Ca(OH)_2 , 2 = ettringite, 3 = C-S-H, 4 = aluminates de Ca(OH)_2)

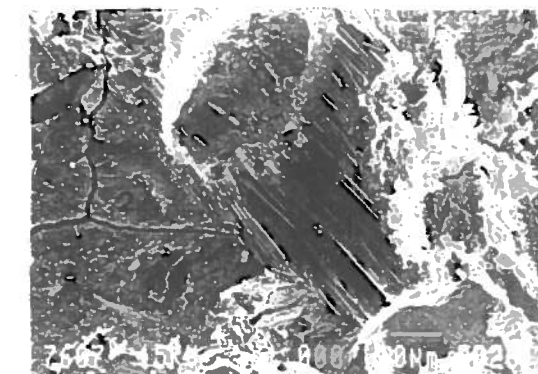


Figure 14 - Premier étage Est
Pâte de ciment dans une zone compacte (1 = Ca(OH)_2 , 2 = C-S-H dense)

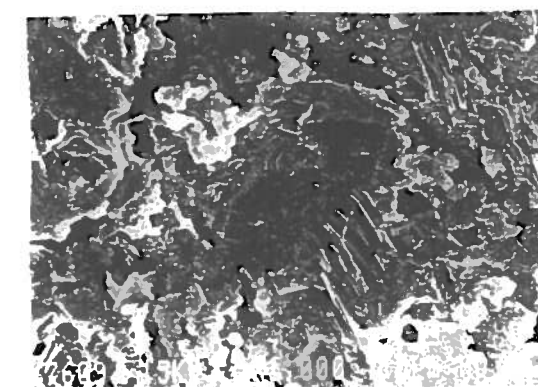


Figure 15 - Rez-de-chaussée Est
Aspect de la pâte de ciment à 25 mm de profondeur

Premier étage Ouest - Rez-de-chaussée Est

Contrairement à la façade Ouest, la pâte de ciment semble lixiviée, carbonatée et de microporosité élevée (cf. Fig. 16) uniquement dans les six premiers millimètres. Au-delà de cette profondeur, la portlandite est bien visible, massive, microclivée, ou au contraire sous la forme de cristaux hexagonaux (cf. Fig. 15). Des cristaux hexagonaux d'aluminat de calcium bien développés apparaissent également.

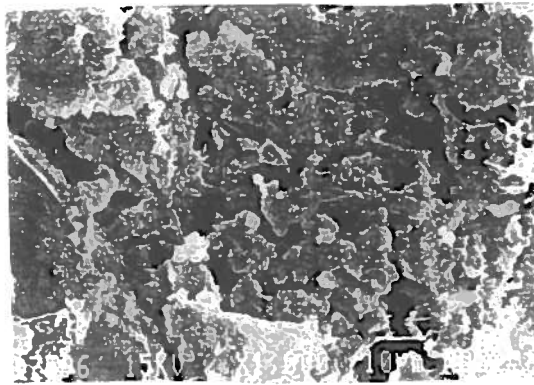


Figure 16 - Premier étage Est
Faciès de dissolution de la pâte de ciment à près de 6 mm de profondeur.

Le gypse est toujours présent dans les pores et les bulles d'air entraîné, jusqu'à une profondeur de l'ordre de cinq millimètres. Il est à signaler que l'ettringite n'a été remarquée que sous son faciès prismatique fin, non expansif (ettringite primaire) (cf. Fig. 13).

Des grains de laitiers ont été observés de façon plus ou moins fréquente, dans la plupart des échantillons. Le ciment utilisé lors de la construction semble donc être un ciment au laitier. Ce qui confirme l'hypothèse émise lors de l'examen des sections polies et du calcul minéralogique du liant.

Les microanalyses de la pâte de ciment ne montrent pas de signal en chlore.

SYNTHÈSE

Examen visuel

Les principales dégradations du béton proviennent d'éclatements de surface localisés sur les poteaux et poutres, apparemment en relation avec un gonflement des armatures ; une autre forme d'altération concerne la mise en relief de granulats sur ces mêmes éléments de structure (érosion éolienne).

Un recouvrement biologique variable suivant les orientations, ainsi que des salissures noirâtres (essentiellement au rez-de-chaussée : suies) recouvrent les surfaces.

Caractérisation du béton et de ses altérations

La carbonatation du béton de l'édifice est généralement comprise entre zéro et quatre centimètres, elle atteint exceptionnellement dix centimètres.

Les porosités mesurées à l'eau sont de l'ordre de 15 %, et indicatives de bétons de compacité moyenne.

Le liant utilisé était un ciment Portland Artificiel avec ajout de laitier, de composition minéralogique normale, la phase alumineuse C_3A paraissant néanmoins relativement abondante. Le laitier apparaît relativement peu hydraté compte tenu de l'âge du béton.

Le calcul du dosage en liant fait ressortir un dosage en ciment compris entre 280 et 315 kg/m^3 , (± 15 kg), tandis que le rapport E/C lors de la mise en œuvre fut probablement élevé et supérieur à 0,6 (confirmé par l'observation de la microstructure au MEB).

Les granulats utilisés sont de nature silico-calcaire d'origine alluvionnaire. Leur répartition dans la masse du béton est satisfaisante. Leur distribution paraît continue. Ils sont globalement potentiellement réactifs (PR) voire potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP) vis-à-vis de l'alcali-réaction (d'après le fascicule de documentation P 18-542), mais il n'a pas été observé de marques d'alcali-réaction (fissuration, gels...)

Les armatures de cinq à quinze millimètres de diamètre sont localisées entre 4,5 et 6 cm (voire au-delà) de la surface, à l'exception des éléments décoratifs où elles sont en moyenne à 2-3 cm de profondeur. La mise en œuvre mais aussi la carbonatation importante de ce béton, expliquent en partie l'oxydation des armatures en pied de mur dans les quarante premiers centimètres. Au-delà de cette hauteur, elles sont généralement passivées. Cette dépassement progressive des aciers est amplifiée par la présence de chlorures jusqu'à plusieurs centimètres de profondeur. Ce phénomène étant déjà initié en de multiples endroits, il est à craindre qu'il se généralise progressivement à l'ensemble de l'édifice.

Les observations au microscope électronique à balayage ont montré que la texture du béton était variable, en général microporeuse mais pouvant aussi être dense, ceci en liaison avec le degré de carbonatation de la pâte de ciment.

La mise en relief des granulats en surface (façades Ouest essentiellement) correspond à une dissolution partielle de la pâte de ciment devenue microporeuse et à une carbonatation de la portlandite. L'origine de cette lixiviation est liée à l'abondance des précipitations. Les façades Est, plus protégées, sont moins affectées. Des micro-organismes filamenteux ou sphériques apparaissent fréquemment. Enfin une pollution de la pâte de ciment par l'élément chlore est souvent notée.

L'analyse du recouvrement biologique, très varié, laisse supposer que les différents lichens et algues contribuent à la décohésion de la peau du béton. Il serait intéressant de compléter ces observations par des investigations plus complètes.

Influence de facteurs environnementaux

Les teneurs en sulfates et chlorures mesurées à différentes profondeurs, montrent l'existence d'apports extérieurs.

La source extérieure de chlorures provient clairement de l'Ouest, côté mer. Ce phénomène est plus marqué au

niveau des étages supérieurs, démontrant la hauteur d'influence des embruns marins.

En ce qui concerne les sulfates, bien que les dosages aient révélé un apport extérieur, leur source est difficilement localisable. Dans les niveaux bas, les sulfates semblent provenir de la pollution atmosphérique produite par l'agglomération à l'Est. Néanmoins des concentrations non négligeables en sulfates ont été mesurées à tous les niveaux, toutes orientations confondues. Un apport maritime est donc probable.

Cet apport en sulfates se traduit par la présence locale d'ettringite gonflante, pouvant éventuellement provoquer des désordres par fissuration si leur concentration venait à s'accroître. Cependant, la présence de chloro-aluminates de calcium peut conférer au béton une relative protection aux ions sulfates, les aluminates de calcium réactifs étant déjà combinés sous cette forme.

CONCLUSION

De nombreux essais in situ et en laboratoire ont été réalisés sur le béton de l'église Saint-Joseph du Havre. Les objectifs de l'étude étaient non seulement de caractériser le béton de l'édifice (datant de 1955) et ses altérations, mais aussi d'évaluer l'impact sur ces altérations de deux types d'agents agressifs : la mer, à quelques dizaines de mètres, et diverses sources de pollution (urbaine ou industrielle), également très proches.

Les différentes analyses montrent que le béton de l'église Saint-Joseph, bien qu'ayant probablement été gâché avec beaucoup d'eau, a été étonnamment bien mis en œuvre, en ce qui concerne la position des armatures, sur la plupart des éléments de structure. Cependant ce béton a vieilli (profondeurs de carbonatation de plusieurs centimètres) et a subi une érosion éolienne qui ont conduit à l'apparition d'épaufrures et à un déchaussement des granulats. L'édifice est également colonisé par un recouvrement végétal contribuant probablement à cette décohésion de la surface du béton.

En ce qui concerne l'impact de la mer et des différentes pollutions, l'apport en chlorures et en sulfates est net. L'origine des chlorures est clairement la mer. Ces chlorures en concentrations non négligeables ont probablement contribué à l'apparition d'épaufrures, en favorisant la corrosion des armatures les plus proches de la surface. En ce qui concerne les sulfates, il ne semble pas y avoir une source unique. Les concentrations mesurées et les présences locales de gypse et d'ettringite sont communes aux différentes façades. Seules les parties basses de l'édifice semblent subir un apport plus marqué en sulfates par leur façade la plus exposée aux pollutions industrielles, la façade Est. Ces concentrations en sulfates ne sont cependant pas à l'origine de dégradations.

L'état de dégradation de l'église Saint-Joseph n'est donc pas actuellement alarmant. Cependant les concentrations en chlorures et en sulfates sont à surveiller, dans la mesure où elles pourraient occasionner d'importantes altérations si elles venaient à augmenter. Il serait également intéressant de compléter cette étude par des analyses plus complètes du recouvrement biologique.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la section microbiologie du Laboratoire de recherche des Monuments historiques, ainsi que le laboratoire de la société Calcia à Guerville pour leur collaboration active à cette étude. Nous tenons également à remercier la Ville du Havre.

E. MARIE-VICTOIRE,
Cercle des partenaires du patrimoine

P. BROMBLET, A. TEXIER,
Laboratoire de recherche des Monuments historiques

B. QUÉNÉE,
Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux

G. GRIMALDI,
Laboratoire régional de l'Est parisien

Diagnostic de l'état des aciers dans le béton

INTRODUCTION

Lorsqu'il est sain, le béton protège les armatures parce qu'il constitue une barrière à la pénétration des agents agressifs et qu'il forme autour de ce métal une couche dite de passivation. Dans certains cas, les ouvrages en béton peuvent subir des dégradations qui peuvent être évitées grâce à une bonne conception et à un choix convenable des constituants du béton. Mais même si le béton est bien conçu et bien mis en œuvre, des désordres peuvent se produire parce que les agressions sont anormalement fortes.

D'une façon générale, le béton armé est agressé par :

- **le gel-dégel du béton**,
- **la carbonatation du béton d'enrobage** due au dioxyde de carbone de l'air. Cette réaction provoque un abaissement du pH du béton et le colmatage progressif de certains pores,
- **la corrosion des armatures par les chlorures** : elle se produit lorsque la teneur en agents agressifs, à leur contact, atteint des valeurs seuils. Ceci signifie que la couche de passivation est détériorée (dépassivation).

La corrosion des armatures a donc les particularités suivantes :

- Elle est localisée en certains points de la construction,
- elle ne commence que si les agents agressifs qui traversent l'enrobage de béton, se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des aciers,
- elle peut commencer à se produire même si l'enrobage de béton n'est pas dégradé.

C'est pourquoi, le diagnostic de l'état des armatures se fait non seulement par des moyens simples, mais aussi par des méthodes non destructives.

DIAGNOSTIC SIMPLE

L'état de dégradation du béton peut se déterminer visuellement. Les défauts sont de diverses natures et influent plus ou moins sur le fonctionnement mécanique de la construction.

Par exemple, les salissures et efflorescences nuisent à l'esthétique de la construction, sans altérer son comportement mécanique. Par contre, les fissures peuvent engendrer des désordres graves sur la stabilité de la construction.

C'est pourquoi, pour évaluer très simplement l'état de conservation d'une construction, il importe de localiser les défauts visibles et de les reporter sur les plans. Un tel diagnostic doit préciser les types exacts des défauts visibles.

DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT PRÉSENT DE CONSERVATION

Mesure du potentiel d'électrode

Dans un ouvrage en béton armé, les diverses armatures peuvent se trouver dans des situations de corrosion qui varient d'un point à un autre. Il importe donc de localiser les zones où les armatures sont corrodées. Ce diagnostic peut se faire par des méthodes non destructives, telles que les mesures de potentiel d'électrode (*Fig. 1*) dans lesquelles l'électrode de référence est placée sur la surface du béton (Réf. 1).

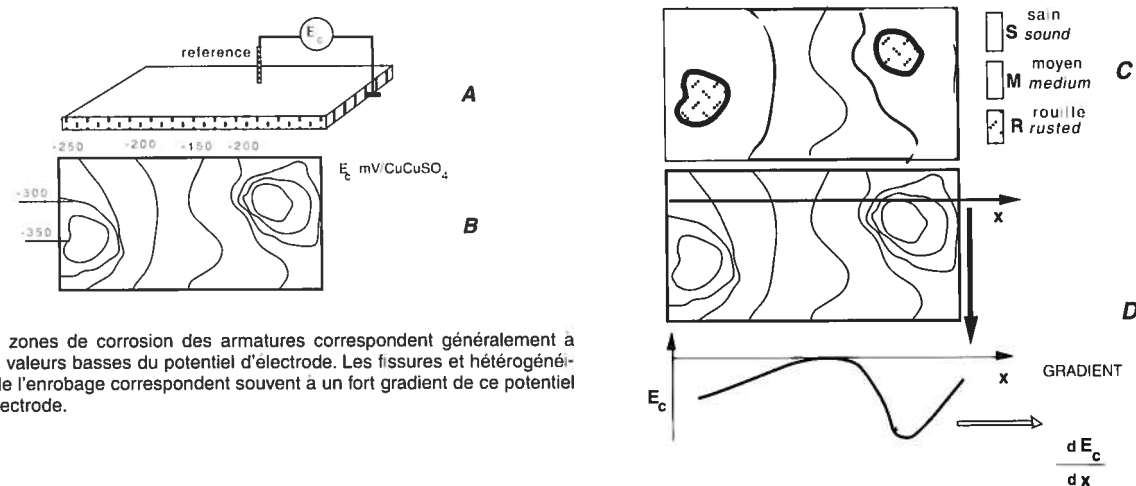
Les valeurs du potentiel d'électrode E_C sont relevées en fonction de la position du point de mesure. Une carte représentant la surface de l'ouvrage peut être tracée et les résultats peuvent y être portés et interprétés de l'une des façons suivantes :

- **Relevé simple** : Les valeurs de E_C sont indiquées, sur la carte, en fonction de la position du point de mesure
- **Courbes équipotentiellles** : Les lignes correspondant à des valeurs égales du potentiel d'électrode sont tracées sur la carte.
- **"Classes de potentiel E_C "** : Il s'agit d'une simplification de la carte utilisant les lignes "équipotentiellles" ; la surface de l'ouvrage est représentée par trois types de zones (dites "classes de potentiel"), qui correspondent à des probabilités ou à des "tendances" de corrosion des armatures. La correspondance entre les classes de potentiel E_C et l'état probable de corrosion est la suivante, pour un béton courant placé dans l'atmosphère :
 - classe S = $E_C \geq - 200$ mV (Cu - Cu SO₄ saturé) : Peu de risque de corrosion des aciers (passivation)
 - classe M = $- 350 \leq E_C < - 200$ mV_{ESC} : Probabilité moyenne de corrosion (enrouillement possible)
 - classe R = $E_C < - 350$ mV_{ESC} : Forte probabilité d'enrouillement des aciers. Les zones d'enrouillement des aciers correspondent ainsi à des potentiels E_C plutôt bas.

Le gradient de E_C indique s'il est assez élevé, une discontinuité dans l'enrobage en béton, due notamment à des fissures.

Bibliographie

1. *La Lettre Air Normand* n° 6, Spécial vingtième anniversaire, mai 1994.
2. *Précis de métallurgie*, J. Barralis - G. Maeder, Editions Nathan, sixième édition.
3. *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, Méthodes, analyse, interprétations*, B. Baroghel-Bouny, Laboratoire central des Ponts-et-Chaussées, 1994.
4. *La durabilité des bétons*, J. Baron, J.-P. Olivier, Presses de l'Ecole nationale des Ponts-et-Chaussées, 1992.
5. *Le béton hydraulique, Connaissance et pratique*, J. Baron, R. Sauterey. Presses de l'Ecole nationale des Ponts-et-Chaussées, 1982.
6. *Contre vents et marées, Plus d'un siècle de souvenirs des quartiers Perret-Saint-Joseph*, Rosalie Le Cozic.
7. *Saint-Joseph du Havre*, J. Pichard, M. Arnoux, Akila Edition.
8. *Cité - Le Havre, Mémoires vivantes 1944-1994*, juin 1994, n° 95.
9. *Cité - Le Havre, La folle aventure de la reconstruction*, septembre 1994, n° 97.



Les zones de corrosion des armatures correspondent généralement à des valeurs basses du potentiel d'électrode. Les fissures et hétérogénéité de l'enrobage correspondent souvent à un fort gradient de ce potentiel d'électrode.

Figure 1 : Détection des zones où les armatures sont rouillées par mesure de potentiel d'électrode.

Méthode de la macro-pile

Une autre méthode utilisant le fait que le potentiel d'électrode d'une armature corrodée diffère de celui d'un acier passivé, est la méthode dite de la "macro-pile". Deux morceaux identiques d'armatures sont insérés dans le béton à deux profondeurs différentes et laissés en place alors que la construction est en service. Si l'armature la plus proche du parement se dégrade, il apparaît une différence de potentiel entre elle et le morceau métallique placé en profondeur. Cette différence se détecte facilement si au moment de leur mise en place, les morceaux d'armatures sont reliés entre eux, par l'intermédiaire d'une résistance électrique (valant souvent 10 Ω). Cette méthode permet donc un diagnostic très ponctuel.

PRÉVISION DE L'AMORÇAGE DE LA CORROSION

Prévision utilisant la perméabilité du béton

La dégradation du béton est souvent due à la pénétration de fluides agressifs. Un moyen simple pour évaluer la résistance d'un béton à la pénétration des fluides est de mesurer sa perméabilité à l'air ou à l'eau.

La mesure de perméabilité à l'air (Réf. 2) d'un parement en béton permet de délimiter les endroits par où les corps agressifs pénètrent le plus facilement. Cet essai permet de calculer un paramètre T qui caractérise la perméabilité du béton d'enrobage.

Quantification de l'action des chlorures

Dans les cas simples, la concentration en chlorure dans le béton à une profondeur donnée peut se calculer assez facilement par une relation dite loi de Fick, où intervient la notion de diffusivité.

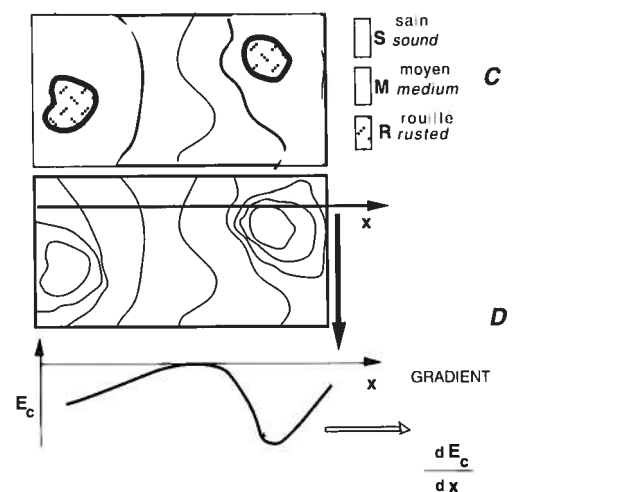


Figure 2 : Détermination de la diffusivité D des chlorures dans le béton à partir de mesure de teneur en chlorure à diverses profondeurs ("profil de chlorure").

Cette diffusivité D se détermine à partir de "profils" de chlorures (Fig. 2). Plus précisément, il s'agit de mesurer la teneur $[Cl^-]$ en ions chlorures dans un prélèvement de béton, à diverses profondeurs x, dans un ouvrage d'âge t. La courbe expérimentale $[Cl^-] = f(x)$ permet de calculer la diffusivité apparente D des chlorures dans le béton étudié, selon par exemple la relation (1) où $C(x,t)$ est la teneur $[Cl^-]$ et C_0 une constante :

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \quad (1)$$

La teneur en chlorure atteint ou dépasse la valeur dite critique si après dégradation, la couche de passivation ne peut plus se reformer. Cette teneur critique (en chlorures) est en principe égale à $[Cl^-]_{cr} = [OH^-]$. Cette valeur est pratiquement la même que celle que Hausmann a trouvé de façon empirique, à savoir $[Cl^-]_{cr} = 0,6 [OH^-]$. Si le béton est totalement carbonaté (pH = 9), le seuil $[Cl^-]_{cr}$ correspond à la teneur en chlorure dans la plupart des eaux naturelles. Dans ce cas la corrosion des armatures se produit même en l'absence de quantité notable de chlorures, ce qui est fréquemment observé.

Quantification de la carbonatation du béton

Le dioxyde de carbone (CO_2) pénètre à travers l'enrobage de béton suivant un processus de diffusion. La profondeur de carbonatation x_c du béton est déterminée à l'aide d'indicateurs colorés.

Si l'épaisseur x_c de la profondeur de carbonatation est mesurée à divers âges t, il est possible de déterminer la diffusivité D' de la carbonatation par la relation :

$$x_c = \sqrt{(D' t)} \quad (2)$$

Prévision combinant la perméabilité et la profondeur de carbonatation

L'utilisation combinée des méthodes qui viennent d'être citées permet une prévision améliorée de la durabilité des éléments en béton armé. Si l'enrobage de béton non carbonaté a une épaisseur supérieure ou égale à vingt millimètres et que la perméabilité du béton est élevée, les armatures ne risquent pas de se corroder. Au contraire, si l'enrobage non carbonaté a une épaisseur inférieure à dix millimètres et que le béton est assez perméable, le risque de corrosion des armatures est grand.

Prévision de l'amorçage de la corrosion

Les méthodes de prévision qui se fondent sur la perméabilité du béton (en tenant compte ou non de la carbonatation) ne donnent des résultats utilisables que si le béton est soit de très mauvaise qualité, soit très protecteur. Aussi, dans les cas courants, la prévision de la corrosion des armatures se fait par d'autres méthodes.

Si la diffusivité D' (du dioxyde de carbone) est connue par des mesures préalables, la relation (2) permet de calculer en fonction du temps l'effet de la carbonatation sur une armature donnée (à une profondeur donnée).

La connaissance des diffusivités D' (du dioxyde de carbone) et D (des chlorures) est importante pour prévoir l'extension des zones de corrosion. En effet, puisque les armatures commencent à se corroder lorsque la teneur $[Cl^-]$ atteint une valeur critique, qui est égale à $[OH^-]$, il suffit de connaître l'instant où cette teneur critique est atteinte au contact de l'acier, pour déterminer le début de la corrosion.

En d'autres termes, pour prévoir l'instant d'amorçage de la corrosion, il suffit de connaître les diffusivités D' du dioxyde de carbone et D des ions chlorures dans l'enrobage de béton, qui est supposé non fissuré (Fig. 3). Si cet enrobage est physiquement dégradé, par exemple par gel-dégel, cette prévision devient optimiste.

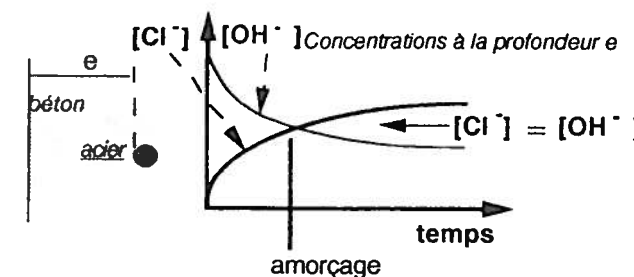


Figure 3 : Prévision de l'amorçage de la corrosion d'une armature connaissant les lois de pénétration (diffusivités) des ions chlorures et de la carbonatation

ESTIMATION DE LA VITESSE DE CORROSION

Lorsqu'une armature a commencé à se corroder, sa vitesse de corrosion (dite courant de corrosion) peut être évaluée de façon non destructive.

D'une façon générale, le courant de corrosion est déterminé en polarisant l'acier dans le béton, c'est-à-dire en plaçant près de celui-ci une contre-électrode métallique (Fig. 4). Ainsi, le potentiel de l'acier (mesuré par rapport à une électrode de référence, placée près de lui) se trouve modifié. Il augmente d'une quantité ΔE qui correspond à une densité de courant i (courant électrique à travers une aire unité du métal). Si ΔE est de l'ordre de 10 mV, la relation entre ΔE et i est "linéaire".

Si le courant est continu ce rapport est la "résistance de polarisation" R_p . Pour une impulsion, ce rapport est parfois appelé "résistance d'interface" R_2 . Ces grandeurs sont inversement proportionnelles à la vitesse de corrosion.

La mesure de la résistance de polarisation est maintenant assez répandue.

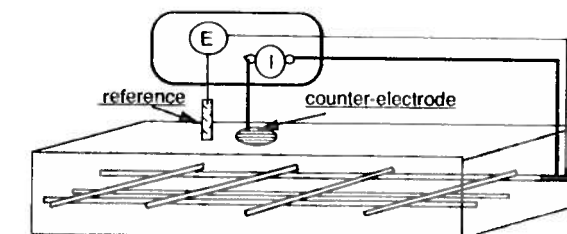


Fig. 4 : Schéma d'un essai de polarisation permettant d'évaluer la vitesse de corrosion des aciers dans le béton

Les méthodes transitoires sont plus récentes. Elles utilisent des impulsions ou des créneaux de courant. L'une d'elles dite du "saut de courant (SDC)" a été mise au point dans les laboratoires des Ponts-et-chaussées et permet de déterminer la résistance d'interface R_2 . Des expériences (Fig. 5) ont montré que cette méthode SDC donne les mêmes résultats (R_2) que la mesure de résistance de polarisation.

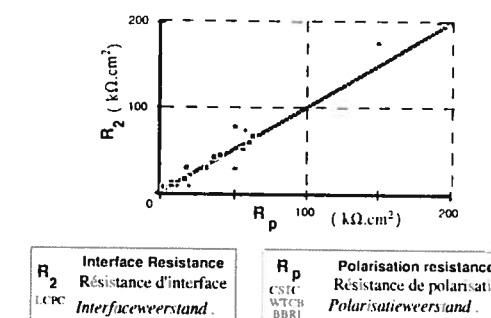


Figure 5 : Comparaison entre la résistance de polarisation et la résistance d'interface d'aciers dans des éprouvettes de béton carbonaté [3]

CONCLUSION

Avant toute réparation ou restauration d'une construction en béton armé, il convient de bien connaître son état de conservation.

Le diagnostic de l'état actuel d'un béton armé et la prévision de l'évolution de cet état peuvent actuellement se faire par des méthodes perfectionnées. Elles permettent

de localiser les zones à réparer donc d'optimiser le coût des réparations.

Gilbert GRIMALDI
Laboratoire régional de l'Est parisien

André RAHARINAIVO
Laboratoire central des Ponts-et-chaussées

Bibliographie

1. Grimaldi G., Brevet P., Pannier G., Raharinaivo A., *Factors influencing the electrode potential of steel in concrete*. British Corrosion Journal 1986, vol. 21, n° 1, pp. 55-62.
2. Bérissi R., Bonnet G., Grimaldi G., *Mesure de la porosité ouverte des bétons hydrauliques* Proceeding First Intern. Congress "From materials science to construction materials engineering" RILEM, Paris, septembre 1987, pp. 119-122.
3. Raharinaivo A., Grimaldi G., Pollet V., *Détermination de la vitesse de corrosion des aciers dans le béton*. "Comportement des ouvrages en service" COS'96. 14^e Rencontres universitaires de génie civil, Clermont-Ferrand 9-10 mai 1996, pp. 159-166.

DÉBAT

Alain Bouineau

J'ai été surpris par l'analyse de Madame Marie-Victoire qui ne parle pas de la détection des emplacements de prélèvements qui se fait en amont. En 1970, à l'église du Raincy, pour l'architecte en chef Donzet, on avait commencé par une grande auscultation dynamique afin de définir un peu la cartographie de la qualité des bétons; c'est en fonction de cette cartographie que l'on a choisi les prélèvements car elle permet d'avoir une idée à peu près sûre de la qualité de l'ensemble des matériaux.

De même pendant les années quatre-vingt, pour l'église Saint-Joseph, nous avons commencé par faire de l'auscultation dynamique; actuellement on le fait d'une façon systématique, on ne commence jamais un chantier de diagnostic sans avoir une idée de la cartographie de la qualité des matériaux. Ainsi, on peut faire de la radiographie, du radar, etc. Il existe donc toute une série d'essais non destructeurs que je n'ai malheureusement pas vus dans vos documents. Peut-être est-ce un oubli et cela sera-t-il complété. En revanche, j'ai vu un appareil de type scléromètre que je connais très bien puisque j'ai participé à la définition de la norme qui a débouché sur cet essai; malheureusement il ne permet d'évaluer que la qualité du béton de peau et non le béton en profondeur.

Par goût de la provocation, je rappellerai les propos d'un ancien et éminent directeur, monsieur Lhermitte: "Faisons un mauvais béton et un bon enduit par-dessus, grâce à l'essai au scléromètre on aura un très bon béton"!

Elisabeth Marie-Victoire

C'est en général une question de temps mais il y a effectivement eu des essais préalables avant de sélectionner les zones d'essai. J'ai évoqué cette question à propos de la localisation vis-à-vis de l'orientation Est/Ouest au rez-de-chaussée et au premier étage. Il y a eu bien sûr des essais préalables à la sélection de ces zones d'essai; il est en effet utile de minimiser les prélèvements et de sélectionner correctement les zones d'essai.

Par quel moyen? Eh bien on a parlé de la localisation des armatures, de leur degré d'altération et également des mesures au scléromètre ce sur quoi nous sommes d'accord, monsieur Bouineau et moi.

Cependant, les essais au radar dont il a été question constituent une méthode très coûteuse, certainement très intéressante mais néanmoins très coûteuse; en fait, des mesures au pachomètre peuvent donner des résultats au moins aussi bons et nettement moins coûteux.

Alain Bouineau

Il ne s'agit pas de faire des comparaisons, si vous avez besoin de connaître le positionnement des aciers au cœur d'un poteau ce ne sont malheureusement pas des essais au pachomètre qui vous y aideront; le pachomètre peut donner l'information sur une épaisseur maximale de cinq centimètres... Il s'agit de citer d'autres méthodes comme le radar ou la radiographie; celle-ci est couramment utilisée.

Elisabeth Marie-Victoire

En fait, si vous avez plusieurs lits d'armature, si vous voulez avoir vraiment une détection en profondeur, une

localisation en profondeur de vos armatures, si vous avez beaucoup de lits d'armature, l'analyse et l'interprétation des mesures radar sont extrêmement ardues; on risque de ne pas savoir interpréter correctement tous ces résultats c'est pourquoi je considère le pachomètre comme un outil intéressant, au demeurant bien moins coûteux et qui donne des résultats très simples.

Pierre Jaugey

Il s'agissait en fait de fabriquer des méthodes pour dresser un état de la santé d'ouvrages qui n'étaient pas forcément en péril; il ne s'agissait pas là d'un ouvrage bien connu situé au bord de l'océan atlantique et qui pose un gros problème, mais simplement de la vérification, en partant de simples méthodes d'observation jusqu'à des méthodes de plus en plus complexes, de l'état de santé; en l'occurrence on arrête les essais lorsqu'on est sûr, comme ce fut le cas au Havre, qu'il n'y pas de dégâts importants... comme en médecine où l'on commence par le stéthoscope avant d'explorer au moyen de l'imagerie médicale de type RMN. C'était bien l'esprit de ce travail, il ne s'agit pas au Havre d'un ouvrage considéré en péril...

Alain Bouineau

Je rappelle que l'auscultation dynamique existe au moins depuis cinquante ans; elle est utilisée et peu coûteuse maintenant. C'est un outil dont – selon moi – on ne peut plus se passer; c'est impensable, quelle que soit l'auscultation, qu'on ne démarre pas par l'identification ou une cartographie des matériaux. Quelle réponse allez-vous faire tout à l'heure lorsqu'un autre auditeur, le bureau d'études, va vous demander pour calculer d'avoir une idée de la résistance en compression de différents modules, de lui donner la cartographie dans certaines zones des nœuds de poutre, poteaux, etc.?

Pierre Jaugey

C'est en effet lorsqu'on en est là de la réflexion que l'on dit que l'on va vers des méthodes plus poussées. Elisabeth Marie-Victoire avait cité ces méthodes parmi d'autres car effectivement elles figurent dans le diagnostic mais peut-être pas à la phase initiale, c'est-à-dire lorsqu'on n'est même pas sûr qu'il y ait lieu de faire ce type d'investigation. C'est en ce sens que l'on peut dire qu'il faut aller du plus simple au plus compliqué.

Isabelle Pallot-Frossard

Finalement, l'église Saint-Joseph du Havre est-elle en mauvais état ou non?

Un intervenant

Son état est satisfaisant mais il faudra apporter un petit peu de soins aux armatures car il y a tout de même une gangrène qui s'est installée et une carbonatation qu'il faut surveiller; le patient est encore sain mais il nécessite tout de même un suivi: il commence à avoir l'âge de ses artères!

Jocelyne Devedjian

La qualité et la clarté de ces interventions m'ont démontré et prouvé que le béton était une matière vivante. Ceci est intéressant car on a trop souvent l'image d'une matière froide et inerte alors qu'elle est dotée d'une cer-

taine intelligence puisqu'elle est également capable de réagir et de s'auto-protéger.

En ce qui concerne la protection du patrimoine, et puisque l'on est capable apparemment de faire des diagnostics très en amont, avant même que des pathologies n'arrivent à la surface, peut-on imaginer – à moins que cela n'existe déjà – des contrôles techniques plus ou moins réguliers des bâtiments que l'on estimerait "à risque" étant donné leur époque de construction, les techniques mises en œuvre alors, les matériaux utilisés et les normes de l'époque, qui ne sont plus nécessairement en vigueur aujourd'hui ?

Un intervenant

En ce qui concerne les ponts, ce contrôle se fait régulièrement avec une périodicité de cinq ans ou tout au moins une certaine périodicité. Pour ce qui est des monuments divers, du type bâtiments, il n'y a pas de règle, c'est au bon vouloir des responsables.

Isabelle Pallot-Frossard

Il y a un corps fortement représenté ici, le corps des architectes des bâtiments de France qui sont là pour surveiller l'état de nos monuments et alerter les pouvoirs publics lorsque des altérations apparaissent.

La question est de savoir ce qu'on peut mettre à leur disposition pour effectuer ce contrôle de façon correcte, quels sont les conseils à leur donner quant aux observations et, éventuellement, quant aux cartographies à faire. C'est une question ouverte : quelles méthodes peut-on mettre à leur disposition qui soient simples, peu coûteuses et faciles à mettre en œuvre pour pouvoir effectuer réellement ce contrôle. Il doit être fait sur un monument ancien, ou plus ou moins récent, mais en tout cas sur un monument historique ; sur un pont les problèmes de sécurité ne sont peut-être pas tout à fait les mêmes mais la règle reste la même.

Un intervenant

Certaines des méthodes exposées sont très intéressantes notamment celles du laboratoire central qui permettent de déterminer la santé d'une armature au voisinage du parement, car c'est cela qui souffre d'abord.

Mais ces méthodes sont très récentes et appliquées depuis peu d'années c'est-à-dire pas encore systématiquement ; moi qui ait vécu dans l'entreprise, j'ai toujours constaté que l'on intervient sur les ouvrages quand on voit des fissures, que celles-ci deviennent visibles ; c'est très malheureux et il faut espérer qu'à l'avenir il y aura des contrôles systématiques par exemple tous les cinq ans avec des méthodes raffinées comme celles qui ont été exposées et qui consistent, même si le parement est sain, à vérifier les parties intelligemment choisies peut-être pas par une auscultation exhaustive mais parce qu'elles sont les plus vulnérables. Ces sondages devraient être systématiquement faits avec ces méthodes, malheureusement ce genre de contrôle est coûteux.

Cela se fait beaucoup sur les barrages : Électricité de France a un service de contrôle permanent des barrages. Cela pourrait être généralisé aux autres bâtiments d'autant plus que maintenant on est mieux armé.

Bernard Quénée

En ce qui concerne le choix des méthodes, celles qui seront toujours adaptées à la problématique et à l'environnement, il est certain qu'en bordure maritime par exemple on privilégiera immédiatement la mesure des chlorures ou des sulfates qui seront les premiers indicateurs ; par contre, dans d'autres cas on verra que le phénomène prépondérant sera un problème d'armature oxydée, on regardera alors immédiatement la santé des fers ; dans d'autres cas encore on vérifiera plutôt la résistance c'est-à-dire que le programme sera toujours adapté au coup par coup et qu'il ne sera jamais exhaustif comme celui qu'on a fait ici qui était plutôt une démonstration : c'était une manière de dresser une carte d'identité.

Quoiqu'il en soit, il ne faut pas systématiquement faire cette avalanche d'essais. Tout l'art est là, il faut choisir et adapter les méthodes. Ce peut être un coup de radar, ce peut être un coup du potentiel d'électrodes... C'est une affaire de choix en amont et de concertation.

Isabelle Pallot-Frossard

Mais est-ce que des essais simples du type profondeur de carbonatation, test à la phénolphthaléine, sont des tests assez simples qui peuvent être faits en premier diagnostic ou cela paraît-il absurde ?

Un intervenant

C'est très simple, ce n'est pas absurde du tout ; cependant, comme c'est un test simple il a aussi des limites qui sont en fait celles de la méthode et de sa validité ; cela n'exclura donc jamais un examen un peu plus approfondi...

Christian Pierrot

On a parlé de Saint-Joseph, mais pourrait-on rapidement avoir un survol de l'état des bétons anciens sur les autres édifices qu'on a étudiés ?

Est-ce qu'ils se comportent bien ou est-ce qu'il y a de grosses altérations ?

Elisabeth Marie Victoire

C'est très variable, c'est-à-dire qu'on a de tout : on a des bétons qui sont très bien conservés et d'autres qui sont à l'état de ruines. Il y a au total environ cent cinquante édifices en béton ou béton armé classés monuments historiques et ça va du très bon état de conservation à la ruine...

Un intervenant

On a vu en effet les photographies des ouvrages remarquables d'Ariel de la Noue à Saint-Brieuc ; malheureusement, ces ouvrages tout à fait curieux, sont très dégradés.

Jean-Michel Perignon

Peut-on savoir si les profondeurs de carbonatation sont à peu près uniformes sur des immeubles d'habitation par exemple, l'édifice standard, ou peut-on, à partir d'un carottage à un niveau, se dire : "Ce sera à peu près la même chose en haut" ? Ou bien faut-il vraiment faire de nombreux sondages ?

Hugues Hornain

La carbonatation va un peu dépendre de l'environnement local du bâtiment – c'est vrai qu'on peut avoir des profondeurs de carbonatation sur un même ouvrage très variables en fonction de l'exposition, mais il n'est effectivement pas nécessaire d'asperger tout l'ouvrage de phénolphthaléine !

En réalité et tout simplement, des prélèvements ponctuels permettent de répondre à cette question.

Durabilité des structures en béton : Prise en compte du matériau dans les calculs mécaniques

Les structures en béton sont dimensionnées pour reprendre des sollicitations d'ordre mécanique. Cependant, la matrice cimentaire subit au cours de son histoire différents types d'altération qui ont essentiellement deux origines : physique et chimique. La pâte de ciment durcie est un matériau en perpétuelle évolution et au caractère visqueux très marqué. L'application de charges sur une structure en béton, qu'elles soient des surcharges de service ou permanentes, activent les phénomènes de fluage qu'il faut donc prendre en compte. Les agressions environnementales, qui se traduisent par des réactions chimiques endogènes ou exogènes, modifient les propriétés mécaniques du matériau et donc sa réponse mécanique.

Afin d'évaluer de manière correcte la réponse d'une structure soumise à une sollicitation mécanique, il faut considérer le matériau actuel, c'est-à-dire au moment de l'application de la charge et non pas le matériau de départ. C'est une approche complexe qui oblige le concepteur à travailler avec des modèles de comportements non linéaires relativement sophistiqués. Cependant, la réponse fournie est beaucoup plus fiable que celle obtenue en utilisant les règlements de construction.

Ces modèles mécaniques peuvent être utilisés dans le cas d'ouvrages neufs, si l'on souhaite optimiser les techniques de construction en prenant en compte les effets du béton aux jeunes âges. Ils peuvent être également utilisés dans le cas de la réévaluation d'ouvrages existants. On peut par exemple calculer les charges résiduelles pouvant être appliquées sur une structure fissurée (cas des séismes) ou sur des structures dégradées par des réactions chimiques.

Nous avons développé plusieurs modèles de comportement qui prennent en compte les différents aspects du vieillissement de la matrice cimentaire. Plusieurs cas d'agressions ont été étudiés. Il s'agit de la réaction alcali-granulat, la corrosion des armatures, les effets du jeune âge (retrait, fluage et effets thermiques) et les couplages hydrauliques mécaniques.

Jean-Pierre BOURNAZEL
Département Génie civil
Ecole normale supérieure de Cachan

Restauration du béton armé dégradé

BESOINS DE RÉHABILITATION DU MATÉRIAU

Dans un ouvrage en béton armé, les armatures se corrodent parfois sous l'effet d'une quantité significative d'ions chlorures ou d'une carbonatation. Si cette corrosion s'étend à des parties sensibles, cet ouvrage peut se trouver en danger.

Le matériau béton armé peut alors être sauvegardé. La méthode classique consiste en des réparations telles que les ragréages qui sont parfois associés à la mise en place de revêtements de protection ou à une imprégnation.

Une autre approche qui est plus récente, consiste à agir sur les causes de la corrosion des armatures. Comme cette dégradation est de type électrochimique, les moyens de réhabilitation le sont aussi.

Parmi ces méthodes ce sont celles qui sont les mieux adaptées au cas des monuments historiques qui seront détaillées plus loin.

MÉTHODES CLASSIQUES

Les défauts du béton sont de diverses natures. Il s'agit, par exemple, d'éclatement ou d'épaufrure du béton, d'armatures visibles et plus ou moins corrodées ou de fissures. Ces défauts sont réparés après une évaluation du fonctionnement mécanique de la construction. Dans les cas les plus simples, des produits sont appliqués à la surface du béton ou injectés dans les fissures.

Pour aider les prescripteurs, et plus précisément les maîtres d'œuvre de travaux de génie civil, le Laboratoire central des Ponts-et-chaussées (L.C.P.C.) et le Service d'études techniques des routes et autoroutes (S.E.T.R.A.) ont réalisé en concertation avec les producteurs de matériaux formulés un guide technique intitulé : *Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton.*

SOMMAIRE
INTRODUCTION
1. PROBLÉMATIQUE - Le choix des produits dans un projet de réparation
2. CHOIX DES PRODUITS - Nomenclature des défauts des ouvrages en béton et solutions proposées
3. APPLICATION ET MISE EN ŒUVRE DES PRODUITS
4. FAMILLES DE PRODUITS UTILISÉS
5. GLOSSAIRE - SIGLES - NORMES - DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

Tableau 1 :
Sommaire du Guide technique "Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton"

Si la cible visée explicitement dans ce document est bien le traitement des ouvrages de génie civil, c'est-à-dire les ponts et viaducs, les barrages, les tunnels, etc. le domaine du bâtiment était présent dans les préoccupations générales des rédacteurs et s'inscrit en filigrane dans le texte (Tableau 1). À ce titre, les monuments historiques s'y retrouvent en première ligne.

L'objectif du guide étant de présenter l'état de l'art dans le domaine de la réhabilitation, il nous a semblé intéressant d'en présenter quelques extraits pour illustrer les "méthodes classiques" utilisées pour la restauration du béton armé dégradé.

La première opération consiste à préciser les objectifs à atteindre.

Sur un ouvrage qui présente des anomalies, une fois le diagnostic terminé, il devient nécessaire de définir les objectifs à atteindre pour permettre à l'ouvrage de remplir sa fonction dans des conditions de sécurité et de durabilité souhaitées. Pour cela il est commode de distinguer deux types de pathologie suivant qu'il s'agit d'un problème de matériau ou d'un problème de fonctionnement.

Dans la première hypothèse, il faut encore distinguer s'il s'agit de béton non armé (ou très faiblement armé), de béton armé ou de béton précontraint car le traitement que l'on va choisir dépend très directement du fonctionnement attendu du matériau.

Le matériau "béton armé" se dégrade, comme nous l'avons indiqué plus haut, par une corrosion des armatures, éventuellement accélérée par la présence d'ions chlorures, et par une carbonatation superficielle qui peut s'étendre à l'intérieur de l'ouvrage. La réparation vise alors à ralentir ou à stopper la corrosion et à redonner une protection aux aciers. Il peut être même nécessaire de sceller ou coller des aciers de renfort quand des diminutions de section d'acier affectent la résistance mécanique de la structure.

Une fois les objectifs définis et bien cernés, un ou plusieurs projets de réparation peuvent être proposés. Se pose alors le problème du choix des produits.

Pour cela le guide propose deux approches complémentaires :

– La première consiste à partir des défauts de l'ouvrage et à mettre en regard les solutions proposées (tableau 2) ;

c'est l'objet du chapitre 2 ; cette étude est complétée par le chapitre 3 qui traite des problèmes d'application des produits ;

– la seconde est une approche "produits" destinée à aider les différents partenaires à s'entendre sur un langage commun ; ce petit cours de chimie appliquée à l'usage des non-chimistes, est repris sous forme de glossaire dans le dernier chapitre qui comporte en outre une importante bibliographie sur les textes réglementaires et normatifs en vigueur à la date de publication du document.

Pour ce qui est du béton armé dégradé, quelles "méthodes classiques" ressortent de cet ensemble ? La corrosion des armatures a besoin d'eau pour que les échanges oxydo-réducteurs se produisent, du moins dans un délai de quelques années. S'il est possible d'arrêter l'arrivée et la circulation de l'eau à l'aide d'un produit à base de clinker (constituant principal des ciments classiques), on s'assure en même temps que le milieu environnant restera passivant en cas de nouvelle agression de l'eau. C'est l'avantage des produits de type LHA ou LHM, c'est-à-dire à base de liants hydrauliques. Mais leur adhérence au support pose quelquefois des problèmes. Il devient alors plus intéressant de faire appel à des produits à base de résines synthétiques (époxydes, polyuréthanes, acryliques,...) qui n'ont pas de pouvoir passivant mais peuvent, s'ils sont bien appliqués constituer une excellente barrière. On préconise souvent l'application d'un produit passivant avant celle de la résine.

La question du choix reste toujours ouverte mais celle de l'application ne doit pas être minimisée : Choisir le meilleur produit c'est bien, mais s'il est mal appliqué le résultat est pire que tout.

DEFAULT	TRAITEMENT	PRODUITS UTILISABLES
Trous dans le béton avec armature apparente (défaut de bétonnage).	Traitement de l'armature et bouchage des trous.	<ul style="list-style-type: none"> • Mortier LHM mono ou bicomposant de préférence sur couche d'accrochage EP ou sur gobetis ou sur barbotine. • Mortier EP ou PUR sur couche d'accrochage EP ou PUR (milieu sec).
Eclatement du béton avec armature apparente non corrodée.	Reconstitution du béton avec son épaisseur minimale d'enrobage.	<ul style="list-style-type: none"> • Mortier LHM mono ou bicomposant de préférence sur couche d'accrochage EP ou sur gobetis ou sur barbotine. • Mortier EP ou PUR sur couche d'accrochage EP ou PUR sur produit passivant (milieu sec)*. <p>* L'utilisation d'un produit passivant est : – conseillé lorsque le gobetis ou la barbotine ne contient pas d'agent passivant ; – nécessaire dans le cas où la couche d'accrochage est constituée par un liant époxyde ou polyuréthane ; cependant cette précaution peut s'avérer inutile si l'épaisseur de résine est suffisante.</p>

Tableau 2 : Choix des produits - Exemples de cas

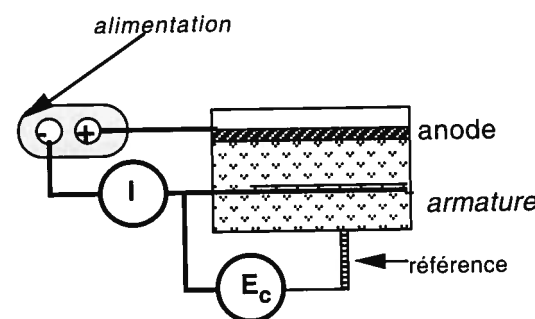


Figure 1 - Principe de la polarisation des armatures dans le béton pour une réhabilitation électrochimique

LES MÉTHODES NOUVELLES DE RÉHABILITATION

Principe des méthodes nouvelles

Les nouvelles méthodes de réhabilitation du béton armé sont soit des introductions de ralentisseurs (dits inhibiteurs) de corrosion, soit de type électrochimique. Les ralentisseurs de corrosion sont des liquides introduits par imprégnation du parement.

Les méthodes de type électrochimique utilisent le montage de la fig. 1. La taille (capacité) de l'alimentation électrique dépend à la fois de la quantité d'armatures sous l'enrobage à traiter et du type de traitement. Les armatures dans le béton sont reliées à la borne "négative" d'une alimentation en courant continu. La borne "positive" est reliée à un élément métallique, appelé anode et plaqué à la surface du béton.

Toutes ces méthodes supposent que les armatures sont en continuité électrique et qu'il n'existe aucun écran isolant (chape d'étanchéité, revêtement) ou métallique (gaine, etc.) entre l'armature et le parement du béton. Mais les différentes méthodes se distinguent tant par la valeur du courant électrique passant entre l'anode et l'armature que par le type d'anode et son entourage immédiat.

En fait, la différence principale entre ces méthodes vient des effets que produisent ces polarisations et qui sont de nature totalement différente.

L'extraction des chlorures du béton

Principe d'action

La polarisation électrique appliquée est assez forte pour que des ions dissous dans la solution interstitielle du béton, puissent se déplacer (migration). Les anions, chargés négativement, vont de l'armature vers l'anode. Mais cette migration se fait simultanément avec des réactions qui se produisent au contact des éléments métalliques (armature, anode) ou dans le béton lui-même (les ions se fixent sur les parois des pores du ciment).

Le but de cette polarisation est de déplacer les ions (négatifs) chlorures depuis l'armature, vers la surface du béton, où est plaquée l'anode.

Installation et mise en œuvre

L'anode est placée dans une pâte facilement détachable, à la surface du béton. Cette pâte contient une solution qui facilite la migration des chlorures. Les natures exactes de cette pâte et de cette solution sont choisies et définies par les applicateurs.

Le courant induit par la polarisation est de l'ordre de quelques ampères par mètre carré d'armature (A/m^2). La durée du traitement est de quelques semaines. Il est nécessaire de maintenir humide la pâte qui entoure l'anode.

Résultats et suivi

Le traitement réduit la teneur en chlorures dans le béton. La figure 2 schématise les profils en chlorures avant et après ce traitement d'extraction. Globalement, la moitié des chlorures (dissous) dans le béton est extrait, mais cette extraction est beaucoup plus efficace près du parement qu'au cœur du béton.

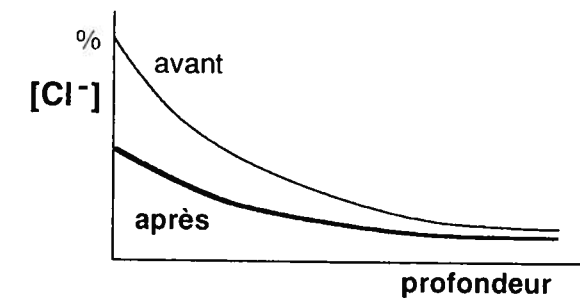


Figure 2 : Profils de concentration en chlorure avant et après traitement d'extraction

Ce traitement peut entraîner des conséquences non désirables, s'il est appliqué trop brutalement. Tout d'abord, la porosité du béton peut être augmentée, ce qui le rend plus susceptible à la pénétration des agents agressifs. Ensuite, si les agrégats sont "réactifs", ce traitement peut provoquer une alcali-réaction. Enfin, si la solution utilisée autour de l'anode est mal choisie, elle peut re-suer et changer la couleur du béton.

À cause de ces risques, le traitement d'extraction des chlorures est, de préférence, limité dans le temps, mais il est à répéter plusieurs fois dans la vie de l'ouvrage. Entre chaque traitement, une imprégnation est appliquée pour limiter la porosité du béton.

La réalcalinisation du béton

Principe d'action

Le but du traitement est de redonner au béton carbonaté, la valeur du pH qu'il a à l'état sain. La polarisation est assez forte pour provoquer autour de l'armature une réaction qui augmente nettement le pH du béton. Parallèlement, cette polarisation permet à une solution qui au départ entoure l'anode, de traverser le parement du béton et d'augmenter légèrement le pH du béton à cet endroit. Ainsi, deux zones du béton sont réalcalinisées, l'une est autour des armatures, alors que l'autre est près du parement. Si l'enrobage est mince, ces deux zones se rejoignent.

Installation et mise en œuvre

L'anode est placée dans une pâte facilement détachable, à la surface du béton. Cette pâte contient une solution qui permet d'augmenter le pH du béton près du parement. La densité de courant utile pour ce traitement est beaucoup plus faible que dans le cas précédent, puisqu'il est de l'ordre de $0,1 A/m^2$.

La durée du traitement est de plusieurs jours, pendant lesquels la pâte autour de l'anode est maintenue humide.

Résultats et suivi

La Fig. 3 schématise les résultats d'un traitement de réalcalinisation. La zone qui est réalcalinisée autour de l'armature a une taille ("rayon") de l'ordre du centimètre. Celle qui est derrière le parement est du même ordre de grandeur. Mais ces dimensions dépendent fortement des caractéristiques du béton, notamment de sa porosité.

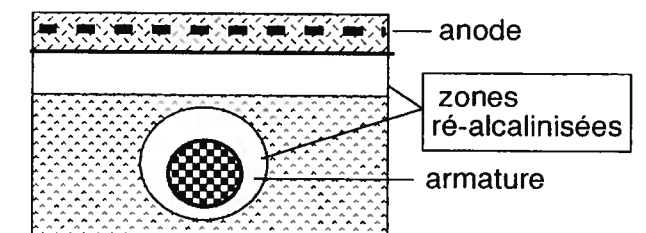


Figure 3 : Zones où le béton est réalcalinisé après traitement.

S'il est mal conduit, ce traitement peut entraîner des conséquences non désirables, analogues au cas précédent. Il s'agit d'une augmentation de porosité, d'alcali-réaction ou de coulure sur le béton.

À cause de ces risques, le traitement de réalcalinisation est, de préférence, limité et répété plusieurs fois dans la vie de l'ouvrage. Une imprégnation ou un revêtement peuvent être appliqués pour limiter la porosité du béton. Mais il convient de remarquer que si ces produits sont isolants électriques, un traitement ultérieur de réalcalinisation sera difficile à mettre en œuvre.

La protection cathodique

Principe d'action

Le but de la protection cathodique est de permettre la formation d'une couche passivante autour de l'armature, sans modifier de façon notable les propriétés du béton d'enrobage. La demande en courant électrique est donc

beaucoup plus faible que pour les traitements précédents d'extraction des chlorures ou de réalcalinisation.

Il s'agit donc d'une protection durable et non pas d'un traitement temporaire. De plus, les propriétés du béton, telles que sa porosité sont laissées dans leur état avant protection.

Installation et mise en œuvre

La protection cathodique des aciers dans des bétons aériens fait maintenant l'objet de normes auxquelles il faudrait se référer pour avoir des détails. Le courant nécessaire à la protection cathodique est beaucoup plus faible que dans les cas précédents. La densité de courant à imposer varie de 0,01 à 0,05 A/m², selon que le béton est plus ou moins sec.

Les anodes peuvent être :

- des revêtements conducteurs (peinture conductrice, métallisation du béton à l'aide de zinc, etc.) mis sur le parement de béton,
- ou des treillis (tôle déployée) de titane traité (dit "actif"), maintenus sur le béton par des fixations isolantes ensuite recouvertes de béton afin d'uniformiser l'aspect du parement de l'ouvrage.

Il convient de noter que même si une protection cathodique peut être enlevée en cas de besoin, son installation

modifie assez nettement et durablement le monument historique. C'est pourquoi, son utilisation doit se faire avec précaution.

Imprégnation par des ralentisseurs de corrosion

Il existe actuellement des produits qui peuvent ralentir la corrosion des armatures. Ces produits sont des liquides appliqués sur le béton qui peuvent y pénétrer jusqu'aux aciers. L'intérêt de ces produits est d'avoir peu d'impact sur l'aspect du béton. Mais leur emploi nécessite un examen judicieux de l'état du béton, des armatures et du milieu environnant.

CONCLUSION

Les méthodes de réparation ou de restauration du béton sont maintenant nombreuses. Elles sont plus ou moins répandues. Elles doivent être choisies avec soin et leur efficacité dépend non seulement de l'étude qui précède ce choix, mais aussi de la qualité de leur mise en œuvre.

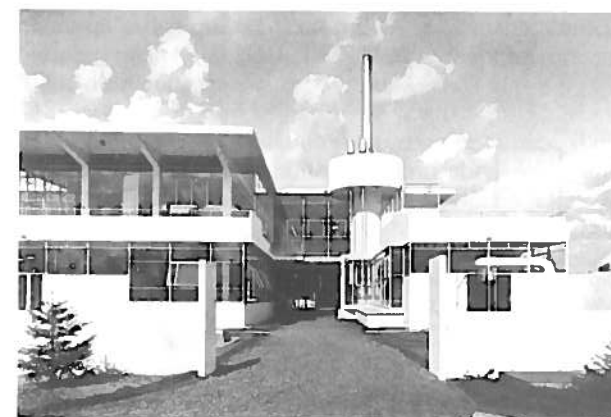
Yves MOUTON

André RAHARINAIVO

Laboratoire central des Ponts-et-chaussées

Restauration du béton et authenticité des matériaux **Quelques exemples européens**

Au cours de la révolution industrielle, les cahiers des charges de la construction d'édifices sont devenus plus spécifiques, à l'instar des bâtiments eux-mêmes. Pourtant, les lois de la nature imposent à toute spécificité son pendant : une durée de vie réduite, comme c'est le cas pour les logiciels informatiques. Ainsi, la transformation de la nature des cahiers des charges s'accompagne-t-elle alors d'une modification des périodes d'utilisation. L'introduction de matériaux et de types de construction nouveaux constitue une autre influence majeure. Les techniques de restauration applicables aux bâtiments de l'ère industrielle sont par conséquent différentes de celles convenant aux édifices plus anciens. Entre les deux guerres mondiales, ces développements engendrent les travaux novateurs et les idées révolutionnaires de l'avant-garde. Vers 1920, un lien direct est établi entre les impératifs d'utilisation, de conception et de durée de vie des bâtiments. En pratique, la mise en œuvre de ces idées donne naissance à l'architecture propre au mouvement moderne. Certains de ces architectes, comme le Néerlandais Jan Duiker (1890-1935), appréhendent les bâtiments en tant qu'éléments utilitaires, dont la longévité est intrinsèquement limitée, n'étant parfois que de simples "denrées périssables". Le sanatorium Zonnestraal de Hilversum (1926-1928) en est un célèbre exemple.



*Le bâtiment principal du sanatorium Zonnestraal de Hilversum, en 1928. Jan Duiker, architecte.
Ph. Docomomo International.*

Le mouvement moderne dévoile littéralement les bâtiments en introduisant une structure à poutres. Les réalisations de Duiker ont pour spécificité l'élimination des éléments décoratifs. La façade du sanatorium

Zonnestraal n'est qu'une membrane d'acier et de verre. L'idée de la préfabrication, qui permet le remplacement de sections détériorées sans dommages pour les autres parties, est liée à celle des diverses durées de vie. Les panneaux préfabriqués en béton du sanatorium sont probablement la toute première application aux Pays-Bas. L'œuvre de Duiker ne se distingue pas par des constructions convenablement détaillées et n'est que rarement conforme aux normes actuelles. On a souvent considéré qu'il s'agissait là d'une ignorance professionnelle de la part du concepteur. Néanmoins, les études montrent que ces concepteurs étaient dans l'ensemble tout à fait conscients de ce qu'ils faisaient. Il semble que d'autres motifs, tels que l'acceptation d'une durée de vie limitée, soient à prendre en ligne de compte. La question de l'aspect transitoire de l'architecture du mouvement moderne doit donc parfois être considérée comme procédant pour une grande partie de l'approche du concepteur, ce qui doit avoir d'importantes répercussions sur le mode de restauration de tels bâtiments.

Les architectes d'avant-garde tendent à construire le plus légèrement possible, avec un minimum de matériaux. Les dimensions des poutres en béton de Zonnestraal suivent le schéma du moment. À une époque où la main-d'œuvre était bon marché, l'abondance de la menuiserie de coffrage la rendait peu onéreuse. Duiker appelle "économie spirituelle" cette recherche de la construction optimale, dont il écrit, en 1932 qu'elle "...tend à l'immatériel, au spirituel". En termes de restauration, le fait que de nombreux concepteurs se soient livrés à des expériences sur les matériaux et les constructions pose un problème. À la lumière des connaissances actuelles, il est évident que certaines notions leurs faisaient défaut. Toutefois, sur le plan conceptuel, notre ignorance sur les connaissances et sur ce que cela impliquait constitue un problème plus ardu. Comment évaluer le bien-fondé historique d'un type d'intervention sans ce genre d'informations ?

La valeur d'un bâtiment historique doit être envisagée comme ayant une signification dépassant sa simple apparence. La possibilité de comprendre l'approche conceptuelle d'origine à partir d'un bâtiment restauré est primordiale. Quel traitement doit-on réserver à des édifices dans lesquels les constructions elles-mêmes représentent la majeure partie de l'approche conceptuelle d'origine ? Le caractère transitoire ne doit pas être couvert par une technologie avancée visant à l'éternité et laissant derrière elle un témoignage artificiel. Les étudiants et futurs architectes doivent être à même de percevoir les concepts du fonctionnalisme après la restauration de Zonnestraal.

Zonnestraal

La structure en béton des pavillons du sanatorium, en harmonie avec l'affectation du bâtiment, illustre clairement l'approche conceptuelle de l'architecte. Cette structure est conçue pour une extrême légèreté. Pour remplir le coffrage étroit et complexe, le béton est dilué ce qui le rend plus fluide. Le rapport eau-ciment élevé, ainsi que la composition hétérogène du béton, se traduisent par une résistance à la compression extrêmement basse. La très grande porosité du béton a induit une carbonatation du matériau. Un pavillon très dégradé fut abandonné en 1982 ; les deux autres du complexe, en meilleur état, le furent seulement en 1993.

Authenticité : idée ou matériau ?

Si l'objectif est la préservation des idées architecturales, le pavillon détérioré peut être démolé et reconstruit à l'identique à l'aide des techniques de pointe contemporaines. L'apparence d'une telle réplique serait totalement conforme à l'original et refléterait l'approche conceptuelle première qu'il nous appartient de comprendre. Cependant, selon la Charte de Venise et la Convention sur le patrimoine mondial, l'authenticité des matériaux est l'élément primordial. Le ministère de la Culture néerlandais envisage de proposer l'inscription de Zonnestraal sur la liste du patrimoine mondial mais, si nous approuvons cette option, pratiquement tous les matériaux seront remplacés.

Une autre option consisterait à réparer et renforcer la structure au moyen de techniques modernes, solution beaucoup plus onéreuse mais qui garantirait mieux l'authenticité des matériaux. Il faudrait toutefois accepter des modifications importantes et visibles du bâtiment, telle qu'une augmentation des cotes des poutres et colonnes. Que devient alors le concept "d'économie spirituelle" cher à Duiker ? Cet exemple illustre clairement le conflit entre les conceptions du mouvement moderne et la tradition de restauration. L'étude préalable à la restauration du sanatorium de Zonnestraal démontre qu'il est plus économique de maintenir la conception d'origine quasi intacte.

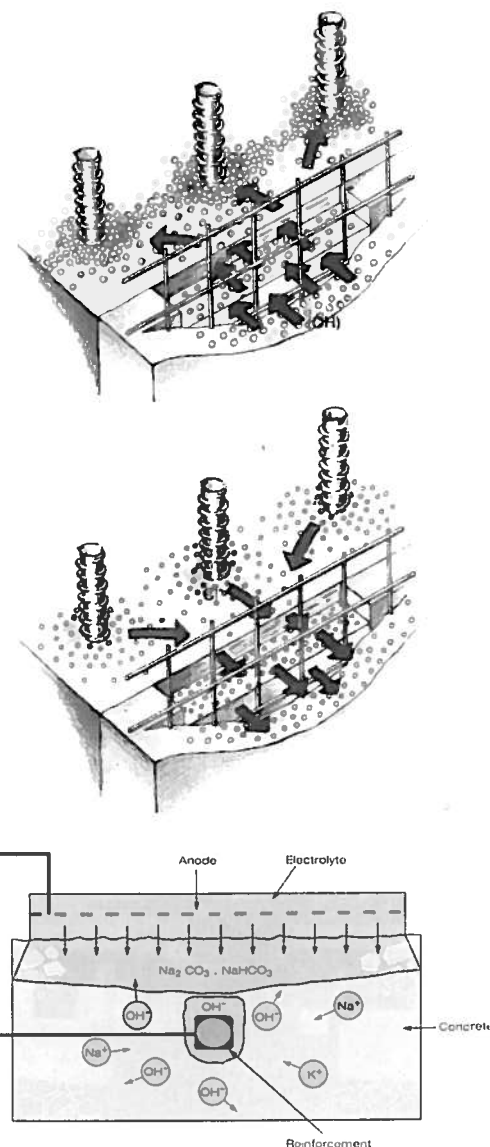


Pavillon très dégradé en 1992.
Ph. Dienst Tu Delft fac. der Bouwkunde

RÉFECTION ÉLECTROCHIMIQUE DU BÉTON

Les systèmes de restauration électrochimique du béton ont d'abord été développés en Norvège pour des travaux de génie civil tels que les ponts. Actuellement, l'entreprise norvégienne Fosroc NCT en détient les droits. Bien que la réparation électrochimique du béton inclue également le dessalement, la plupart des expériences réalisées à ce jour font intervenir la réalcalinisation.

Cet exposé est articulé autour de ce dernier traitement. Une série de programmes de tests dont certains ont pu être soigneusement contrôlés et évalués, a permis de procéder à plusieurs mises en pratique de la réalcalinisation. Comme certaines de ces opérations remontent à cinq ans ou plus, les compte-rendus d'évaluation concernés sont d'autant plus significatifs pour nous.



1. Schéma indiquant le processus de réalcalinisation par Makers, Angleterre
2. Schéma indiquant le processus de dessalaison par Makers, Angleterre
3. Schéma indiquant le principe chimique de la réalcalinisation par NCT, Norvège

Le Goetheanum

Peu après sa construction en Suisse, en 1928, le Goetheanum de Rudolf Steiner est devenu une figure emblématique de l'expression architecturale libre de la technologie du béton, un phénomène de carbonatation ayant traversé la couverture en acier. En 1988, un programme de réalcalinisation a été mis en œuvre sur environ cent mètres carrés de béton de la façade Nord, alors qu'une restauration classique était en cours, ayant donné lieu à un burinage du béton d'origine, au niveau des zones écaillées et autour des armatures oxydées. Le client s'étant aperçu que ces travaux n'étaient pas en harmonie avec la portée historique du bâtiment, l'opération fut interrompue, laissant à nu les armatures de la façade. Il a fallu attendre que le client comprenne les principes de cette technique électrochimique pour que les essais reprennent. Le test n'a cependant pas encore donné lieu à une mise en œuvre supplémentaire du Goetheanum.



Le Goetheanum de R. Steiner à Dornach, Suisse, 1928.
Ph. Jacques Repiquet.

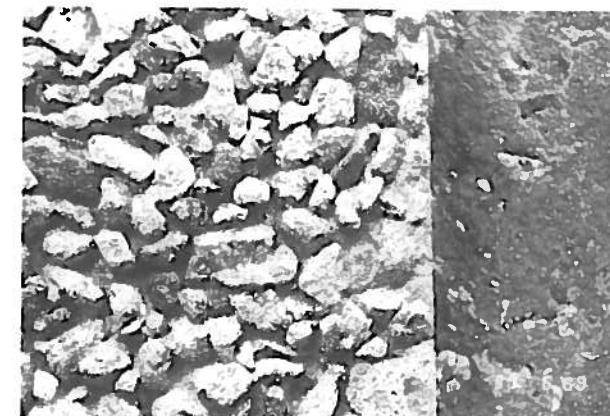
Au cours des cinq années suivantes, plusieurs solutions ont été envisagées, certaines d'entre elles étant associées à une isolation thermique. Toutes ces solutions ont été refusées par l'Inspection des monuments historiques. La façade présentant des dégâts de plus en plus importants, la restauration a repris en 1994. Tant sur les plans technique qu'esthétique, la seule option subsistante était le remplacement total du béton au-delà des armatures, à l'aide d'un coffrage.

À la suite d'une réévaluation intervenue peu après, il est apparu que ce processus de réalcalinisation avait duré deux fois plus longtemps que d'habitude. En effet, le béton avait été précédemment imprégné au moyen d'un agent silicone qui en avait partiellement obstrué les pores. Une nouvelle évaluation a commencé en 1995, sept ans après le traitement. Le programme d'essais repose sur la comparaison entre zones de béton traitées et non traitées. Les résultats de ce programme sont très encourageants puisqu'ils révèlent une épaisse couche de passivation durable, autour des armatures des zones traitées au bout de sept ans, ainsi qu'une nette différence avec les parties non traitées.

Banque nationale de Norvège, Stavanger

La construction de la Banque nationale de Norvège, à Stavanger, date du début des années soixante. Bien que les façades soient principalement constituées de voiles aluminium-verre, elles comportent également trois cent trente

mètres carrés de béton, profilé, buriné à la main afin de créer une texture architecturale. L'une de ces façades se signale par sa très belle décoration géométrique, aux volumes cubiques légèrement saillants. D'autres effets décoratifs sont le fruit d'une alternance de bétons bouchardés et lisse. Des fissures et un écaillage, apparus en 1987, ont montré qu'une restauration s'imposait. L'état du béton s'est révélé assez déplorable, avec des épaisseurs variant de zéro à quarante millimètres. Les façades sont



Banque de Norvège, Stavanger

1. Détail de la façade, où l'on aperçoit l'association de surfaces décoratives bouchardées et de béton lisse. Ph. HTC, Pays-Bas

2. Première méthode d'application d'électrolyte, associée à des fibres de cellulose pulvérisées en surface, système efficace sur les grandes surfaces. Ph. HTC, Pays-Bas

3. Autre méthode d'application de l'électrolyte en cuves plates épousant étroitement la surface du béton et remplies de gel et/ou d'éponges, feutres ou matériau similaire. Système efficace sur de petites surfaces unitaires. Ph. NCT Norvège

partiellement sujettes à la carbonatation en raison du bouchardage qui a éliminé la peau de ciment et provoqué des microfissures en surface. Les profondeurs maximales de carbonatation étaient de trente-deux millimètres pour les surfaces bouchardées, et de seulement dix millimètres au niveau des surfaces lisses. La cartographie potentielle a révélé que 70 % des armatures verticales étaient oxydées du fait d'une carbonatation combinée à une humidité relative. Une réalcalinisation des façades a ainsi été préconisée afin de stopper la corrosion et de juguler l'écaillage.

À l'automne 1988, NCT a procédé à la réalcalinisation d'environ trois cents mètres carrés. Le carbonate de soude a été utilisé comme électrolyte, avec une couche de fibres celluluses d'environ vingt-cinq millimètres d'épaisseur et ensuite pulvérisé sur la surface. Les tests d'alcalinité à la phénolphthaléine pratiqués sur les échantillons ont révélé que le processus pouvait être interrompu au bout d'une semaine, la réalcalinisation ayant opéré en profondeur. La coloration rouge de la carotte entière prouvait que le traitement était achevé.

Après le retrait du système, la surface a été nettoyée à l'eau sous haute pression. Toutes les fissures et cavités ont été remplies de mortier de ragréage pigmenté sur site et mélangé à des agrégats. Puis, les surfaces remises en état ont fait l'objet d'un bouchardage manuel afin d'être en harmonie avec la finition d'origine. La surface a été traitée au moyen d'un revêtement minéral invisible, destiné à protéger les surfaces dont les armatures étaient insuffisamment enrobées. Les résultats de ce traitement ont subi un nouvel examen en août 1990. Les tests pratiqués ont ainsi révélé que l'alcalinité était restée la même qu'à l'issue de la réalcalinisation, ce que les mesures de potentiel ont confirmé.

Les logements de Frederikstraat, La Haye, Pays-Bas

Avec ses appartements en galerie surplombant les parcs de stationnement, l'ensemble des logements de Frederikstraat à La Haye est typique de l'architecture du milieu des années soixante-dix. Les galeries ont souffert de problèmes d'alcalinité liés à une carbonatation. Deux types de traitement électrochimique ont été appliqués aux endroits critiques, il y a environ six ans et leur efficacité a récemment été évaluée par des tests de durabilité. L'une des méthodes de traitement est semblable à celle utilisée pour la Banque de Norvège. L'autre système fait appel à des cuves de 0,75 m³, dotées d'électrodes en titane et contenant une solution de sodium saturant des éponges ; un revêtement est appliqué après ce traitement. Concentrée sur la durabilité de la réalcalinisation électrochimique, l'évaluation de 1995 comprend l'analyse chimique des échantillons portant sur l'étendue et la concentration du sodium, du kalium et des chlorures. Des échantillons des deux zones traitées ont été comparés au béton non traité et aux résultats obtenus après la réalcalinisation. Une importante différence dans les concentrations en sodium a ainsi été mise en évidence entre les matériaux traités et non traités, d'environ un facteur dix. Il est surprenant de constater que dans le béton réalcalinisé non revêtu, la concentration est supérieure à celle relevée dans les surfaces revêtues. Ceci s'explique par une répartition inégale des courants pendant le traitement. Les différences d'épaisseur d'enrobage et les fluctuations d'humidité du lit électrolytique, qui

empêchent le libre mouvement des ions, en sont peut-être responsables. L'inégalité de répartition des courants est favorisée si de vastes zones sont traitées avec un système unique en une seule opération. C'est le cas de la méthode à lit de fibres utilisée à La Haye, qui couvrait environ vingt-quatre mètres carrés en un seul système. Par comparaison avec les résultats obtenus immédiatement après la réalcalinisation, on note une chute de 30 à 40 % de la teneur en sodium, ce qui peut entraîner des niveaux de pH inférieurs. À l'instar de la Banque de Norvège, ce phénomène a été expliqué par la redistribution des ions, provoqué par une diffusion dans le temps, le résultat étant moins favorable dans ce cas précis. Bien que les concentrations en K et Cl aient légèrement diminué, les mesures n'ont pas révélé de valeurs significatives.

Les calculs révèlent qu'une importante partie de l'hydroxyde de sodium produit par la réalcalinisation se transforme en carbonate de soude, composé agissant en tant que "tampon" avec un pH minimum compris entre 10,5 et 10,8. Dans le béton non revêtu, ce phénomène ne s'est révélé que légèrement supérieur à celui noté dans le béton revêtu. De plus, les valeurs de pH étaient faiblement plus élevées dans le béton revêtu, mais supérieures à 11 dans les deux cas. Ceci implique que les armatures restent suffisamment passivées au bout de quatre années. Il me semble nécessaire de tirer une importante conclusion : des résultats très hétérogènes peuvent se produire dans les zones réalcalinisées de grande surface. Les systèmes appliqués sur de nombreuses petites surfaces produisent une répartition plus homogène. Cependant, une surveillance convenable exige des prélèvements, et, dans ce cas, la quantité d'échantillons nécessaire risque d'affecter l'intégrité historique de la structure.

Immeuble Hoover, Londres, Royaume-Uni

L'usine Hoover de Londres a été construite en 1932 par Wallis Gilbert & Partners. Après la délocalisation de la production des aspirateurs, au début des années quatre-vingt, ce bâtiment Art déco est resté vide et désaffecté pendant huit ans, ce qui a entraîné une importante dégradation. En 1989, les supermarchés Tesco ont acheté l'usine qui a été classée en 1990. Le béton se trouvait en mauvais état et présentait une importante corrosion des armatures provoquée par une carbonatation dont la profondeur atteignait environ soixante-dix millimètres : il ne pouvait donc pas être remis en état selon les méthodes classiques. La purge et le remplacement du béton endommagé auraient donné lieu à des dommages importants, tandis que les services du patrimoine anglais exigeaient la préservation du béton d'origine. La réalcalinisation a été exécutée par Makers, spécialiste britannique de la réfection du béton, qui avait déjà mis en œuvre des chantiers de ce genre, comme celui du château d'eau de Desborough en 1991. Pour l'immeuble Hoover, les variations d'épaisseur d'enrobage et la carbonatation moyenne, qui atteignait environ trente millimètres de profondeur, ont imposé une durée de réalcalinisation moyenne de quatre jours. Des zones allant jusqu'à quatre cents mètres carrés ont été traitées en une seule fois, ce qui a permis d'agir sur la surface totale du béton, soit quatre mille cinq cents mètres carrés, en vingt-trois semaines. Après le traitement, la surface a été lavée sous pression et laissée à sécher. Un gobelet de ciment a ensuite été appliqué, suivi d'une couche d'un revêtement élastomè-

re. Malgré la surveillance étroite dont l'immeuble Hoover a fait l'objet, il est encore trop tôt pour tirer des conclusions quant aux effets à long terme.

Depuis le traitement de l'immeuble Hoover, Makers a amélioré ses méthodes au niveau du redresseur et du contrôle du système. Qui plus est, il maintient un courant stable en modulant la tension, rendant ainsi obsolètes les anciens systèmes manuels.



Immeuble Hoover de Londres, à l'issue de sa restauration totale. Ph. Makers, Royaume-Uni

Évaluation

À la lumière des expériences décrites ci-dessus, certaines conclusions peuvent être tirées par comparaison avec les méthodes de restauration traditionnelles.

Les impératifs de mise en œuvre du traitement électrochimique

La structure doit être en bon état statique. Dans un premier temps, les matériaux fissurés, écaillés ou décollés doivent être éliminés. Il n'est pas certain que la carbonatation entraîne la corrosion puisque ce phénomène dépend également de l'humidité et des teneurs en oxygène et chlorures. Le comportement du béton doit être examiné et évalué par des experts qualifiés. Le béton revêtu et/ou imprégné est probablement moins propice au traitement électrochimique et le processus, généralement beaucoup plus lent, peut gêner l'utilisation du bâtiment. Les armatures doivent être continues pour que le courant circule.

Les inconvénients du système

Le traitement électrochimique n'améliore pas le comportement statique des structures. Ces méthodes ne permettent pas la réfection du béton très endommagé à un coût raisonnable. Les surfaces doivent être relativement propres, ce qui peut imposer le grenaillage ou le sablage, d'où un risque de détérioration de la structure historique. Un traitement superficiel reste nécessaire dans certains

cas, ce qui ne convient pas au béton architectural profilé ou texturé. Dans les structures anciennes, les armatures sont fréquemment discontinues, ce qui oblige à endommager le béton pour connecter les sections de ces barres, d'où une perte de la structure historique. Dans certains cas, la réalcalinisation peut engendrer des réactions alcali-granulats conduisant à la ruine du béton.

Questions en suspens

Les variations d'épaisseur d'enrobage peuvent induire des fluctuations d'effet du traitement. Bien que de telles variations s'égalisent généralement dans le temps, elles peuvent compliquer la surveillance (davantage d'échantillons ?) Il est difficile d'obtenir des "opinions annexes" issues de la pratique quant à l'efficacité de la méthode. Une évaluation plus étendue par des architectes semble nécessaire. La surveillance à plus long terme révèle parfois des modifications de comportement contradictoires, imputables à la remigration des ions. Dans le cas de la Banque de Norvège, les valeurs initiales ont augmenté, alors que l'on a noté une diminution à La Haye. Bien que le comportement ne dépasse pas les marges de sécurité et que la durabilité ne semble pas remise en cause, il apparaît judicieux de demander une amélioration du contrôle pendant les premières années suivant le traitement.

Les avantages de ces méthodes

Ils consistent dans le blocage de la corrosion des armatures par élimination en profondeur de la cause du problème. La corrosion de points non détectés est également stoppée. L'effet est immédiatement contrôlable sur le site, par la réduction des nuisances : bruit, poussière et vibrations ; la réduction des structures porteuses provisoires ainsi que du risque d'induction de microfissures intervenant lors de la purge du béton à grande échelle. Par ailleurs, le processus est relativement peu polluant, il permet d'éviter une démolition prématurée ; les besoins de maintenance et des dangers potentiels de réparations sont réduites.

Toutefois le point qui, à nos yeux, revêt le plus d'importance est le respect de l'intégrité historique, nettement supérieur puisque la purge du béton est relativement minime. Pour l'architecture moderne, ce facteur représente un avantage particulièrement important qui nous aidera à entretenir notre patrimoine culturel.

Wessel de JONGE
Secrétaire du Docomomo international,
Université de Technologie de Eindhoven, Pays-Bas
Traduction revue par Elisabeth Marie-Victoire,
Ingénieur, Cercle des partenaires du patrimoine

Les bétons contemporains

INTRODUCTION

Les évolutions qui ont eu lieu sur le matériau béton au cours des dernières décennies ont plusieurs origines. Parmi celles-ci, il y a tout d'abord une demande de plus en plus pressante des utilisateurs pour avoir un matériau dont les résistances seraient plus élevées. Cela n'exclut pas non plus une performance sous d'autres formes telle que la fluidité du béton frais par exemple.

Il y a ensuite une évolution de l'ensemble des constituants du béton qui ont été soit améliorés, soit créés pour répondre à la demande.

Mais il y a également des éléments extérieurs tels que l'informatisation des méthodes de calcul qui ont permis une optimisation de la structure par des calculs plus rapides et plus complexes.

LA PROBLÉMATIQUE DES BÉTONS

Le béton est un matériau hétérogène réalisé à partir de divers constituants naturels modifiés ou non. Il est simple d'utilisation et se destine à des industries diverses où il doit être tantôt rustique et souple d'utilisation, tantôt technique et optimisé.

Cette antinomie est à l'origine de bien des soucis pour les acteurs des métiers où le béton est employé, mais elle prouve justement les capacités d'évolution d'un matériau encore peu technique.

Les qualités attendues d'un béton

Ce matériau doit être facile à réaliser, simple d'utilisation et peu coûteux. Ce sont ces trois qualités qui ont fait sa réussite.

Plus récemment, les besoins ont évolué et on a cherché à améliorer les résistances mécaniques du béton.

Pour cela, il existe plusieurs possibilités connues depuis longtemps déjà :

- La première consiste à accroître le dosage en ciment. C'est ce qui a été réalisé dans un premier temps. Mais cela reste limité car il existe un dosage optimal au-delà duquel le gain en résistance devient faible face au surcoût engendré. D'autre part, les effets secondaires induits tels que les problèmes de retrait ou de fissuration doivent être regardés de très près.

- La seconde solution consiste à optimiser la compacité du béton en optimisant sa composition granulométrique. Cela consiste à limiter la quantité de vides présents dans le béton (air ou eau libre).

La loi de Férret traduit ce principe, elle exprime le fait que la résistance du béton croît proportionnellement à la compacité de la phase liante.

Loi de Férret :

$$R_c = K \times \frac{\text{Volume ciment}}{\text{Volume total (eau + air + ciment)}}$$

Pour réduire les vides présents à terme dans le béton, le formulateur va devoir jouer sur l'élément principal qui est la quantité d'eau présente dans le béton au moment du gâchage ; la vibration apportée sur le chantier étant un moyen d'évacuer l'air présent dans le béton.

Mais la réduction de l'eau de gâchage se traduit aussi par une perte de maniabilité du béton.

Il est donc nécessaire de trouver un compromis permettant une diminution de la quantité d'eau tout en conservant un matériau qui puisse être mis en œuvre.

- La troisième solution consiste à utiliser des produits chimiques qui par effet de défloculation vont favoriser l'écoulement des particules fines du matériau et conférer à celui-ci une plus grande fluidité pour une même quantité d'eau. On pourra également réduire la quantité d'eau afin de travailler à fluidité constante.

Ces produits chimiques, connus depuis les années trente, sont donc appelés les "Réducteurs d'eau" ou "Plastifiants".

Le fort développement de l'utilisation de ces produits dans les années soixante correspond au développement du métier de l'adjuvantation.

Quoique ces produits soient encore très utilisés, leur dosage ne peut être très important car ils possèdent des effets secondaires indésirables tels que le retard de prise ou l'entraînement d'air.

L'augmentation des résistances est donc longtemps resté un problème lié à la quantité d'eau de gâchage et à la plasticité du béton.

Ce problème sur lequel ont buté de nombreux formulateurs devait en partie se résoudre par l'évolution des constituants utilisés.

L'évolution des constituants du béton

Dans le contexte que nous venons d'évoquer ci-dessus, la construction en béton était limitée à une gamme de résistance en compression de vingt à trente Méga Pascals (MPa). Les applications correspondaient à un contexte technologique figé qui a duré environ trente ans.

Les superplastifiants

Dans les années soixante et soixante-dix, les japonais et les allemands mettaient sur le marché des produits de synthèse beaucoup plus performants que les plastifiants qui ne présentaient pas d'effets secondaires. Ces produits étaient appelés les superplastifiants. L'utilisation de ces produits devait permettre une réduction encore plus importante de l'eau de gâchage tout en conservant une fluidité correcte, voire même en l'améliorant.

Les ciments

Ceux-ci ont beaucoup évolué, notamment en améliorant la réactivité des diverses phases anhydres obtenues au cours de la clinkerisation. La finesse des ciments a également progressé grâce à l'utilisation de procédés industriels plus sophistiqués. Ils permettent d'obtenir des ciments avec lesquels il est plus aisé d'atteindre des résistances mécaniques élevées.

Les ajouts

L'emploi d'ajouts normalisés tels que cendres volantes ou fillers est également très répandu de nos jours. Cette utilisation permet d'optimiser la quantité et la réactivité du liant. Leur emploi est particulièrement utile lors de la construction d'ouvrages de masse pour lesquels le dégagement thermique lors de la prise doit être limité.

Citons également l'utilisation de plus en plus fréquente d'ajouts ultra-fins tels que la fumée de silice qui permet par un effet physico-chimique d'améliorer les résistances et la durabilité des bétons. Elles sont souvent utilisées dans les formulations des bétons à hautes résistances.

L'évolution du béton

Dans le courant des années quatre-vingts, tous les éléments étaient donc réunis pour répondre au besoin d'évolution des bétons. L'Amérique du Nord a été concernée un peu avant l'Europe. Cela principalement en raison de la volonté de construire des édifices de grande hauteur. Le domaine, réservé jusqu'alors à l'acier, a basculé dans la construction en béton, car celui-ci pouvait alors répondre aux contraintes imposées. Parmi les ouvrages réalisés, les quelques références suivantes donneront une idée de l'évolution qui a eu lieu en quinze ans.

Date	Résistance en compression	Ouvrage
1975	60 MPa	Water Tower Place – Chicago
1988	90 MPa	Scotia Plaza – Toronto
1989	145 MPa	One Wacker Place – Chicago

En France, le développement des bétons à hautes résistances s'est fait pour d'autres raisons, notamment les résistances développées à court terme qui permettent une amélioration des cadences du chantier.

Date	Résistance en compression	Ouvrage
1986	70 MPa	Pont de Ré
1988	80 MPa	Pont de Joigny
1989	60 MPa	Arche de la Défense – Paris
1992	105 MPa	Opéra de Lyon

D'une façon plus globale, le tableau ci-après présente les principaux ouvrages réalisés et les propriétés valorisées.

Vers la fin des années quatre-vingts, une prise de conscience s'est faite sur l'intérêt que procurent ces nouvelles possibilités. Des études ont été engagées afin de mieux connaître le matériau et son aptitude au vieillissement. Par la suite, des évolutions de la réglementation ont été réalisées afin de prendre en compte les caractéristiques mécaniques de ces bétons.

Au début des années quatre-vingt-dix, les conclusions de multiples études engagées dans plusieurs pays laissaient entrevoir un autre intérêt pour ce matériau. Non seulement le produit était plus résistant, mais il était également beaucoup plus durable que le béton traditionnel. Le terme "Béton à hautes résistances" n'était donc plus adapté et on retint alors le terme de "Béton à hautes performances" (B.H.P.). Cette appellation se justifiait par la tenue de ce matériau vis-à-vis des agents agressifs, de l'abrasion ou encore de la carbonatation.

Depuis, les études se succèdent afin de mieux cerner les limites d'un tel matériau et les garanties qui peuvent y être liées.

En France, l'évolution des règlements a tout d'abord pris en compte une résistance caractéristique de 60 MPa puis 80 MPa. Une extension à 100 MPa est actuellement en cours de réflexion.

Le développement de logiciels de calcul de structure de plus en plus performants permet également la conception de structures plus légères par l'utilisation de systèmes triangulés.

LES BÉTONS CONTEMPORAINS

Les bétons sont de natures très différentes afin de répondre à des applications très variées. Nous avons choisi de les séparer selon trois critères :
– un critère lié à sa mise en œuvre,
– un critère lié à ses performances mécaniques et sa durabilité,
– un critère esthétique.

En réalité, tous ces critères sont fortement liés mais cette présentation, quoique arbitraire, permet d'avoir une idée de l'étendue de l'offre béton.

TYPES D'OUVRAGES	PROPRIÉTÉS VALORISÉES	EXEMPLES D'APPLICATIONS
PONTS	Résistance à court terme, ouvrabilité, durabilité, déformations différées, résistance	– JOIGNY (F) – RANCE (F) – PERTHUISET (F) – CHAMPS-DU-COMTE (F) – LOUHANS (F) – SYLANS (F) – RÉ (F) – AUZON (F)
OFFSHORE	Durabilité, compression et cisaillement, ouvrabilité, abrasion et chocs	– GULLFAKS B, C (N) – TERRE-NEUVE (CAN) – TERRE ADÉLIE (F)
BÂTIMENTS DE GRANDE HAUTEUR	Compression, cisaillement, ouvrabilité, résistance à court terme, confinement	– NVP TORONTO (CAN) – W225 CHICAGO (USA) – ATT CHICAGO (USA) – 181 WM CHICAGO (USA) – NORTHW. HOSP. CHICAGO (USA) – 2 U. SQUARE SEATTLE (USA) – ARCHE PARIS (F) – JAPAN TOWER PARIS (F) – OPÉRA DE LYON (F)
TUNNELS	Durabilité, compression, résistance au jeune âge	– VILLEJUST (F) – MANCHE (F et GB) – LA BAUME (F)
CHAUSSÉES	Abrasion, choc, gel, dégel, cisaillement, durabilité, ouvrabilité	– VALERENGA OSLO (N) – AUTOROUTE E18-E6 (N) – RANASFOSS BR. (N) – SHESTAD TU. (N) – AUTOROUTE 86 PARIS (F) – AÉROPORTS PARIS (F)
PRÉFABRICATION DE COMPOSANTS	Compression, court terme, cisaillement, ouvrabilité	– Poutrelles préfabriquées (F) – Dalles préfabriquées (F)
CONSTRUCTIONS MIXTES ACIER/BÉTON	Cisaillement, compression, ouvrabilité, confinement	– SEATTLE 2U SQ. (USA) – LA ROIZE (F)
ASSAINISSEMENTS	Durabilité, abrasion, compression, ouvrabilité	– PARIS (F)
FONDACTIONS SPÉCIALES REPRISES EN SOUS-ŒUVRE	Compression, ouvrabilité, résistance à court terme, déformations différées	– MOSQUÉE HASSAN (MAR.)
NUCLÉAIRE	Durabilité, résistance, imperméabilité	– Expérimentation CIVEAUX (F)

Les critères liés à la mise en œuvre

Bétons pompables

Ils sont formulés pour être envoyés sur le site par le biais d'une tuyauterie. Cette technique permet d'alimenter les chantiers d'accès difficile ou d'optimiser la production d'un chantier. Le pompage du béton peut être réalisé sur des distances horizontales allant jusqu'à mille cinq cents mètres en horizontal ou plus selon les cas. Le pompage en hauteur est également très pratiqué lors de la construction d'ouvrages de grande hauteur.

Bétons fluides

Ce sont des matériaux dans lesquels, le superplastifiant joue le rôle de fluidifiant. Ils s'avèrent particulièrement utiles lors du coulage d'ouvrages très ferrailés. Leur utilisation est également très fréquente dans les dalles.

Bétons de remblai

Cette catégorie de produits est destinée au remplissage de tranchées, de cavités, etc. Ils sont caractérisés par une mise en œuvre en l'absence de vibrations, le matériau étant autocompactant ou auto-plaçant.

Bétons sous eau

La mise en œuvre d'un béton sous eau est relativement délicate puisque le délavage du matériau enlève les parties fines qui constituent la phase liante. Il existe donc des formulations spécifiques utilisant un adjuvant en vue de limiter très fortement le délavage. Ces bétons sont surtout employés lors d'ouvrages portuaires.

Les critères liés à la structure et à sa durabilité

Les produits en béton préfabriqués

Ceux-ci sont de plus en plus performants et utilisent des bétons sur lesquels les progrès sont soit liés à l'optimisation du matériau classique, soit liés à l'augmentation des résistances mécaniques afin de permettre d'atteindre des classes de performances élevées ou bien d'augmenter les cadences de production.

Les bétons fibrés

Il existe deux natures principales de fibres : les fibres métalliques (en général en acier) et les fibres synthétiques (nylon, polypropylène). L'emploi de fibres dans les bétons permet d'obtenir un comportement ductile et une résistance du matériau après la rupture. Ces bétons sont utilisés soit pour limiter les problèmes de fissuration à jeune âge (cas des fibres synthétiques), soit pour la conception de dallages sans treillis anti-fissuration, ou encore pour augmenter les distances entre les joints (cas des fibres métalliques). L'emploi des fibres métalliques dans un béton permet également d'améliorer la résistance du matériau aux efforts de traction par flexion.

Les bétons légers

Utilisés pour des remplissages ou des isolations phoniques dans le cadre de rénovation par exemple, il est

nécessaire d'avoir un matériau dont la densité soit plus faible que le matériau traditionnel (environ 2,3 t/m³).

On peut distinguer plusieurs catégories :

	Masse volumique (kg/m³)	Résistance MPa
Les bétons mousse	400 à 1200	0,8 à 4
Les bétons polystyrène	400 à 800	0,8 à 3
Les bétons caverneux	800	1
Les bétons semi-caverneux	1100	7
Les bétons isolants porteurs	1300	15
Les bétons de structure porteurs	1700	25
Les bétons de structure à haute résistance	1800	30

Les bétons lourds

Ils sont utilisés comme lest dans les constructions navales ou dans l'électroménager, mais également dans les parois anti-radiations des chambres radiologiques. On utilise dans leur formulation des agrégats particulièrement denses (hématite, riblons d'acier, etc.).

Les bétons de ciment fondu

L'utilisation de ciment fondu permet l'obtention de résistances mécaniques particulièrement élevées à court terme (par exemple 25 MPa dès six heures). Ces bétons sont donc utilisés dans le cadre d'ouvrages nécessitant des remises en service rapides. Une des autres qualités de ce béton est son excellente durabilité aux agents agressifs d'origine chimique.

Les bétons accélérés

Utilisés en temps normal pour accélérer la cadence des travaux ou par temps froid pour contrebalancer l'effet de la température, ces bétons sont formulés à l'aide d'un adjuvant accélérateur. La prise et le durcissement des ciments sont retardés par une baisse de la température ou il est recommandé de prendre un minimum de précautions pour exécuter des bétonnages à basses températures :
- protéger le béton contre un refroidissement excessif
- utiliser des bétons chauds
- chauffer éventuellement les coffrages
- utiliser des ciments à forte exothermie.

Les bétons retardés

Ils sont employés lors de coulages nécessitant une longue durée d'utilisation du béton, mais aussi dans les climats chauds pour réduire l'effet accélérateur de la température.

Les bétons routiers

Leur emploi se développe dans les voiries secondaires agricoles à cause de l'emprise réduite et d'une maintenance quasiment nulle. D'autre part, la chaussée en béton armé continu se développe pour les voiries à fort trafic (autoroutes), sa bonne tenue aux charges et au vieillissement et son confort vis-à-vis de l'utilisateur.

Les bétons à hautes performances

Utilisés à l'origine pour leur résistance mécanique très élevée, ils le sont de plus en plus pour leur durabilité aux agents agressifs, pour leur faible perméabilité à l'eau et à l'air et leur résistance à l'abrasion. Le tableau représenté ci-après donne une idée de la durabilité de ces bétons lorsqu'on les compare à un béton traditionnel ou à un béton d'ouvrage d'art. (Respectivement notés B20 et B30).

CLASSIFICATION DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS

1 = le meilleur, 8 = le moins bon

Type de béton	Dosages			Rc à 28 jours (MPa)	E/C	E/C + FS	CLASSIFICATION de la DURABILITÉ						
	Ciment (kg/m)	Fumée de silice (% du poids de ciment)	Super-plastifiant (% du poids de ciment)				Résistance à la carbona-tation	Résistance aux acides	Résistance à l'eau de mer	Résistance aux eaux sulfatées	Résistance aux cycles gel/dégel	Résistance à l'écaillage	Conclusion
B 20	250	0	0	28	0.880	0.880	8	8	4	8	8	8	8
B 40	400	0	0	51	0.538	0.538	6	6	8	7	7	5) leur clas-) sement) dépend) du type) de dura-) bilité) concerné
B 40 FS	400	10	0	57	0.600	0.545	7	5	4	4	6	5	
B 60	400	0	1.25	68	0.440	0.440	5	6	6	4	1	5	
B 80	450	0	2.8	84	0.351	0.351	1	4	6	4	1	3	
B 80 FS	400	10	2.8	95	0.408	0.370	1	1	1	1	1	3	
B 100 FS	450	10	3.8	102	0.356	0.323	1	1	1	1	1	1	1
B 120 FS	550	10	5.5	113	0.298	0.270	1	1	1	1	1	1	1

Durabilité des bétons vis-à-vis de diverses agressions

Les critères esthétiques

Cet aspect est de plus en plus pris en compte dans le cahier des charges.

D'une part, l'aspect du parement d'un béton traditionnel devient de plus en plus soigné par l'emploi de coffrages plus élaborés et d'huiles de décoffrage plus performantes. D'autre part, la teinte même du béton a été modifiée ainsi que son aspect de surface.

L'aspect de parement

Bien que considéré comme un matériau hétérogène, l'utilisateur souhaite obtenir un parement homogène en aspect et en teinte.

Cela se traduit par deux critères :

- l'absence de bullage sur le parement ou tout au moins l'obtention d'un parement avec un bullage limité.
- l'homogénéité de la teinte du béton et l'absence de taches.

La couleur

Depuis une vingtaine d'années déjà, l'utilisation de ciment blanc permet la réalisation d'ouvrages blancs ou clairs, qui répondent mieux aux attentes des architectes. Ce type de ciment est également employé dans la formulation de mortiers techniques et notamment les enduits de façade.

La coloration des bétons à l'aide de pigments adaptés s'est également développée et après une tendance vers des couleurs très intenses, la tendance serait à l'heure actuelle plus vers des couleurs pastel qui s'intègrent mieux dans l'environnement. Ces bétons sont utilisés dans des éléments de façade esthétiques, dans le mobilier urbain et de plus en plus dans le cadre d'aménagements urbains. Ils permettent de rompre avec la couleur grise du matériau d'origine et de se rapprocher des couleurs de la pierre locale.

Le traitement des surfaces

Il existe depuis très longtemps déjà des techniques permettant de varier l'aspect de surface du béton. Celles-ci se sont développées en même temps que l'utilisation de la couleur. Parmi les principaux traitements rencontrés, on distingue :
- le béton acidé
- le béton sablé
- le béton brossé
- le béton bouchardé
- le béton éclaté
- le béton grésé ou poli
- le béton désactivé plus ou moins fortement

Ces traitements font appel à des techniques mécaniques ou chimiques. La maîtrise de ces techniques est un élément essentiel pour garantir un résultat satisfaisant.

LES TENDANCES ACTUELLES

À l'heure actuelle, le mot "béton" désigne un ensemble de matériaux très variés faisant appel à des formulations fort différentes, et destiné à des métiers très variés.

On assiste donc à une spécialisation de plus en plus forte des équipes sur certaines réalisations ou familles de produits en béton, et ceci se traduit par une formation de plus en plus pointue.

Outre les critères généraux demandés à un béton, on rencontre de plus en plus dans les cahiers des charges des critères liés à la durabilité, la mise en œuvre et l'esthétique. Afin de compenser le manque de formation de certaines équipes, il est de plus en plus nécessaire d'obtenir des matériaux techniques simples d'emploi, ou dont l'utilisation fera appel à peu de main d'œuvre (cas des produits auto-lissants par exemple).

Les tendances actuelles sont donc les suivantes :

- Banalisation de produits assez techniques par la formation du personnel et la mise en œuvre de formules polyvalentes.
- Développement de produits très techniques répondant à un cahier des charges très précis et nécessitant des conditions d'utilisation très spécifiques.
- Prise en compte de l'aspect durabilité du matériau notamment pour des ouvrages sur lesquels le budget maintenance peut être réduit.
- Souci de plus en plus fort de l'esthétique des réalisations que ce soit d'un point de vue homogénéité du parement, de sa teinte ou de son aspect de surface.
- Optimisation économique des bétons traditionnels.
- Prise en compte d'un entretien esthétique ou structurel du matériau au même titre qu'un ouvrage en pierre naturelle.

CONCLUSION

Nous venons de voir très rapidement quelles ont été les principales évolutions du béton au cours des dernières décennies. Les progrès réalisés sur la microstructure du produit ont permis d'améliorer de façon considérable la durabilité du matériau.

L'avenir des bétons sera lié à la capacité des entreprises à mettre en œuvre un matériau de plus en plus technique mais aussi à la capacité des règlements actuels à valoriser l'utilisation des bétons actuels.

Quant aux bétons du futur, ils sont déjà en cours d'élaboration par le biais de formules spécifiques développant jusqu'à 800 MPa ; barrière qui sera sans doute repoussée d'ici quelques années.

François BOSC
Responsable développement, Chryso

DÉBAT

René Lahousse

Au Havre nous avons un problème particulier de restauration des bétons : il s'agit des bétons bouchardés. J'aimerais avoir des éléments sur les techniques qu'on peut éventuellement mettre en œuvre pour cette restauration car celles qui sont actuellement employées ne sont pas satisfaisantes.

Lorsque nous avons un ragréage à faire sur un béton bouchardé on emploie actuellement un mortier ordinaire et on ne retrouve pas la texture du bouchardé ; comment retrouver cette texture du béton bouchardé en cas de ragréage ?

L'épaisseur du ragréage conditionne la technique ; il ne faut pas oublier qu'il y a toutes sortes d'épaisseurs.

Benjamin Mouton

La question fondamentale est : est-ce qu'on veut refaire à l'identique ou est-ce qu'on veut faire autre chose ?

Il y a plusieurs réponses à votre question. Tout dépend si l'on veut refaire à l'identique, auquel cas il faut refaire une surface et reboucharder ou si l'on veut essayer de faire un cache-misère c'est-à-dire autre chose...

Il faut aussi préciser que le mot "ragréage" recouvre plusieurs choses : il n'a pas tout à fait le même sens dans le domaine du bâtiment et dans le domaine du génie civil ; dans ce dernier un ragréage peut apparaître sous une épaisseur un peu quelconque et dans le bâtiment le ragréage désigne une couche mince ; ce problème de vocabulaire crée une autre difficulté.

Je pense qu'il est possible de boucharder une couche relativement épaisse.

Isabelle Pallot-Frossard

C'est effectivement toute la question de la spécificité de nos monuments et des réfections partielles...

Alain Bouineau

Je souhaiterais que monsieur Bosc développe la question des bétons de 800 MPa qui sont forcément des bétons en poudre réactive...

François Bosc

En effet c'est une approche totalement différente des bétons avec un matériau qui n'est plus un matériau à base de granulats de ciment c'est-à-dire de constituants traditionnels. Il y a une optimisation technologique qui vise à éliminer les défauts donc à éliminer les constituants les plus grossiers qui peuvent présenter les plus gros défauts ; c'est ainsi que l'on enlève les granulats et on optimise le dosage et la réaction des constituants pour former les phases les plus dures et les plus résistantes qui peuvent être obtenues avec les liants hydrauliques à savoir les ciments. Il s'agit en l'occurrence de combiner des matériaux réactifs entre eux. Il y a plu-

sieurs niveaux : j'ai évoqué les bétons qui sont effectivement plus proches des mortiers que des bétons puisqu'on n'a plus de granulats et qu'ils développent jusqu'à 800 MPa ; il y a une gamme qui peut développer 200-250 MPa qui correspond probablement à des ouvrages in situ et également une gamme qui nécessite ensuite d'autres types de traitements permettant de développer plus de résistance et qui peut monter jusqu'à 800 MPa. Sur ce plan-là, les plus compétents sont les membres de la société Bouygues puisque ce sont eux qui ont développé le concept de base des bétons en poudre réactive.

Éric Pallot

Serait-il possible grâce à l'enquête qui a été menée par le Cercle des partenaires ou grâce à la meilleure connaissance que nous avons maintenant des bétons anciens, de dresser une sorte de catalogue des différentes pathologies que l'on rencontre dans les monuments anciens ?

On pourrait inventorier les principales altérations du béton de façon à prévenir effectivement les éventuels désordres et définir ainsi une politique d'entretien de nos monuments...

André Raharinaivo

Il me semble un peu dangereux de voir le défaut-type : il est très difficile de définir un défaut-type. Il faut bien définir les défauts au cas par cas parce qu'on peut se tromper du tout au tout : si vous avez l'impression que ce sont plutôt les chlorures qui sont en jeu et qu'en fait c'est la carbonatation cela peut être ennuyeux.

Cependant, si on fait les analyses et les diagnostics sur un certain nombre d'ouvrages on verra à terme quels sont les défauts les plus fréquents pour les bâtiments qui se trouvent en ville par exemple ; malheureusement on n'a pas encore ce type de bilan.

Isabelle Pallot-Frossard

Comme vous le savez nos monuments en béton sont aussi variés que nos monuments en pierre ou nos monuments en bois, etc. Par conséquent, dire qu'il y a une pathologie particulière impliquerait qu'il faudrait faire une classification des pathologies particulières en fonction des diverses caractéristiques de ces bétons. Or on a des bétons des années vingt mais aussi des bétons beaucoup plus récents ; on a des bétons qui comportent des caractéristiques complètement différentes les uns des autres et qui, par voie de conséquence, ont des altérations totalement différentes.

La difficulté, c'est que le monument historique n'est pas un tout, c'est une variété infinie de matériaux et de caractéristiques.

Il y a en effet des altérations qu'on retrouve un peu plus souvent que d'autres, c'est pourquoi dans le petit guide que l'on a édité, il y a une liste d'altérations les plus fréquemment rencontrées ; mais de là à dire que l'on peut

réduire tout cela à un type particulier majoritaire d'altérations il y a un monde...

Jean-Michel Pérignon

On trouve souvent des problèmes de façades avec des épaufures, des écaillages et on veut les reprendre partiellement mais on ne sait pas très bien comment doser les mélanges entre les résines de passivation des armatures de ciments de granulats... Y a-t-il des méthodes de dosages meilleures que d'autres ?

Benjamin Mouton

Il y a deux types de réponse aux problèmes de produits à base de ciments ou, pour être plus technique, à base de liants hydrauliques dont une réponse impliquant la résine.

Il est certain que quand il y a des problèmes de corrosion importants et qu'on ne sait pas très bien maîtriser l'arrivée d'eau, la solution à base de ciment sera toujours préférable. Il ne faut pas oublier que si le béton armé a réussi sa percée et qu'il est devenu le matériau de notre siècle c'est que l'acier s'y conserve très bien au pH 12,6 que lui confère l'eau qui se promène toujours un petit peu dedans ; on se trouve alors dans la zone de passivation de l'acier et tant qu'on reste dans ces conditions-là tout va bien, l'acier se comporte bien et le système fonctionne. Les problèmes de carbonatation montrent effectivement que dès que l'on commence à jouer là-dessus, on sort de cette zone de passivation et on a des ennuis. Si on risque d'avoir carbonatation ou bien une oxydation quelconque des aciers et des changements de pH on sait que l'on court à la catastrophe ; cette solution est a priori la meilleure mais dans certains cas il est quasiment impossible de la mettre en œuvre ; on a alors les solutions à base de résine. Elles sont intéressantes dans la mesure où on a effectivement des cas assez acrobatiques, des endroits auxquels on ne sait pas très bien accéder... Par conséquent, lorsque l'on est en mesure de maîtriser la promenade de l'eau – on a toujours tendance à mettre les chlorures en cause mais il ne faut pas oublier que le premier agent agressif c'est l'eau (nos ancêtres le savaient très bien) – on est relativement tranquille et alors des solutions à base de résine peuvent être employées : dans la mesure où elles ont une prise plus rapide elles peuvent s'appliquer à des conditions intéressantes.

Cependant, là on ne peut agir qu'au coup par coup et il y aura toujours matière à discussion ; la question du prix intervient également car les résines sont plus chères... Mais lorsque l'on étudie les coûts, il faut voir le coût matière et le coût travaux, car si l'on est obligé de mettre des échafaudages compliqués, alors il vaut peut-être mieux mettre un produit noble dont on soit sûr et ne pas avoir à y revenir de si tôt comme c'est le cas parfois avec les traitements ciments...

Monter en haut de l'Église Saint-Joseph donne le vertige rien que d'y penser : il n'est pas forcément indispensable d'y aller chaque fois. Il y a toutes sortes de paramètres à prendre en compte ...

Isabelle Pallot-Frossard

Monsieur de Jonge a indiqué que lorsqu'il y avait besoin

de réalcaliniser un béton, un obstacle important était constitué de certaines des protections antérieures à base de silicone c'est-à-dire de l'application d'hydrofuges ou de produits hydrofuges de ce type ; la question de la compatibilité des traitements successifs – et je pense qu'il faudra insister sur les diagnostics et penser à d'éventuels traitements ultérieurs avant d'appliquer des protections qui risqueraient d'être des barrières à l'application d'autres méthodes de traitement – se pose-t-elle ?

Benjamin Mouton

C'est le problème de la réversibilité que vous avez évoqué. Les traitements en résine en particulier ne sont pas toujours réversibles ; les traitements en ciments non plus d'ailleurs. C'est pour cette raison que le schéma n'est pas simple. Le problème de la mise en œuvre est fondamental car réparer une réparation c'est épouvantable ; il est impératif que la réparation soit bien faite car s'il faut y revenir par la suite, c'est terriblement difficile et compliqué. L'idéal serait effectivement d'avoir des traitements réversibles mais à cette étape c'est un vœu pieux...

Alain Bouineau

D'une façon générale on utilise très peu les mortiers de résine lors des réparations ; on utilise plutôt des liants hydrauliques, modifiés bien sûr pour améliorer les performances, et on reste plus compatibles avec des liants hydrauliques notamment en ce qui concerne le coefficient de dilatation thermique.

Il y a quelques années on a fait une étude sur les mortiers de ragréage. Les mortiers de ragréage à base de résine sont intrinsèquement merveilleux mais inclus dans nos maçonneries ils se comportent très mal ; pourquoi ? Parce qu'on observait des coefficients de dilatation de cinq à six fois supérieurs à ceux de la pierre. C'est ainsi que d'une façon générale on va plutôt choisir des mortiers minéraux ; les liants minéraux dopés avec des résines, on va les réserver aux situations extrêmes.

Isabelle Pallot-Frossard

Voilà la philosophie du service des monuments historiques : le moins de résine possible ! C'est un matériau abominable dans tous les esprits.

Benjamin Mouton

C'est un peu anti-progrès, mais en ce qui concerne les maçonneries c'est vrai, alors que en ce qui concerne le béton c'est moins évident : tout dépend de la couche. Il y a en fait une technique qu'on ne sait pas bien maîtriser, c'est le collage. Et pourtant c'est une technique vieille comme le monde ! En fait on a un problème de surface mais là ce sont probablement les travaux de l'an 2000 qui nous feront avancer...

Isabelle Pallot-Frossard

La tâche à laquelle il va falloir s'atteler c'est de réfléchir sérieusement à ces problèmes de compatibilité ; compatibilité ne signifie pas nécessairement identité de matériaux, mais meilleure compatibilité des comportements des différents matériaux en présence. Il va donc falloir tester et étudier les comportements des différents produits qui sont en vente sur le marché et qui ont été, fort heureusement, déjà largement étudiés par le Laboratoire central des Ponts-et-chaussées.

Problèmes de conservation et de restauration : présentation de cas

L'utilisation du béton dans la restauration des monuments historiques

LES ORIGINES DE L'EMPLOI DU BÉTON DANS LES MONUMENTS HISTORIQUES

Si le XIX^e siècle a vu la naissance de la notion de conservation du monument aboutissant à la création du Service des monuments historiques en 1837, ce siècle a vu également la mutilation d'un grand nombre de monuments, entre autres par ignorance des techniques qui auraient permis de les consolider. C'est l'époque des palliatifs, comme le signale Paul Léon, où à la cathédrale Saint-Rémi de Reims on dépose les voûtes qui poussent pour les reconstruire en bois, ou encore à la cathédrale de Troyes où l'on attache les voûtes à la charpente : "le toit qui porte les voûtes".

Naît alors le souci de conserver au monument son intégrité archéologique et la recherche de moyens de conservation plus élaborés et plus attentifs dont le tournant est la restauration de la Madeleine de Vézelay en 1840 par Viollet-le-Duc grâce, à la fois à la redécouverte des techniques anciennes de construction et à l'adoption de techniques que nous appellerons "de pointe". Cependant, cette connaissance accrue des constructions anciennes aboutit trop souvent à la reconstruction d'édifices, soit pour compléter les parties précédemment démolies, soit encore pour corriger ce que l'on pensait être des erreurs dans la construction du passé. Les exemples sont hélas nombreux. Aussi, grâce au perfectionnement des techniques, dont le fer et la fonte en premier lieu, le démontage des édifices pour les reconstruire est-il de plus en plus combattu et la restauration en œuvre privilégiée. Un des premiers exemples en est la cathédrale Saint-Pierre de Lisieux où l'architecte Danjoy, en 1840, préfère la consolidation de la façade par son rattachement à une ferme en combles s'appuyant sur les tours, au démontage proposé par Piel et Caristie. C'est dans ce contexte qu'apparaît le béton, ou plutôt le ciment armé comme on le définissait à l'époque.

À ces motivations techniques, s'en ajoutent d'autres, plus administratives, comme l'extension des protections au titre des monuments historiques, la limitation des dépenses consacrées à chaque édifice et l'abandon des restaurations coûteuses pour des travaux de plus stricte conservation ; ou encore, tenant à une nouvelle génération d'architectes plus conservatrice et sensible aux enseignements des archéologues tels que Robert de Lasteyrie ou Lefèvre-Pontalis, sans parler des théories développées par Ruskin pour lequel l'intervention devait être aussi limitée que possible en préférant la conservation en l'état.

Bien que, dès 1880, l'architecte Paul Gout couvre les terrasses du chevet de l'église abbatiale du Mont-Saint-Michel par une dalle en béton, c'est surtout par l'influence d'Anatole de Baudot, élève de Viollet-le-Duc, sans doute le premier théoricien du ciment armé, que se développe l'usage de ce matériau, ceci, grâce à son cours professé de 1887 à 1914. Ainsi disait-il en 1907 :

"Jusque dans ces dernières années les travaux de réfection n'ont consisté qu'en des améliorations partielles sans que des modifications réelles eussent été apportées. Mais aujourd'hui, grâce au ciment armé, il est possible d'apporter un remède absolument efficace à cet état de choses (...) Cet admirable procédé contribuera (...) à la conservation de nos édifices du Moyen Age sans en troubler l'esprit, à la condition de l'utiliser avec intelligence et dans les limites inspirées par le respect des formes".

Ou encore :

"Que ceux qui redoutent l'intervention de la science se rassurent : il ne s'agit pas de faire des savants et de retirer à l'artiste la liberté d'esprit dont il a besoin, mais au contraire de la lui laisser aussi grande que possible, en lui mettant entre les mains des moyens simples et certains à l'aide desquels il peut rendre un compte exact de ce qui se fait en matière de construction, et par conséquent de la dégager des inquiétudes et des difficultés dont il est entouré lorsqu'il a recours à des méthodes empiriques".

Cette influence, Anatole de Baudot la confirme par ses propres interventions, comme en 1899 la consolidation de l'église Saint-Nicolas de Blois par des patins en ciment, en 1901, la construction d'une église neuve en béton, à Saint-Jean-de-Montmartre, en 1905, la construction d'une terrasse en béton armé au château de Vincennes.

Les premières utilisations du béton tâtonnent. Ainsi, en 1910, à la cathédrale de Nantes, l'architecte Vincent enveloppe-t-il les arcs-boutants, qu'il juge trop faibles, d'une gaine en béton armé qu'il lui faudra vite démonter. Mais avant d'évoquer ces premières interventions, il semble intéressant de revenir sur l'exemple de la consolidation de la tour centrale de Bayeux, réalisée en 1855, qui, à notre sens, est à l'origine de cette nouvelle approche du monument. Pour reprendre en sous-œuvre les piles écrasées, Ruprich-Robert, soutenu d'ailleurs par Viollet-le-Duc, envisage le démontage de la coupole du XVIII^e siècle. À peine commencée, cette intervention soulève un mouvement populaire. L'ingénieur Tostain et le constructeur Flachat proposent alors et réalisent la

reprise en sous-œuvre de la tour après l'avoir étayée sur un massif fondé à neuf mètres cinquante de profondeur, constitué de cylindres métalliques enfoncés dans le sol et remplis de béton.

Ce nouvel état d'esprit et le recours au ciment armé sont visibles également au travers de deux exemples paradoxaux : à Abbeville, pour raidir les tours de la façade, l'architecte Danjoy propose en 1897 la réalisation d'un élément rapporté, sorte d'arc de triomphe, étré sillonnant les tours ; alors qu'à la cathédrale de Reims, confronté à un problème similaire, l'architecte Paul Gout, en 1906, réagit différemment en proposant une épine de ciment armé reliant les tours et soulageant la grande rose. Il en fut de même à Chartres où, en 1897, on dépose les vous-sures éclatées du porche Sud, alors que quelques années plus tard, au porche Nord, on laisse en place les vous-sures en passant un linteau en ciment armé au-dessus.

Le recours au ciment armé est donc acquis et son emploi de plus en plus courant en ce début de XX^e siècle. En 1910, pour la réfection des combles de la cathédrale de Laon, commencée par Boeswilwald avec une charpente en métal, l'architecte Brunet préfère une charpente en béton pour le croisillon Sud puis le Nord, et enfin la tour Lanterne. À Beauvais, on remplace la couverture en pavillon par une dalle-terrasse en béton (1906 à 1910). Il en est de même à la cathédrale de Saint-Flour, ou encore à l'église Saint-Taurin d'Evreux en 1907 ; l'architecte Ruprich-Robert répond ainsi à retardement aux regrets de Mérimée qui ne cessa, en son temps, de vilipender les transformations de toitures-terrasses par des pavillons couverts en raison de l'impossibilité que l'on connaissait alors d'en assurer l'étanchéité.

LE DÉVELOPPEMENT DE L'EMPLOI DU BÉTON

La guerre de 1914-1918 doit imposer au Service des monuments historiques des tâches d'une ampleur nouvelle et jusqu'alors insoupçonnée. Il se pose, en effet, au lendemain de cette guerre, le problème de la restauration car il faut rendre rapidement les églises à leurs habitants, même si d'éloquents voix, comme celle d'Auguste Rodin, demandent le maintien en l'état des ruines. Le problème de la restauration monumentale se pose avec la même ampleur qu'au XIX^e siècle, mais de manière plus urgente. Pour la première fois, la réparation des dommages de guerre est inscrite dans la loi : six cents nouveaux classements sont pris pour éviter les démolitions. Le Service des monuments historiques répond avec une jeune génération d'architectes, des archives graphiques et photographiques importantes et surtout, pour ce qui nous concerne, la technique du ciment armé, éprouvée, généralisée, rapide à mettre en œuvre et de moindre coût. Il en résulte une série de restaurations menées avec grande prudence en évitant les hypothèses douteuses, sous le contrôle d'un seul inspecteur général des monuments historiques, Charles Genuys, restaurations parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Le rétablissement de la charpente de la cathédrale de Reims, incendiée et bombardée : face au besoin de mille deux cent cinquante stères de bois, à la difficulté de les trouver et au coût de cette solution, l'architecte en chef Deneux utilise le béton armé en réécrivant le principe

d'une charpente à la Philibert de L'Orme par la mise en œuvre de petits éléments préfabriqués assemblés par clavettes. De montage facile, cette solution permet de maintenir l'aspect extérieur originel de l'édifice. Cette charpente est aujourd'hui en parfait état.

- À Saint-Rémi de Reims, un problème similaire se pose. Il est réglé également par l'architecte Deneux avec, en plus, le rétablissement des voûtes en pierre, précédemment remplacées par d'autres en bois ; l'établissement d'un corset en ciment armé pour lutter contre l'instabilité de l'édifice due à des arcs-boutants placés trop bas et la substitution, en 1170, de voûtes à une charpente en bois apparente. L'ensemble est aujourd'hui en bon état également.

- À Arras, l'architecte en chef Pierre Paquet remonte toute la structure interne du beffroi en béton armé avec piles, poutres, plancher et reprise en sous-œuvre coulés à seize mètres de profondeur. La structure en béton armé est habillée de pierres taillées en commençant d'ailleurs par les parties supérieures, ce qui étonne la population ! Les travaux s'achèvent en 1930. L'ensemble est en bon état, à l'exception des bandeaux saillants en ciment armé.

- À Versailles, la vieille aile Louis XIII, seul vestige de la construction de Le Vau, est complètement reprise en 1925 par une ossature nouvelle en ciment armé porteuse et indépendante des façades.

Les autres exemples de ce type sont nombreux. À la cathédrale de Soissons, le ciment armé est utilisé pour des semelles de répartition, des chaînages, des poutres en combles (1930). À la collégiale de Saint-Quentin, les maçonneries sont injectées au ciment ; une ossature monolithe en béton armé consolide le clocher et le rattachement aux maçonneries de la nef (1928). À la cathédrale de Noyon, une couverture en ciment armé est réalisée. À Plumelieu, dans le Morbihan, le clocher de la chapelle Saint-Nicodème est refait en béton armé en 1924 ; celui-ci pose aujourd'hui de gros problèmes de conservation.

La seconde guerre mondiale est également un important moment de reconstruction où le béton aura une place conséquente. Sur huit mille monuments classés, mille deux cent soixante-dix sont touchés par les bombardements. Soixante-huit édifices sont détruits totalement, et à lui seul le Calvados regroupe trois cent trente-et-un monuments dévastés. De nombreuses restaurations sont alors menées, parmi lesquelles nous pouvons évoquer :

- L'abbaye de Lessay, minée par l'ennemi en 1945, où l'architecte en chef Yves-Marie Froidevaux reconstruit une charpente incombustible en béton armé, totalement indépendante des maçonneries comme pouvait l'être la charpente en bois originelle ;

- La tour Saint-Romain de la cathédrale de Rouen, détruite en 1944, où Yves-Marie Froidevaux rétablit une charpente en béton armé, après étude comparative entre une solution bois trop coûteuse et une autre en métal.

- Il en est de même à la Salle des Procureurs du Palais de Justice de Rouen, où l'architecte en chef Jean-Pierre Paquet crée une charpente en béton armé, avec un ingénieux système associant la charpente et des tirants en plancher, pour pallier la faible épaisseur des murs gouttereaux.

- À Saumur, le dôme de Notre-Dame-des-Ardilliers est remonté par l'architecte Vitry par réalisation d'une coupole mince en béton armé de huit à douze centimètres

d'épaisseur sur laquelle sont posés les chevrons. Cette opération reprend le principe de celle réalisée en 1926 par l'architecte Polti sur le dôme de l'église Saint-Hippolyte de Poligny.

- À Larmor-Plage, dans le Morbihan, le clocher est rebâti en 1951 avec une structure en béton armé.

- À Saint-Lô, dans la Manche, la charpente de l'église est rétablie également en béton armé par Yves-Marie Froidevaux en 1955.

- À Valognes, alors que le chœur détruit est reconstruit à l'identique par Yves-Marie Froidevaux, la nef et la tour Lanterne sont reconstruites selon le vocabulaire de l'époque (travaux réalisés de 1954 à 1965) avec utilisation du béton armé.

LES PRINCIPAUX DOMAINES D'UTILISATION DU BÉTON

Ce rapide rappel chronologique nous ayant permis d'entrevoir les rapports étroits que le béton entretient avec les monuments protégés depuis la fin du XIX^e siècle jusqu'au lendemain de la seconde guerre mondiale, on peut maintenant essayer de classer les domaines où le béton est principalement employé.

Dans son cours dispensé à l'École de Chaillot, l'architecte en chef Jean-Pierre Paquet définissait trois grandes méthodes de restauration :

- **La cicatrisation**, qui est le remplacement d'une matière incapable de remplir sa fonction par une autre, saine et de conception identique. Le béton est ici par nature peu employé, à l'exception de quelques exemples comme à l'église de Tillières-sur-Avre, où les clefs de voûte sont soulagées par des poutres en béton construites dans les combles.

- **La substitution**, qui est le remplacement d'un élément défaillant ou disparu par un autre de nature différente.

- **Le recentrement** des charges, qui consiste à stabiliser des désordres affectant l'équilibre d'un monument, par une intervention consolidatoire.

C'est surtout dans ces deux derniers domaines que le béton est le plus couramment utilisé.

En substitution du matériau originel par le béton armé, nous pouvons en effet dégager plusieurs directions :

Le rétablissement des dispositions initiales

Outre les exemples précédemment évoqués, nous pouvons en effet citer :

- le rétablissement des couvertures plates des communs du château de Chambord, en 1937, par l'architecte en chef Jean-Pierre Paquet ;

- le rétablissement de la charpente brûlée de la cathédrale de Nantes, en 1976, par l'architecte en chef Pierre Prunet ;

- la restitution de la couverture du pavillon d'entrée du château de Gaillon, par l'architecte Georges Duval en 1983 ; ici le béton est utilisé à la fois pour la charpente restituée et les planchers ;

- le rétablissement par Benjamin Mouton de voûtes disparues comme à l'abbaye du Relecq avec, ici, la recherche d'allègement des charges et le remplacement des voûtes d'origine par des voiles minces.

L'utilisation du matériau béton pour la dépose, la repose et la translation d'édifices

- À Ambrières dans la Marne, en 1930, pour répondre à un problème de tenue de colline, l'église est démontée et reposée sur un radier de béton. Cette opération serait réalisée aujourd'hui par confortation de la colline.

- À Rouen, la Porte Guillaume Lion est démontée et reculée de vingt-deux mètres en 1950.

- À Amiens, le théâtre, frappé d'alignement, est reculé en 1950 de quatre mètres cinquante par glissement complet de sa façade après établissement préalable d'un corset en béton armé.

La confortation des fondations

Réalisée à plus ou moins grande profondeur par semelles, pieux, puits, micro-pieux... c'est le domaine d'emploi privilégié pour le béton armé avec :

- des interventions simples de reprise en sous-œuvre par élargissement ou approfondissement de fondations conservées, ou par la substitution de fondations par d'autres reportées profondément au bon sol au moyen de pieux en tous genres ;

- des interventions plus complexes, à la fois de reprise en sous-œuvre et de confortation de terrain comme à Evry-le-Chatel, à l'église Saint-Pierre en Liens, par J.-M. Musso, en 1984 ; la précontrainte est ici utilisée avec l'emploi de micro-pieux ;

- des interventions associant à la fois la reprise des fondations et la consolidation des terrains avoisinants, comme au château de Lantenay, pour la consolidation des maçonneries du nymphée, ou à Montbard, pour la consolidation des terrasses du parc de Buffon.

La couverture et la mise en valeur de vestiges

Ici, le béton est utilisé à la fois pour ses qualités techniques porteuses pour les capacités à répondre au souci de lisibilité des restaurations telle que l'a souhaitée la Charte de Venise dès 1964. Le béton permet ainsi la préservation et la présentation d'édifices d'époques différentes.

- À Flavigny-sur-Ozerain, en 1957, l'architecte en chef Jouven dégage et présente la crypte du IX^e siècle.

- À Rouen, en 1976, l'architecte en chef Duval met en valeur l'édifice juif.

- Au Louvre, sous la tour carrée, les vestiges du donjon de Philippe Auguste sont présentés par l'architecte en chef Duval.

- Au Mont-Saint-Michel, une poutre précontrainte réalisée par Yves-Marie Froidevaux permet de couvrir et présenter la crypte romane.

La recherche d'une expression contemporaine sans ambiguïté d'une parfaite lisibilité souhaitée par la Charte de Venise. L'église de Saint-Vaury s'est vue en 1924 additionnée d'un clocher contemporain créé par Auguste Perret. L'architecte en chef Jean-Louis Taupin a réalisé en 1989 le musée de la Révolution française au château de Vizille. En Hongrie, le château de Simontornya a été restauré ainsi que le château de Falaise restauré tout récemment par l'architecte Bruno Decaris.

Eric PALLOT

Architecte en chef des Monuments historiques

Le béton armé dans le renforcement des structures

On l'a dit, c'est à Vézelay d'abord, et à Bayeux en 1855 ensuite, qu'est née la conservation moderne des monuments, sans démontage, et avec leurs défauts et leurs déformations.

À Bayeux, le béton était au rendez-vous. Mais depuis cette date, pas ou peu d'exemples, jusqu'au début du siècle où, grâce à Anatole de Baudot, et après quelques tâtonnements, les premiers signes de réussite sont apparus. C'est surtout à partir de 1938, et en particulier de 1950 que l'influence essentielle de Jean-Pierre Paquet ouvrit l'ère de la confiance et de la maîtrise du béton, dont l'apogée se situe dans les années soixante et soixante-dix.

Dans les premiers temps, ce sont des ouvrages lourds et statiques, dont l'objectif est le blocage des structures, et la philosophie la recherche de la solution définitive. Peu à peu cependant, on verra apparaître des ouvrages de plus en plus articulés, qui s'allègent, combinant la recherche de l'appui exact, avec l'effet complémentaire de pressions dynamiques contrôlées.

Les exemples qui suivent illustrent cette évolution grâce à des images dont certaines sont empruntées au livre de Georges Duval.

PREMIER CHAMP D'APPLICATION : LES REPRISES DE FONDATION

• *Caen Église Saint-Jean*

Reconstruite au XV^e siècle sur des fondations XIII^e et située dans un terrain marécageux, elle fut très ébranlée lors des bombardements de 1944.

En 1960, consolidation par soixante-sept puits de diamètre en béton armé, enfoncés jusqu'au bon sol à treize mètres de profondeur.

C'est l'exemple d'une technique lourde, avec effet de point dur sous le chœur (alors que la nef reste sur le sol souple), et qui sera fréquemment employée.

Apparue dans les années soixante-dix, la technique des micro-pieux par forages de faible diamètre sans vibration est observée simultanément à celle de l'élargissement de semelle, l'une et l'autre permettant des renforcements significatifs, en préservant la souplesse des appuis.

Dans le domaine des reprises en sous-œuvre, deux exemples majeurs doivent être rappelés :

• *Le Mont Saint-Michel*

Mise en place d'une poutre en béton précontraint pour reprendre la façade occidentale de l'église abbatiale construite au XVII^e siècle au dessus de la chapelle primitive.

Poids de la façade : 500 t, portée 10 m ; hauteur disponible 0,70 à 0,90.

Travaux : Yves-Marie Froidevaux en 1960.

• *La Chaise-Dieu*

Reprise des deux clochers qui couronnent la façade occidentale, exécutés tardivement et qui s'appuient sur des piles trop faibles.

Poids à reprendre : 560 t, portée 26 m, encombrement dans comble surbaissé.

Solution adoptée : deux fermes en béton armé précontraint conçues sur le principe du ressort à lames, et prenant appui sur des gouttereaux. Serrage par vérins plats.

Travaux : André Donzet en 1958.

SECOND CHAMP D'APPLICATION : LE CONTREBUTEMENT

Techniques des équerres

• *Caix, Église Sainte-Croix*

Le contrebutement qui est au Nord sous forme d'un arc-boutant n'existe pas au Sud. Mise en place d'une équerre en béton armé prenant appui sur le gouttereau du bas côté.

Travaux : Deneux en 1908.

• Dans le même esprit, *Le Tréport, Église Saint-Jacques* et *Caen, Église Saint-Nicolas*, en 1975.

On observera que ces solutions sont statiques, et coexistent avec des arcs-boutants dynamiques, non sans problèmes de compatibilité contradictoire entre eux.

TROISIÈME CHAMP D'APPLICATION : LE RECENTREMENT DES PRESSIONS

• À *Saint-Leu d'Esserent*, les tribunes des bas-côtés n'avaient pas été construites lors de l'édification de l'édifice, ce qui eut pour conséquence de priver la nef d'un contrebutement utile.

Des tirants transversaux avaient été mis au XIX^e siècle dans la nef.

En 1938, Jean-Pierre Paquet mit en œuvre la première pince passive, en béton armé, encastrée dans les maçonneries, et mise en compression par verins.

Cette technique, révolutionnaire pour l'époque, fut le point de départ de toute une série d'interventions qui connut son apogée dans les années soixante et soixante-dix.

Plus dynamique, la technique des balanciers apportait une réponse aux équilibres précaires des églises halles ou les bas-côtés ne contrebutent pas la nef.

• Pont Sainte-Maxence

Équerres en béton armé sur bas-côté, et tirant horizontal sur la nef.

Travaux : Jean-Pierre Paquet en 1965.

• Et surtout Saint-Michel-des-Lions à Limoges

Bouclier de béton armé suspendu au-dessus des vides des pieds de gerbe des piles, à l'aide de fermes en béton armé. Une très légère pression est exercée transversalement sur la voûte centrale pour recentrer les pressions.

Travaux : Lebouteux en 1973.

Génération suivante, les pinces actives

• Le Puy, Église Saint-Laurent, église halle ici encore.

Arc en béton armé au-dessus des voûtes, prenant appui sur des boucliers coniques placés dans le vide des pieds de gerbe, avec verins exerçant une légère pression oblique.

Travaux : Donzet en 1980.

• Arcueil, Église Notre-Dame

Défaut de contrebutement.

Première solution : Pince en forme de A, prenant appui dans les reins de voûte ; effort de pression obtenu par le serrage d'un tirant à mi-hauteur.

Seconde solution : Grille prenant appui sur les gouttereaux et recevant les tirants obliques ancrés dans les gouttereaux au travers des reins de la voûte.

Travaux : Moufle vers 1985.

• Vienne, Église Saint-André-le-Bas

Nef voûtée, très déformée ; arcs-boutants insuffisants.

Solution assez voisine de celle d'Arcueil :

- Ferme en béton armé en remplacement de la charpente ruinée,

- avirons ancrés dans les gouttereaux au travers des reins de voûte,

- fixés sur ferme béton armé,

- pression contrôlée, exercée par verins depuis la ferme.

Travaux : Taupin en 1987.

On le voit les ouvrages s'allègent :

- Ils sont moins encastrés dans les structures existantes.

- L'action dynamique, au début mineure ou inexistante, prend une importance décisive, et contribue à alléger les ouvrages encore un peu plus.

- Peu à peu, on s'oriente vers des solutions encore plus légères, dont la philosophie est l'appoint structurel, et la méthodologie est le post-contrainte activant les maçonneries existantes.

Applications :

- Ceintures inox à *Strasbourg, Église Sainte-Madeleine*.

Travaux : Gaymard en 1985.

- Ceinture intégrée par forage dans les gouttereaux du chœur de *Murbach*, même date.

- Reprise du contrebutement défaillant des culées externes par tirants inox forés dans les arcs-boutants à *Quimper* en 1991-1993.

On est ici à un taux de 80 % de réversibilité.

ÉTAT SANITAIRE

Un premier et rapide inventaire de l'état de conservation de ces ouvrages en béton a été effectué :

- La Chaise-Dieu : bon état des fers en bout de ferme

- Limoges, Saint-Laurent : bon état

- Vienne, Saint-André-le-Bas : bon état mais le contrôle des pressions est désactivé.

- Charpente de la cathédrale de Reims : bon état

- Pince béton armé à Saint-Rémi : bon état

- Charpente de Lessay : bon état

- Saint-Lô : bon état

- Valogne : bon état.

Mais la consolidation en béton armé du clocher de Saint-Nicomède-en-Plumeliau (Morbihan) présente de gros problèmes de corrosion des fers. Ceci est sans commune mesure avec la reprise en sous-œuvre du clocher de Larmor-Plage, dont la pathologie très préoccupante est aggravée par le fait des nombreux encastresments dans la flèche en pierre.

Quant aux ouvrages non visitables, tels que la pince de Saint-Leu d'Esserent, ou la poutre du Mont Saint-Michel, il n'est pas possible de se prononcer.

Même raisonnement bien sûr pour toutes les reprises de fondations, puits ou micro-pieux.

QUELLES CONCLUSIONS TIRER ?

Exposition

- Les ouvrages protégés, situés dans les lieux ventilés, sont en bon état.

- Les ouvrages exposés aux intempéries, aux condensations ou situés en milieu marin présentent des désordres qui peuvent être extrêmement importants : lorsqu'on observe les désordres de Larmor-Plage, on ne peut que s'inquiéter des ouvrages encastrés, non visitables, et qui peuvent subir des agressions fatales !

Compatibilité

La dureté et la faible porosité des bétons font très mauvais ménage avec les ouvrages de maçonnerie. La perturbation des échanges entraîne l'apparition d'altérations de la pierre, fissurations, condensation... C'est-à-dire risque de destruction de la matière ancienne restante. C'est un véritable phénomène de rejet et, dans le cas d'ouvrages recouverts de décors, les conséquences peuvent être catastrophiques.

Articulations

Les ouvrages en béton armé sont beaucoup plus rigides que la plupart des maçonneries anciennes. La mise en

place de prothèses créent des points durs localisés qui brident les supports, et génèrent de nouvelles contraintes qui peuvent risquer, à leur tour, de se manifester ailleurs en faisant apparaître de nouvelles ruptures.

Réversibilité

Quelle que soit l'admiration que l'on a pour les boucliers de Saint-Michel-des-Lions, ou la pince de Saint-Leu d'Esserent, il s'agit d'ouvrages très "lourdement" et difficilement réversibles. Tout dérèglement hypothétique aurait les conséquences extrêmement graves qu'il est facile d'imaginer.

Il faut souligner que le béton armé a permis d'écrire de très belles pages de la conservation du Patrimoine, fai-

sant naître une panoplie d'une extraordinaire richesse d'imagination d'intelligence et d'invention.

Mais on ne saura trop souligner qu'il est capital désormais d'assurer une surveillance périodique et systématique des ouvrages existants, en équipant notamment les ouvrages masqués de capteurs et de n'envisager qu'avec beaucoup de prudence des nouveaux ouvrages, en adoptant les précautions indispensables d'isolation, d'articulations, afin d'en assurer la compatibilité et la réversibilité.

Benjamin MOUTON

Architecte en chef des Monuments historiques

Restauration de l'église Notre-Dame de Royan, Charentes-Maritimes

La ville de Royan fut très touchée par les bombardements de la seconde guerre mondiale.

Le plan d'urbanisme pour la reconstruction confié à Claude Ferret s'orienta vers une image urbaine entièrement nouvelle, symbole de la liberté retrouvée. Il fut élaboré dans l'enthousiasme sur les lieux mêmes du désastre par une équipe de jeunes architectes, nourris par les thèses de la Conférence internationale d'architecture moderne, entourant l'architecte en chef Louis Simon.

Le 10 octobre 1953, le conseil municipal de Royan lance un concours d'architectes pour la reconstruction de l'église.

En février 1954, l'architecte lauréat est Guillaume Gillet, premier grand prix de Rome, assisté de Bernard Lafaille, ingénieur conseil. Un cinquième du crédit engagé sur des dommages de guerre est réservé pour les vitraux et les orgues.

La première pierre est posée le 10 juillet 1955. La réalisation des travaux de gros œuvre est effectuée entre septembre 1955 et juillet 1958. L'inauguration de l'église a lieu le 10 juillet 1958.

Œuvre majeure au XX^e siècle, l'édifice représentatif d'une étape importante dans l'histoire des techniques et de l'architecture religieuse sera classé au titre des monuments historiques le 10 février 1988.

PRÉSENTATION DE L'ÉDIFICE RAPPEL DES DÉSORDRES

Le plan de l'église en ellipse conçu par l'architecte Gillet, a permis la couverture en selle de cheval, principe de voûte à double courbure (PH) auquel l'ingénieur Lafaille s'intéressait particulièrement.

Bernard Lafaille utilise des voiles minces qui, par leurs formes, constituent une succession de "V" (V Lafaille). Mais la légèreté de la couverture sur une grande surface rendait l'ensemble très sensible aux efforts alternés du vent et des dépressions pouvant provoquer des déchirures du voile mince. Cette structure verticale est tenue en partie basse par des voiles minces inclinés qui assurent la couverture du déambulatoire, liaisonnés et contreventés par les coursives elliptiques basses et hautes ou triforium, et la ceinture supérieure. À Royan, les câbles de suspen-

te sont ancrés dans un arc couronne maintenu en partie supérieure par des voiles verticaux (V. Lafaille).

La voûte de faible épaisseur (huit centimètres), vient prendre appui directement sur la ceinture. Le voile, alternativement sollicité par des efforts de compression ou de traction, fonctionne en toile de tente entre le clocher et la croupe et en voûte dans l'axe perpendiculaire. Notons qu'à l'inverse de tous les éléments constitutifs de l'édifice, cette voûte est étanchée au moyen d'une feuille auto-protégée de type "paxaluminium".

Les magnifiques verrières qui participent à l'atmosphère recueillie de son intérieur sont l'œuvre du peintre verrier Henri Martin Granel.

Le clocher à l'Est, qui est constitué de trois piliers, domine la structure générale. Un cadre en béton, logé à l'intérieur de ces voiles porteurs, rendu indépendant par un calage, constitue la chambre des cloches (beffroi proprement dit et abat-son).

L'intérieur comme l'extérieur de l'église Notre-Dame présentent un béton brut de décoffrage voulu par l'architecte.

Cet ouvrage est réalisé en peu de temps avec des moyens financiers restreints qui très rapidement ont entraîné la réduction des proportions du projet initial. Inauguré le 10 juillet 1958, l'édifice ne tarde pas à présenter dès 1960 les premiers désordres qui sont essentiellement dus à des problèmes d'étanchéité. En 1967, les infiltrations d'eau sont accentuées au droit des vitraux et des voiles du déambulatoire, du baptistère et du bénitier. Les travaux de grand entretien lancés en 1972 et 1973 pour étancher le béton, n'ont pas été suffisants pour maintenir l'édifice hors d'eau.

Les armatures ne tardent pas à se corroder et provoquent l'éclatement du béton accélérant le phénomène de dégradation des aciers. Des reprises ponctuelles réalisées au mortier de résine n'ont pas donné de résultats probants, tant sur le plan mécanique que sur le plan esthétique.

C'est principalement au droit des arêtes des piliers en V que le béton est très largement fissuré, fendu, découvrant ainsi franchement les aciers oxydés après la chute des épaufrures dont certaines peuvent atteindre plusieurs dizaines de centimètres de longueur. Ces désordres ont motivé la mise en place tout autour de l'église d'un périmètre de sécurité.

Parallèlement, on note, et plus particulièrement à partir de 1986, une accélération des désordres sur le beffroi-béton. L'arrêt des sonneries des cloches est demandé en raison du porte-à-faux existant vers l'Ouest et de l'altération de sa structure.

Les premières études préliminaires à la restauration ont été lancées dès 1987 confiées à l'ingénieur Lucien Boudet et Veritas. Une reconnaissance détaillée et méthodique a été réalisée à partir d'échafaudages et de nacelles.

Elle a permis :

- une reconnaissance de l'épiderme et des membrures affectées,
- une auscultation radiographique constituée de plus de trois cents clichés rendant possible la projection en vraie grandeur de l'ossature métallique noyée dans le béton et d'apprécier le degré important de corrosion des fers en facilitant ainsi la restitution de plans de coffrage et de ferrailage.

Par ailleurs, une analyse physico-chimique a été réalisée à partir de prélèvements de béton.

L'étude préalable que nous avons conduite en décembre 1989 faisait la synthèse des différentes analyses et études précédemment lancées et proposait sur le plan technique, une méthode de restauration et son phasage.

Pour répondre aux besoins les plus urgents, en l'occurrence à la stabilité du beffroi, la première phase des travaux a porté sur le clocher.

ANALYSES ET MÉTHODOLOGIE DE LA RESTAURATION

Des analyses complémentaires à toutes celles qui avaient été lancées antérieurement par la ville de Royan ont été confiées au Laboratoire régional de l'Est parisien sous le contrôle du CETE de Bordeaux.

Testées sur quatre zones accessibles du clocher, il a été procédé :

- à la mesure de perméabilité de la surface du parement : celle-ci nous a renseigné sur le caractère poreux ou hygrosopique de la peau du béton,
- à la mesure de vitesse du son à la surface du parement : elle a donné une idée de l'homogénéité de la structure poreuse dépendant de l'état de teneur en eau des pores ; la vitesse de propagation du son et sa variation linéique nous a renseigné sur les zones les plus sensibles à la rétention d'eau,
- à la mesure de carbonatation : effectuée à partir de carottages prélevés sur le parement ; un indicateur coloré de pH indiquait la profondeur totale de carbonatation de béton, il définissait la profondeur jusqu'à laquelle les aciers enrobés n'étaient plus protégés chimiquement de l'oxydation,
- à la mesure de teneur en chlorure contenu dans la solution interstitielle,
- aux mesures du potentiel d'armatures qui déterminaient l'état d'enrouillement certain, probable ou négatif,

- à l'aspect visuel de l'état d'enrouillement : les carottages effectués dans les mesures précédentes permettant de le visualiser, d'apprécier la diminution des sections des fers et de préciser la profondeur d'enrobage des armatures.

Des enseignements intéressants ont pu être tirés des mesures réalisées hors de cette auscultation :

- Le béton est généralement poreux en surface à caractère non-hygrosopique.
- Les profondeurs de carbonatation relevées et les taux de chlorure mesurés ne sont généralement pas de nature à dépasser les armatures lorsqu'elles sont bien enrobées.
- Les mesures de potentiel d'électrode et les observations visuelles effectuées lors des carottages corroborent cette assertion.
- Tous les aciers qui se trouvent dans une zone carbonatée ou à nu sont attaqués ou en voie de l'être.

Cette dernière investigation a confirmé notre choix dans le principe de restauration proposé au niveau de l'étude préalable et du projet architectural et technique. Il était nécessaire de traiter ou de remplacer toutes les armatures dans un état d'enrouillement certain se trouvant dans les zones carbonatées (donc en surface ou à nu) et de reconstituer les bétons dans ces zones altérées. Les armatures convenablement enrobées ne présentaient pas de risque à court terme.

La méthodologie de restauration du béton proprement dit a été définie à partir des investigations menées dans le cadre des études précédemment évoquées et sur l'expérience de vieillissement des reprises réalisées antérieurement au mortier de résine.

Dans le cadre des marchés de travaux de restauration, il était demandé à l'entreprise de faire une auscultation complète des parements béton avant intervention. Une série de mesures de reconnaissance systématique au droit des voiles par des relevés pachométriques, mesures de carbonatation et indices sclérométriques a été effectuée depuis les échafaudages confiés au CEBTP de Niort. De manière pratique, les résultats ont été notés au marker sur la paroi de l'édifice pour que le personnel du chantier puisse trier les renseignements de l'intervention et déterminer précisément les zones de reprises.

D'une façon générale l'enrobage des aciers était situé entre trente-cinq et quarante millimètres en moyenne. Le béton assez homogène présentait des zones carbonatées.

Les travaux ont consisté sur les piliers du clocher :

- en un nettoyage à l'eau approfondi afin d'éliminer les chlorures dont la concentration est plus importante dans les zones abritées des embruns,
- en des purges mécaniques du béton mettant à nu les aciers sur toute la surface corrodée, et dans toutes les zones où le béton est éclaté ou fissuré, ou bien carbonaté, mais aussi les zones suspectées d'une corrosion importante,
- dans le remplacement des armatures trop corrodées en restituant les sections initiales,
- dans le traitement des aciers,

- dans la reconstruction des parties enlevées ou éclatées par un micro-béton de liant minéral enrobant solidement les fers ; sa réalisation soignée a respecté les plans de coffrage originel (hauteur des banches) tant sur la granulométrie que sur la couleur pour répondre à l'harmonisation du parement ancien,
- dans des ragréages de parement.

Les panneaux de vitraux déposés ont été remplacés après vérification des barlotières métalliques, traitement et mise en place de bandes comprimantes assurant l'étanchéité générale.

Sur le beffroi, la préhension des désordres était différente. La restauration se limitait à des problèmes structurels.

La chambre des cloches formée par l'élément beffroi abat-son logé dans le clocher est composée d'une structure monolithique poteau-poutre en béton et côté Ouest, des abat-sons. Les cloches étaient disposées sur un petit beffroi bois fixé par colliers métalliques en partie haute de la structure béton.

Les désordres qui affectaient cet ensemble en béton étaient liés aux déformations de l'ossature insuffisamment contreventée. Les membrures du cadre formant le beffroi béton présentaient des détériorations et des anomalies : fissures ouvertes, aciers affleurants, nœuds d'assemblage très fissurés. Le calage inférieur aléatoire était réduit à quelques cales de bois.

Les calculs de stabilité avaient montré, d'une part que le beffroi n'était pas centré sur ses appuis et qu'il était en porte-à-faux vers l'Ouest en raison du poids des abat-sons, et d'autre part que l'équilibre n'était pas assuré sous les effets conjugués des cloches lancées (dans l'axe Est-Ouest) et du vent.

Le renforcement de ce beffroi sollicité par les cloches s'imposait pour assurer la pérennité de l'ouvrage. Des structures rapportées, telles que des câbles et des fers IPN, préconisées par les études et calculs du BET, auraient considérablement changé les dispositions originales. Aussi, il a été décidé de le restaurer sans modification et de rapporter à l'intérieur une nouvelle structure indépendante en bois.

La restauration proprement dite du beffroi a consisté en la réparation du béton armé de l'ossature et le changement de tous les éléments détériorés.

L'expertise effectuée en mai 1993 par la direction des constructions navales de Cherbourg avait conduit à trois conclusions principales pour le positionnement des cloches dans un nouveau beffroi bois :

- Le comportement du beffroi béton imposait de le situer dans la partie inférieure,
- l'axe de balancement des cloches devait passer en direction Nord-Sud (selon la plus grande largeur) afin de moins solliciter l'ouvrage,
- le calage du beffroi béton, préconisé pour filtrer mécaniquement les hautes fréquences devait être souple (liège néoprène).

C'est ce qui a été réalisé en définitive pour répondre tant aux exigences techniques qu'architecturales.

Cette première intervention sur le clocher a permis de restituer au matériau ses propriétés mécaniques. La poursuite des travaux sur tous les voiles des autres façades est programmée et devrait reprendre dès le printemps 1997.

Il y a lieu de s'interroger dès aujourd'hui sur l'évolution du vieillissement du béton non repris qui reste soumis à la carbonatation et à ses risques induits. Le rétablissement sur l'ensemble de l'ouvrage des conditions permettant la restauration de la couche passivante ralentirait, voire stopperait l'évolution, le phénomène d'altération et de vieillissement.

Il semble aujourd'hui qu'un procédé récent ayant eu plusieurs applications à l'étranger soit en mesure de répondre à notre problème. Le procédé NOV BÉTON utilise un procédé électrochimique qui réalkalise le béton et de fait en protégeant les armatures lui restitue ses qualités originelles.

Philippe OUDIN
Architecte en chef des Monuments historiques

Restauration de l'église du Raincy

HISTOIRE

Au début du XX^e siècle, Le Raincy, petite paroisse de la banlieue Est, voit sa population augmenter de façon spectaculaire. L'église devient trop petite, et l'abbé Félix Nègre décide en 1918 d'en faire construire une plus grande. En cette période d'immédiat après-guerre, de pénurie de moyens et de matériaux, le moment est peut-être mal choisi. Mais c'est une époque d'enthousiasme, et l'élan est donné : on fait appel à l'architecte du théâtre des Champs-Élysées, Auguste Perret, qui entraîne avec lui Bourdelle, Maurice Denis, et Marguerite Hure. Cette église est pour eux un pari : il faut construire vite et pas cher ; ce sera l'occasion d'une démonstration d'architecture nouvelle et économique, caractérisée par l'emploi du béton armé qui lui donnera toute son expression plastique et sa lumière. L'église sera achevée en treize mois seulement, et consacrée le 17 juin 1923, accueillie aussitôt par des réactions vives et nombreuses. Elle est organisée suivant un plan rectangulaire allongé avec chœur à l'Ouest ; la structure est constituée de quatre files de fines colonnes qui portent les voûtes en berceaux très tendues, et définissent un vaisseau central et deux collatéraux, de cinq travées et demie. À la périphérie et indépendante de la structure, la clôture est assurée par des cloisons constituées de claustras superposés en béton entre raidisseurs, recevant des vitraux dont la coloration monte graduellement en puissance vers le chœur, ce qui lui vaut l'appellation de "Sainte-Chapelle du XX^e siècle".

ÉTUDES PRÉALABLES

Servie par un matériau encore mal connu et une mise en œuvre hâtive, l'église montre, quarante ans plus tard, des altérations qui s'aggravent progressivement : écaillages, gonflement ou éclatement de la surface du béton, avec efflorescences, coulures de rouille et dépôts de salissures...

Classée monument historique en 1966, elle est alors l'objet d'observations qui débouchent sur une série d'études et de travaux : de janvier à novembre 1976, les premières études sont menées avec le concours du Cebtp : auscultations dynamiques par vitesse de propagation du son, en particulier sur poteaux et poutres facilement accessibles ; analyses des mortiers ; teneurs en carbonates de calcium ; granulométrie, densité apparente, dosages ; essais de résistance et caractéristiques physiques ; essais de

résines. De 1978 à 1983, examen des voûtes ; mise en surveillance des fissures et descente de charges.

En 1986, des examens complémentaires sont effectués et aboutissent, en juillet 1987, à l'étude préalable sous la direction de Pierre Bonnard, qui résume l'essentiel des observations et des mesures d'intervention : la déficiente composition des bétons, autant du fait des liants (ciments et chaux) que des agrégats (sables argileux), a rendu certains ouvrages très sensibles à l'attaque chimique de l'air, allant jusqu'à la décomposition pulvérulente ou en plaques... La mauvaise exécution des bétons, trop liquides, a entraîné l'apparition de "nids de cailloux" à la plupart des reprises de coulage, favorisant les entrées d'eaux chargées de sels qui atteignent les armatures, et en provoquent la corrosion. Les armatures métalliques, dont certaines placées trop près de la surface sont insuffisamment enrobées ; on a pu observer également des armatures mal liaisonnées, déplacées ou déformées lors de l'exécution.

Dans ces conditions, les techniques de reprise étaient relativement limitées : sur les principaux organes de structure (poteaux, raidisseurs primaires), purge des parties de béton fissurées ou épaufrées ; mise à nu et passivation des fers, et reconstitution du béton par un mortier de ciment coulé dans un coffrage. Sur les organes secondaires, tels que claustras (dont certains étaient totalement dépourvus d'armatures) ou raidisseurs secondaires, remplacement à l'identique.

TRAVAUX DE RESTAURATION

Sans attendre les conclusions des dernières études, une première campagne de restauration débuta sur la travée Sud du chevet par André Donzet. Mais dès 1988, la restauration fut entreprise suivant un programme pluri-annuel (maîtrise d'ouvrage État et financements croisés : État : 50 %, région : 30 %, département : 10 %, commune : 5 %, association diocésaine propriétaire : 5 %)¹.

Dès le début du chantier, des détails de mise en œuvre furent mis au point : les reprises en béton précisément

¹ En 1988-89, restauration de l'étanchéité de la toiture (élastomère bicouche sur isolation thermique) : Pierre Bonnard. En 1991, restauration du clocher ; 1992, 1994 et 1995, façade Sud entre tours à l'Ouest et à l'Est (Jacques Lavedan) ; 1996, façade Nord.

dosés², les armatures des parties neuves réalisées en acier inoxydable. La contrainte de dilatation des grandes parois de claustras est absorbée. Création à chaque travée d'un joint compressible le long du raidisseur principal pour absorber la contrainte de dilatation des grandes parois de claustras (technique des façades rideau). Les premiers résultats firent apparaître d'importantes difficultés d'intégration des reprises : couleur de béton, granulométrie, correspondance de hauteur de coffrages (trois mètres à l'origine), au point qu'il fut nécessaire d'adopter le parti de la franchise et de la lisibilité, pour les travaux sur le clocher notamment.

Après le décès de Jacques Lavedan, en septembre 1994, le chantier fut poursuivi suivant les principes qu'il avait ainsi définis ; mais la travée des fonts baptismaux située au Nord du clocher, donna l'occasion d'observer des claustras dans un état passable et de tenter, moyennant de très grandes précautions, le sauvetage de plusieurs bandes verticales : cette initiative offrait le double avantage de laisser en place des éléments originaux, ainsi que les vitraux correspondants, avec leur montage d'origine. L'élévation Nord – programme 1996 –, bien que dans un état de conservation moins alarmant que l'élévation Sud, présentait des altérations graves du béton, moins dans la décomposition du matériau que par la rupture des éléments invisibles, parce que dissimulés par les vitraux et les solins de montage : des fissures verticales fendaient dans leur épaisseur la quasi-totalité des claustras ; le processus de conservation tenté avec succès au-dessus des fonts se trouvait extrêmement compromis. Seules quelques bandes verticales paraissaient pouvoir être sauvées, mais il était nécessaire qu'elles soient bordées de raidisseurs en bon état, condition encore plus restrictive, mais non impossible.

La restauration s'est poursuivie en tenant compte des expériences des précédentes campagnes. La mise en œuvre s'est attachée aux aspects de l'ouvrage initial : rétablissement des caprices du béton (nids de cailloux, coulures entre coffrages), des irrégularités des claustras, des joints parfois tirés au fer ou parfois beurrés (ce qui révèle plusieurs mains dans l'exécution). La reconstitution du fac-similé s'est attachée à rétablir dans toute la mesure du possible la richesse des aspects et des mises en œuvre, tout comme les patines et usures observées dans les parties exposées, contrastant avec les parties protégées.

Autres matériaux, autres difficultés : les parpaings de ciment utilisés en remplissage entre les ossatures du clocher et des travées voisines, ou dans la partie inférieure des murs latéraux et appareillés deux à deux suivant une alternance verticale et horizontale, à vocation décorative, étaient en apparence assez bien conservés ; ils souffraient d'épaufrures, de pulvérulences et de desquamation par plaques. La restauration ponctuelle par greffes s'avéra peu concluante sur le plan de l'aspect car impossible à intégrer aux caractères de surface très irréguliers et variables d'un parpaing à l'autre. La solution du remplacement total par un enduit de substitution avec joints

incisés et reconstitués s'avérait être la plus fidèle à l'architecture, et avait été adoptée lors des premières campagnes du clocher.

Plus complexes, les parties de soubassement construites sous le chevêt du fait de la forte dénivellation, avaient été mises en œuvre avec des parpaings de qualité médiocre, hourdés sans soin par assises horizontales et joints sommairement cimentés. Le caractère hâtif, voire "brutaliste", de cette exécution, contrastant avec les parties hautes plus soignées, est révélateur d'un ouvrage destiné à être recouvert d'un enduit, mais inachevé pour des raisons inconnues (financement ?)... L'état sanitaire fort heureusement satisfaisant sous le chevêt s'était avéré catastrophique sous l'élévation droite, nécessitant d'adopter la formule de substitution employée sur le clocher. Avec beaucoup de précautions, il a été possible d'obtenir un aspect différent pour chaque parpaing fictif ; mais l'imitation des joints maladroits et "hâtifs" n'a pas été aussi concluante : il est plus facile apparemment de reproduire des matières que des gestes.

LES DIFFÉRENTES INTERVENTIONS

Après cinq campagnes de travaux, échelonnées sur neuf années et dirigées par quatre architectes, la restauration extérieure de l'église du Raincy s'achève. On aura observé sur cette opération d'incontestables difficultés, liées pour l'essentiel au caractère de cette architecture et des techniques de constructions utilisées pour la réaliser. La conservation des ouvrages en béton armé est un sujet qui, jusqu'ici, s'est peu présenté dans le domaine de la conservation des monuments historiques. D'une part, parce que les œuvres architecturales construites dans ce matériau sont, de façon très sélective et récente, fraîchement rentrées dans le "club très fermé" des monuments classés. L'expérience à leur sujet est donc limitée et n'a pas donné lieu à des confrontations mutuellement enrichissantes susceptibles de faire naître une méthode d'approche. D'autre part, parce que ce matériau est d'une modernité toujours d'actualité, voire même considéré encore d'avant-garde. Les réparations dont il a fait l'objet ont employé la technologie moderne des produits courants : enduits, ciment, résines, etc. Mais de restauration, rien, si ce n'est une technique jeune encore et peu développée. Les interventions ont fait apparaître les mêmes réflexes que les monuments en pierre : substitution, brutalisme des interventions, lisibilité et "franchise" de l'aspect final... puis, à l'égal de l'attention portée depuis peu et de façon accrue sur la "peau" des édifices, la conservation des épidermes (empreintes de coffrage, granulométrie, vibration des surfaces, etc.) est aujourd'hui recherchée et figure parmi les composantes essentielles de la restauration. Mais, plus profondément, il s'agit avant tout d'authenticité, et peut-être sommes-nous devant des ouvrages qui sont parmi les plus signifiants de l'histoire des techniques et donc de l'architecture ; à l'inverse de la pierre ou du bois, ici tout est fabriqué : armatures, coffrages, coulage portent l'empreinte de la main de l'homme. Et les raisons qui ont présidé à la perte des premiers monuments en béton (mauvaise composition des liants et agrégats, mauvaises mises en œuvre, mauvaise conception avec défaut de dilatation ou d'évacuation des eaux) sont justement la marque de leur caractè-

re d'exception, de prototype, cela même pour quoi on devrait tendre le plus possible vers leur conservation totale.

Virtuellement condamnés à la naissance, ils ne devront leur salut provisoire qu'à l'exécution d'un fac-similé ; mais ils attendent l'acharnement thérapeutique qui tirera son succès des techniques de pointe : déjà, la chimie des ciments et des résines met au point des solutions de régénération, et le traitement non destructif des fers corrodés sera peut-être résolu grâce aux applications de l'électri-

cité ; les exigences de la conservation sont le moteur de l'évolution des techniques. Bien que le regard qui se pose sur les monuments en béton ne fixe qu'un patrimoine qui reste dans une sorte de ghetto, à la porte du patrimoine consacré et reconnu, leur admission se fait peu à peu. Mais entre-temps, ils restent particulièrement exposés et vulnérables.

Benjamin MOUTON
Architecte en chef des Monuments historiques

² 400 kg de ciment Lafarge CPJ 32,5R, 800 kg de gravillons roulés 5/15, 400 kg de sable 0,6, 400 l d'eau avec résine Acro-plast 93 (ou Sikalutex) diluée à 20 %.

Les origines du ciment en Dauphiné

Dans l'histoire de l'éclosion du ciment et du béton, l'Isère occupe une place méconnue mais tout à fait exceptionnelle. Ce département partage en effet avec le Boulonnais l'honneur d'être le berceau de ce nouveau matériau dans l'hexagone.

Plusieurs facteurs ont favorisé localement cette éclosion. Selon la formule de Joseph Vicat¹, elle est "[...] attachée en quelque sorte à son sol. C'est une véritable industrie locale, qui ne risque pas d'être déplacée [...] pour des raisons géologiques. Le département de l'Isère, en effet, présente des vallées profondes dont les flancs à jour permettent de rechercher facilement les bancs argilo-calcaires qui peuvent fournir des chaux et ciments, ce qu'on ne trouve pas ailleurs, notamment dans les pays de plaine ; les nombreux cours d'eau qui sillonnent les montagnes fournissent la force hydraulique nécessaire à la marche des artifices. Enfin, la qualité des charbons anthraciteux du bassin de la Mure convient très bien pour la cuisson [...]". Plusieurs couches calcaires firent l'objet d'une exploitation comme pierre à ciment : le Berriasien, essentiellement dans le massif montagneux de la Chartreuse, l'Oxfordien surtout au flanc du Vercors et au bord du Rhône, furent les plus recherchées et sont seules encore utilisées.

Les travaux scientifiques de Louis Vicat, qu'il choisit sciemment de ne pas protéger par des brevets, trouvèrent donc ici un terrain d'application choisi. Le principe des liants hydrauliques fut établi par les soins de cet ingénieur des Ponts-et-chaussées altruiste, dès 1817 et durant toute son existence il poursuivit des recherches sur les gisements de calcaires, la théorie des ciments brûlés, le durcissement des bétons... Or, Vicat était de souche dauphinoise et fort attaché à cette région qu'il revint habiter dès que possible. L'application pratique de ses travaux y prospéra par deux biais. D'une part son fils, Joseph, créa avec son appui la première fabrication locale de ciment artificiel en 1853, au Genevrey-de-Vif. Nous reviendrons plus loin sur la place prise depuis par cette firme dans l'industrie cimentière régionale et nationale. D'autre part, les découvertes de Louis Vicat devinrent accessibles à tous les Isérois qui s'intéressaient à ce domaine grâce à l'outil créé par l'un de ses amis, Emile Gueymard. Cet ingénieur des Mines, également très attaché au Dauphiné, ouvrit en effet en 1825 un "laboratoire dépar-

temental d'essai" où il analysait gratuitement tous les échantillons de sol, d'eau ou de roche qu'on lui amenait.

C'est dans ce cadre riche de potentialités que démarra en 1842 la toute première² cimenterie de l'Isère, sur le site de la Porte de France situé entre la ville de Grenoble de l'époque et le futur emplacement de Casamaures. Cette implantation précoce³ produisait du ciment naturel prompt. Elle est toujours en activité, ce qui en fait un cas exceptionnel de carrière souterraine urbaine. Les flancs du mont Rachais portent encore la trace des installations nécessaires à ce travail : des viaducs à différentes altitudes, les ruines imposantes de la station sommitale du câble de transport aérien (une prouesse technique en 1874), une partie de la soixantaine de fours installés à deux pas des fortifications de la ville...

À la suite de cette initiative se répandit une véritable fièvre de "l'or gris"⁴, les tentatives se multiplièrent et l'on compta jusqu'à trente-deux cimenteries dans le département. Durant ce grand essor, deux faits sont à noter particulièrement. D'abord l'importance de l'exportation qui envoyait les productions locales sur les chantiers ouverts tout autour de la Méditerranée et au-delà, jusqu'à New-York et Buenos Aires. Ensuite, l'originalité technique mise au point chez Vicat pour la fabrication du ciment artificiel, appelée la voie demi-sèche⁵. Mais ce type de produit n'était encore qu'une production mineure, le modèle de réussite régionale restait la Porte de France et son naturel prompt... et la firme Vicat suivit aussi la voie royale en créant l'usine de la Pérelle à Saint-Laurent-du-Pont (Chartreuse). En une quarantaine d'années, l'Isère devint le premier producteur français dans le secteur cimentier, une primauté aussitôt menacée par la longue crise qui s'ouvrit en 1885. Le coût du transport, la floraison de concurrents mieux situés, la fermeture de

² Un essai sans lendemain avait été tenté en 1835 à peu de distance, dans le vallon de Narbonne à partir d'échantillons analysés par E. Gueymard. La société, qui produisait un ciment à prise très rapide, fut dissoute au bout de quatre ans.

³ La première production industrielle de ciment naturel prompt fut tentée en 1827 à Pouilly-en-Auxois par Lacordaire, puis en 1832 à Vassy par Gariel.

⁴ Le terme "or gris" a été inventé par le sociologue Yves Nicolas dans son étude sur le sujet "L'or gris de Grenoble", *Le Monde Alpin et Rhodanien* n° 3/4, pp. 145-162, Grenoble, éd. Musée Dauphinois, 1987.

⁵ Sur ce point, comme sur beaucoup d'autres d'ailleurs, voir le travail fondamental réalisé par Madame Fegueux, *Histoire de la cimenterie de Grenoble et de sa région des origines à 1939*, maîtrise d'histoire non publiée, Université de Grenoble II, 1973.

¹ Lettre de Joseph Vicat, cimentier et président de la chambre de commerce, au préfet de l'Isère, en date du 25 août 1885.

marchés importants pour le ciment naturel prompt comme l'Italie ou la Suisse, autant de handicaps qui laminèrent les petits prospecteurs-exploitants, souvent rachetés alors par les plus grands. Seules les implantations les plus sérieuses, appuyées sur des capitaux solides, résistèrent.

Grenoble offrit un débouché supplémentaire fort bien venu en ces temps de crise. Récemment agrandie par la modification de ses fortifications⁶, la ville fit l'objet d'un ambitieux projet urbanistique initié par son maire, Edouard Rey, en 1881. Un "nouveau centre ville" appliquant les principes haussmanniens s'implanta sur le terrain vierge libéré par l'ancienne enceinte. Cette création, très homogène, se voulait une vitrine de la cité et de sa réussite économique, en partie basée sur l'usage de l'hydroélectricité. En rupture complète avec les pratiques architecturales locales et grâce à un éclectisme non tant de style que de matériaux travaillés "à la manière de" qui permettaient de substantielles économies, les façades affichèrent alors une floraison de motifs décoratifs qui les font toujours surnommer "les beaux quartiers". Le ciment, matériau de choix pour produire à bas prix des décors moulés imitant la pierre, le bois ou la brique, fut largement employé dans ce quartier neuf. Et pas seulement au siège des Ciments de la Porte de France⁷, véritable publicité en trois dimensions. On le retrouve aussi dans l'ancien faubourg ouvrier, devenu à son tour quartier et donc dégagé des servitudes militaires. Il se reconstruisit "en dur" tout en connaissant une rapide extension. Si les plans d'urbanisme rencontrèrent un relatif échec, le prix modique des réalisations en ciment assurait là aussi leur succès. Et les décors y font écho à ceux du "nouveau centre ville", soit dans la plus grande discrétion, soit dans l'amoncellement sans mesure.

Ainsi, à l'ère du métal triomphant, c'est le béton qui caractérise la construction grenobloise de la seconde moitié du XIX^e siècle. Mais cette adoption massive d'un matériau nouveau ne se justifie aux yeux des contemporains que par des avantages techniques peu ou pas perceptibles dans l'esthétique des bâtiments. On s'offre ainsi une apparence de pierre de taille pour un coût vingt-cinq fois moindre. Le moulage permet de préparer des blocs de "pierre factice" avec lesquels on montre les murs. L'architecte diocésain Alfred Berruyer se fait une spécialité de ces modules produits en série qu'il utilise partout. Un exemple : l'église Saint-Bruno (1874). Édifice néo-roman installé au cœur du quartier ouvrier, elle doit à cette technique son épiderme presque totalement guilloché ou mouluré. Toutes les fantaisies sont ainsi permises en de multiples exemplaires, comme en

témoigne la chapelle Notre-Dame Réconciliatrice⁸ ornée en 1876 d'arcs outrepassés et d'entrelacs.

Les répétitions et échos ornementaux, de façade en façade, de rue en rue, de quartier en quartier, sont largement encouragés par la pratique de la préfabrication. À l'ombre des cimentiers ou par reconversion progressive de staffeurs/plâtriers, des ateliers apparaissent dans la dernière décennie du siècle pour proposer sur catalogue des éléments d'architecture, des décors de jardin, des ornements de fontaine, et tout un vaste bric-à-brac allant de la tombe à la canalisation... entièrement en béton de ciment local naturellement. Grenoble dispose ainsi, sur ses trottoirs marqués d'estampilles de cimentiers, d'un mobilier urbain d'hygiène qui jalonne encore aujourd'hui les artères du "nouveau centre ville". Proposé par l'atelier Mollaret et Cuynat, cette vespasienne aux allures d'échauguette⁹ est à elle seule plus décorée que toutes les façades de la ville pré-révolutionnaire.

La concentration des cimenteries dans les mains de quelques firmes, amorcée au tournant du siècle, se poursuivit bien au-delà, jusqu'à ce que Vicat, par le jeu des fusions, achats et fermetures, se retrouve seul maître des sites industriels encore en activité dans les années soixante-dix. Cette domination s'explique par l'essor du ciment artificiel lent, spécialité maison, amorcé avant la première guerre mondiale. Cette reprise fut insuffisante pour sauver les productions les plus faibles en quantité et qualité : "le miracle du ciment indécomposable"¹⁰ chez Pelloux, par exemple, resta sans lendemain. Les travaux militaires puis les grands chantiers publics (barrages entre autres) en imposant l'usage de l'artificiel firent disparaître dans l'entre-deux-guerres toutes les autres variétés de ciment, excepté le naturel prompt devenu de plus en plus minoritaire. En matière d'architecture, ce tournant fondamental est matérialisé par une évolution stylistique tout aussi radicale : l'émergence d'une esthétique du béton cette fois nettement différenciée de l'héritage de la pierre. La tour, commandée à l'ingénieur Auguste Perret pour disposer d'un belvédère lors de l'Exposition internationale de la houille blanche et du tourisme de 1925, incarne par son matériau la continuité du recours au ciment dans la région mais, par sa ligne et son ornementation, elle proclame la fin de l'ère du ciment d'imitation.

Brigitte RIBOREAU, Anne CAYOL-GERIN
Association *Le fil d'Ariane*

⁶ Les dernières fortifications de Grenoble, place forte depuis l'Antiquité, furent érigées en 1875-1879. L'agrandissement ainsi réalisé vers l'ouest jusqu'au lit du Drac tripla la superficie de la cité intramuros en y englobant notamment le faubourg ouvrier et industriel. La commune étendit pour ce faire son territoire par rachat auprès de ses voisins.

⁷ Situé 28 cours Jean Jaurès, cet immeuble emblématique comporte un rez-de-chaussée traditionnel en pierre et une élévation de quatre étages en béton à base de ciment demi-lent. Conformément aux obligations réglementaires, les assises de balcon sont en calcaire. Le décor intérieur (caissons au plafond, moulures, dallage formant un tapis coloré) est à base de ciment également.

⁸ Cette chapelle occupe l'essentiel du rez-de-chaussée du couvent des Pères de La Salette, 12 rue Joseph Chanrion. L'immeuble entier appartenant à cet ordre missionnaire d'origine très locale présente des façades néo-mauresques.

⁹ Boris Vian a d'ailleurs laissé une évocation savoureuse de ces "somp-tueuses pissotières à une personne [...] en forme de tour creuse échauguette. On est debout sur un petit piédestal. La tôle de protection est cependant un peu basse mais ça donne de la noblesse à celui qui officie".

¹⁰ Il s'agit d'un ciment résistant à un environnement corrosif.

Un prototype d'architecture orientaliste en béton moulé : La Casamaures à Saint-Martin-le-Vinoux – Isère

L'ORIENTALISME À GRENOBLE

L'orientalisme exacerbé de la villa Casamaures n'est pas un unicum, lubie d'architecte ou passage de propriétaire illuminé. Il s'agit d'un phénomène durable qui trouve son apogée dans la seconde moitié du XIX^e siècle – rappelons que les Dauphinois Joseph Fourier et surtout Champollion ont participé activement à l'expédition Napoléonienne d'Égypte –.

Le domaine des Arts Plastiques est un vecteur de ce mouvement vers l'orient, avec la production de nombreux peintres voyageurs. En effet, dès 1830, le voyage en Orient fait partie du circuit de formation des jeunes peintres. Mais cela constitue souvent une simple étape nécessaire à la reconnaissance par les milieux académiques comme l'était précédemment le voyage à Rome.

Citons Achard et Debelle, deux peintres Grenoblois qui séjourneront en Égypte avant d'être reconnus et promus par l'institution.

Citons également le rôle essentiel de l'armée et des missions religieuses dans la colonisation, avec pour corollaire l'apport des connaissances, d'objets et donc d'un goût du public pour l'Orient et ses représentations. Grenoble est une place frontière de première ligne jusqu'en 1860 : les nombreux militaires qui y séjournent véhiculent des souvenirs de l'Orient récemment colonisé.

C'est à un militaire, le colonel de Beylié qu'est due la création au musée de Grenoble d'une salle orientale qui portera son nom. Un autre militaire, le Maréchal Randon, Sénateur, Gouverneur d'Algérie puis Ministre de la guerre, fait édifier en 1865 une chapelle, en forme de marabout algérien que l'évêque de Grenoble consacre en 1866. Le maréchal s'y fait enterrer en 1871.

Un autre évêque, Monseigneur Fava, jouera un rôle déterminant dans la diffusion de l'orientalisme. Après avoir été missionnaire pendant vingt-cinq ans, successivement à la Réunion, à Zanzibar, puis à la Martinique, il sera nommé évêque de Grenoble en 1875, il imposera le style mauresque pour la construction de l'étonnante église Notre-Dame Réconciliatrice, mêlant une façade à baies outrepassées et une structure intérieure métallique, gage de modernité.

Une frange de la bourgeoisie n'est pas insensible à ce courant, mais rares sont les propriétaires qui franchiront le pas du simple intérêt pour un phénomène de mode, pour

s'investir dans le choix durable de la commande d'une œuvre architecturale orientaliste pleinement assumée.

LA CASAMAURES, FOLIE ORIENTALISTE

C'est ce choix que fera à partir de 1855 Joseph Jullien, entrepreneur de messagerie, pour l'édification d'une maison d'agrément à Saint-Martin-le-Vinoux, la villa "Les Magnolias", plus tard dénommée La Casamaures.

Cette construction se distingue par un choix stylistique très affirmé, et l'utilisation du ciment pour sa construction. Sur un terrain acquis en 1855, le propriétaire fait édifier une maison en forme de petit palais à deux niveaux, élevé au sommet d'une composition pyramidale de terrasses successives.

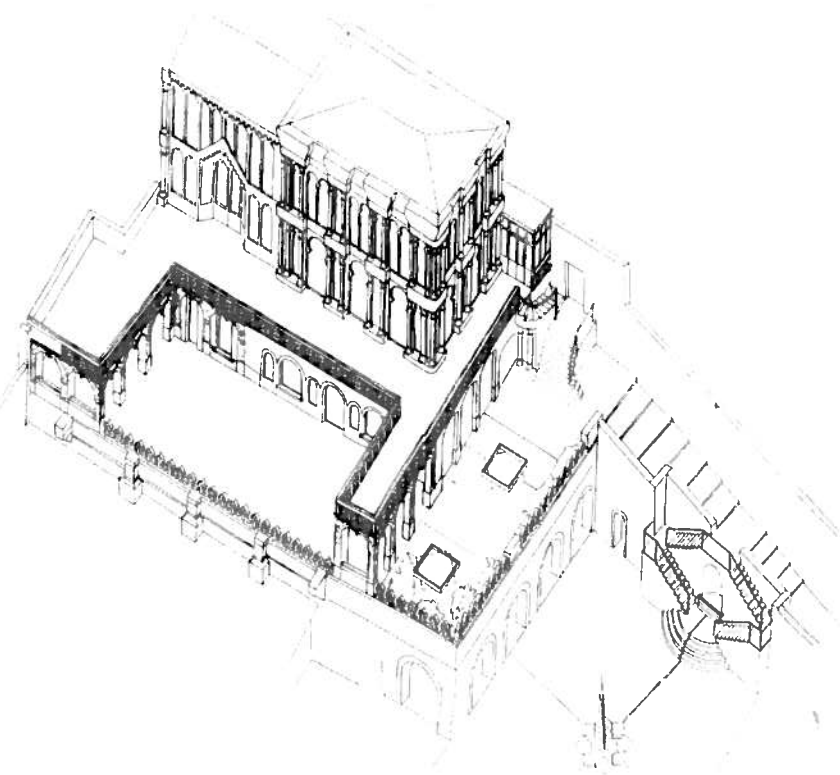
En 1876, la villa est achevée, entourée de son parc et baignée par les eaux de l'Isère. La structure à colonnes, très ajourée, met en relation étroite l'intérieur de la maison avec son environnement qu'elle domine. Le décor intérieur puise également dans le registre orientaliste pour les peintures et les vitraux, dont les teintes se déclinent en teintes chaudes ou froides suivant l'orientation. L'auteur et les sources ne sont pas élucidées à ce jour, mais on distingue des emprunts à l'art arabo-andalou, notamment l'alhambra de Grenade.

La propriété connaîtra un sort tragique après 1878, quand, ruiné par sa folle entreprise, Jullien devra la vendre. Elle sera ensuite dépouillée de son parc en 1951, puis transformée en bureaux et enfin abandonnée et squattée de 1966 à 1981.

En 1981, un nouveau propriétaire s'attache à redonner vie à la villa, et obtient successivement l'inscription en 1985, puis le classement en 1986.

LA RESTAURATION DES TERRASSES

La problématique de restauration a concerné dans la dernière période la requalification de l'orangerie et des terrasses, dépouillées de leur sol et de leur décor. En effet, les terrasses formaient, avant le démantèlement de la propriété, une transition entre le parc arboré et la villa, une séquence passant du végétal au minéral, la terrasse inférieure alliant un revêtement en ciment et des plantations suspendues, avec une circulation d'eau.



Projet d'aménagement des terrasses

Cette terrasse, très instable, a été consolidée. Un complexe d'étanchéité a été mis en place afin de mettre hors d'eau les voûtes de l'orangerie située au-dessous. Des réservations ont été aménagées pour la restitution de jardinières. Le sol a été rétabli au niveau d'origine retrouvé par sondage.

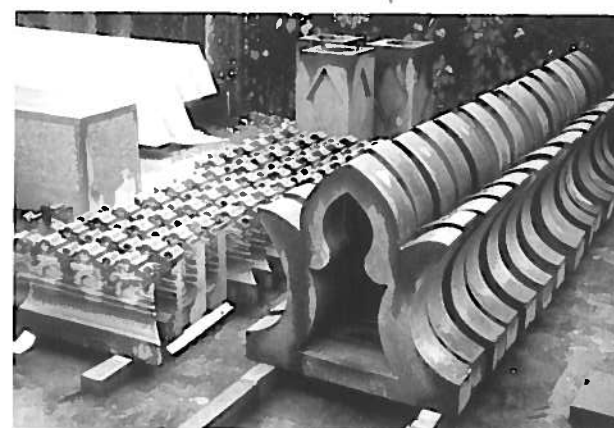
Ces travaux urgents de stabilité ont été complétés par une opération pour la restitution des balustrades et bordures décoratives. Ces dernières étaient indispensables architecturalement, à la finition de la terrasse ainsi qu'au plan de la sécurité des personnes.

Les balustrades ont pu être restituées grâce à des vestiges et la documentation photographique.

Le moulage a été confié à la Société Avenir, l'un des derniers ateliers de préfabrication artisanale, dont l'activité se perpétue depuis plusieurs générations.



Moule en béton/élastomère



Pièces préfabriquées en attente de pose

Sur la base de l'épure architecturale, un modèle en plâtre est réalisé.

Cinq moules ont été réalisés pour l'ensemble des pièces, soit en béton, soit en élastomère.

Le coulage du béton est réalisé pièce par pièce (un par jour et par moule), suivant le dosage défini par le laboratoire Vicat.

Les pièces terminées sont stockées en attente de pose. En quelques jours, le béton acquiert sa teinte caractéristique du fait de la carbonatation naturelle. L'épiderme est débarrassé de l'excès de laitance par un léger acidage, cela supprime le glaçage.



Four chargé en pierre et en charbon

L'une des difficultés était de rétablir la balustrade suivant son dessin originel, et d'assurer le respect de la norme sur les garde-corps, a priori incompatible avec ce dessin, très ajouré.

Afin de ne pas dénaturer le dessin, nous avons projeté le doublage de la balustrade par une haie vive, l'ensemble étant assimilable à un garde-corps épais conforme à la norme et acceptable par les services de sécurité, la maison étant partiellement un établissement recevant du public.

En conclusion, cette opération nous a permis d'une part d'appréhender opérationnellement un matériau très proche mais paradoxalement méconnu, et d'autre part de régénérer des savoir-faire spécifiques, très ancrés localement et faisant partie du patrimoine technique et industriel qu'il convient de maintenir en vie par des chantiers. Il a été choisi d'intervenir sur une partie secondaire de l'édifice et par une restitution afin de conférer un caractère expérimental et réversible à cette première opération.

J'insisterai enfin sur la valeur d'une action patrimoniale, dès que se conjuguent l'enthousiasme d'un propriétaire privé, la productivité d'industriels et d'entrepreneurs motivés, aidés par des services de l'État dans le cadre de la loi de 1913.

François BOTTON

Architecte en chef des Monuments historiques



Présentation des éléments terminés avant scellement

La Casamaures Le matériau béton

ÉTUDE DES MATÉRIAUX CONSTITUANT LE CIMENT MOULÉ DE LA CASAMAURES

L'étude a été réalisée à partir d'un élément de balustrade, déposé quelques années auparavant, et qui possède les mêmes caractéristiques d'aspect interne et externe que les bétons constitutifs des autres parties de l'ouvrage.

Constitution des bétons

- Granulats silico-calcaires de dimensions comprises entre zéro et trente millimètres, de couleur grise. Ils sont caractéristiques des sables et graviers extraits de la rivière Isère qui coule au pied de la Casamaures. On peut noter la faible proportion de granulats intermédiaires (5/10).

- Ciment : d'un point de vue minéralogique, et compte tenu de l'âge de l'échantillon, on s'aperçoit que les cortèges d'hydrates sont très proches de ceux constitués par le ciment naturel prompt, toujours fabriqué actuellement et dont la carrière d'extraction se situe à cinq cents mètres de la Casamaures. Toutefois, ce ciment devait être cuit à une température légèrement supérieure à celle utilisée pour la fabrication des ciments actuels.

Mise en œuvre du béton frais

- Les granulats ont un sens privilégié : le béton était de consistance plastique et a été "vibré" ou tout au moins "remué".

- La coupe montre une zone centrale grise et une zone périphérique ocre. Contrairement aux apparences, il ne s'agit pas d'un béton recouvert d'un enduit. En effet, on distingue des granulats présents dans la zone périphérique. Quant à la différence de couleur, elle est due à la carbonatation du béton (cette dernière augmente d'ailleurs en épaisseur dans le temps).

Nota : Sur des bétons réalisés avec des ciments artificiels, la différence de couleur n'est pas visible à l'œil (seul le test à la phénolphthaleine dénonce l'épaisseur de carbonatation).

Ferraillage

Il est inexistant dans les éléments de la balustrade.

Nota : Un examen au pachomètre par des étudiants de l'IUT Génie civil sur quelques colonnes du bâtiment, n'a pas révélé l'existence de ferraillage. Cette observation devra toutefois être vérifiée en tout lieu. Dans leur album de travaux, les ciments de la Porte de France (autrefois propriétaire des usines situées à côté de la Casamaures) montrent des plans d'éléments moulurés importants dans lesquels le ferraillage est absent¹.

Mise en place

La répartition relativement homogène des granulats plaide pour un coulage dans des moules de petites dimensions. La complexité des formes des balustrades ne permet pas un coulage en un seul bloc.

Nota : Une observation technique minutieuse du bâtiment réalisée avec l'aide d'entreprises montre que les éléments porteurs ainsi que la majorité des éléments décoratifs sont, selon toute vraisemblance, préfabriqués, puis montés in situ... Technique qui a d'ailleurs prévalu dès l'origine.

Ceci s'explique par l'emploi de ciments naturels dont les prises rapides (5' pour le ciment prompt, 30' pour le ciment demi-lent) invitaient à une utilisation plus rationnelle en atelier.

Les cimentiers de l'époque ont d'ailleurs appelé ces éléments "pierres factices en ciment mouluré". Nous n'avons aucune indication sur le type de moule utilisé, mais l'on sait que ceux-ci étaient alors généralement en bois ou... en ciment.

QUELQUES REPÈRES HISTORIQUES À PROPOS DES LIANTS HYDRAULIQUES

- Si les Égyptiens utilisèrent un liant à base de plâtre comme support de leurs peintures et décorations, ce sont les Grecs, puis les Romains, qui utilisèrent la chaux, obtenue par calcination de pierre calcaire non argileuse. Sortant du four, cette pierre s'éteint sous l'action de l'eau en se pulvérisant. Ce matériau était conservé à l'abri de l'air sous forme de pâte et était utilisé au fur et à mesure des besoins. On le gâchait avec du sable et des gravillons pour hourder les pierres. Le calcaire se reformait par combinaison avec le gaz carbonique de l'air. Malheureusement, les qualités de résistance étaient médiocres.

¹ *Album travaux*, ciment Porte de France, M. Viallet, 1900.

Bibliographie

1. Fegueux, *Histoire de la cimenterie de Grenoble*, Maîtrise d'histoire, Grenoble, 1973.
2. Nicolas, "L'or gris de Grenoble", *Le monde alpin et rhodanien*, Musée Dauphinois, Grenoble, 1987.
3. Riboreau B., Cayol-Gerin A., "Grenoble d'or gris", *Alpes magazine*, mai 1993.
4. *Guide du Patrimoine Rhônalpin*, n° 25, "L'or gris du grand Grenoble", Lyon, 1995.
5. Mecheloukh M., *La mode orientaliste : Grenoble et sa région au XIX^e*, Maîtrise d'histoire de l'art, Grenoble, 1996.

• Un architecte romain Vitruve les améliora en incorporant des morceaux de tuile ou de la tuile pulvérisée fabriquée dans la région de Pouzzoles (d'où le nom de Pouzzolanes).

Ces mortiers étaient plus étanches et avaient une meilleure résistance à long terme. On les appela improprement "ciments romains".

Le savoir-faire romain se perd au temps des invasions barbares. Seuls les vestiges restent les témoins de la technique perdue.

• Avec le XVIII^e siècle, celui des lumières, s'ouvre une ère scientifique nouvelle. En 1812, un jeune ingénieur, Louis Vicat, est chargé de la construction du pont de Souillac, sur la Dordogne.

Il réalise l'analyse des liants hydrauliques habituels, fait la synthèse de ces matières et, reconstituant un liant hydraulique, il élabore la véritable théorie de l'hydraulicité.

C'est l'invention du ciment artificiel. En 1817, Vicat annonce dans les annales de chimie le résumé de ces travaux, mais ne prend pas de brevet.

En 1824, un anglais, Apsdin, dépose un brevet pour un ciment baptisé Portland. C'est exactement la méthode de Vicat, mais il y précise la température de cuisson : 1450°. Au sortir du four, cette pierre ne se pulvérise pas au contact de l'eau comme la chaux. Elle revêt un aspect granuleux, "le clinker" et doit être soumis au broyage mécanique avant utilisation.

Après les travaux de Louis Vicat, l'industrie des chaux hydrauliques se développe rapidement à l'étranger comme en France, en distinguant plusieurs variétés de liant. Pour simplifier, on peut citer :

1. Les ciments naturels qui résultent de la cuisson d'une seule roche naturellement dosée (calcaire argileux)
2. Le ciment artificiel s'obtient par la cuisson de deux matières premières distinctes, le calcaire et l'argile qu'il faut doser de manière très précise et mélanger intimement avant cuisson.

Le ciment naturel prompt (constitutif de la Casamaures)

Le ciment naturel prompt résulte de la cuisson, à température modérée (800° à 1200°), d'un calcaire argileux de composition régulière, extrait de bancs homogènes, suivie d'un broyage très fin. Cette fabrication particulière entraîne la formation de constituants caractéristiques, avec la présence de silicates de calcium, d'aluminate de calcium et de sulfoaluminate de calcium.

La composition minéralogique du ciment prompt naturel lui confère des propriétés particulières de prise et durcissement rapide pour le scellement, de prise réglable pour les maçonneries, les travaux entre marées, de faible perméabilité pour le cuvelage, de tenue aux eaux acides pour les industries, les fondations.

Pour plus de facilité, on réalise ces mortiers ou bétons avec un retardateur spécifique à ce ciment.

Aujourd'hui, ce ciment est normalisé NFP 15314 et agréé prise mer (PM).

Historique du ciment naturel prompt

La première fabrication industrielle du ciment prompt naturel date de 1842 au lieu dit Porte de France à

Grenoble, situé à cinq cents mètres de la future "Casamaures". La découverte du "filon" de pierre à ciment fut réalisée par M. Breton, capitaine du génie, sur les lieux même où son beau-père exploite une carrière de chaux. La légende raconte qu'ayant cuit par erreur une pierre située à côté du banc de chaux, celle-ci fut jetée après broyage. Ce jour étant pluvieux, on découvrit alors l'étonnante rapidité de prise de la poudre et ses propriétés originales.

La fabrication du ciment prompt naturel se développe ensuite dans toute la France, notamment dans les régions de Marseille, d'Aix, de l'Aveyron, des Hautes-Alpes, de la Côte-d'Or, du Lot, de la Garonne, de la Dordogne.

La qualité de ces ciments était variable d'une usine à l'autre. Celle-ci variant nécessairement en fonction de la composition des calcaires argileux. Les ciments prompts naturels des exploitations situées sur le même banc géologique que celui de la Porte de France étaient jugés les meilleurs car de composition très régulière en argile.

Au début du siècle, le ciment prompt naturel était très utilisé pour l'adduction d'eau et très apprécié notamment dans les villes où les eaux sont très pures : Vannes 1913, Lorient 1911, Saint-Brieuc 1897, Rennes 1882, Limoges 1876, etc. Des milliers de kilomètres de tuyaux étaient alors moulés sur les chantiers mêmes.

De nombreux réseaux d'assainissement étaient construits avec ce même ciment sous forme de grands ovoïdes coulés sur place, ou en enduit. Les raisons en sont essentiellement les qualités d'étanchéité et de résistance à l'attaque des eaux pures que possède ce ciment.

L'emploi le plus spectaculaire est la spécialité iséroise d'imitation de la pierre : l'avantage ? Ces "pierres factices moulurées" étaient bien moins chères que les pierres taillées. Elles empruntaient à ces dernières leur apparence, et à la tradition architecturale ses motifs. Elles s'offrent aujourd'hui encore en ornement de façades encore bien conservées dans nombre de grandes villes du Sud-Est (Lyon, Grenoble, Valence), mais aussi dans des bourgs plus modestes (édifices cultuels ou administratifs).

Nota : Plusieurs types de ciment naturels, fabriqués à partir du même banc de pierre ont été utilisés au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle.

Le produit cuit se compose de fragments jaunâtres et de fragments noirs ayant subi la fusion pâteuse. Autrefois, les premiers servaient à la fabrication du ciment prompt, les seconds à la fabrication du ciment naturel demi-lent. On peut citer également un troisième ciment issu du mélange artificiel du produit surcuit et de grapiers de chaux.

En ce qui concerne la fabrication de pierres factices, les différentes recherches que nous avons effectuées ne permettent pas d'affirmer la prépondérance d'un type de ciment. Néanmoins, il semble que le mélange ciment prompt/ciment demi-lent (pour modifier les temps de prise) était le plus courant. Les dosages se situaient généralement autour de 500 K/m³.

² Dunod, 1989, *Fabrication et propriété des ciments de l'Isère. Les ciments Porte de France*, Viallet, 1900.

Par contre, la fabrication des moulures linéaires, en encadrement de fenêtre par exemple, n'était possible qu'avec du prompt. Le mortier était projeté sur le mur puis immédiatement passé au profil.

EN CONCLUSION

• Le matériau constitutif de la Casamaures (structure et motifs décoratifs) est bien le béton, le terme ciment moulé étant abusif.

• L'utilisation du béton de ciment naturel sous forme de moulage préfabriqué, inaugure régionalement l'ère de la pierre factice, développée par la suite par l'architecte diocésain Berruyer, ainsi que l'ère des éléments moulés de toute nature vendus sur catalogue par nombre de préfabricants grenoblois aux XIX^e et XX^e siècles.

• On peut noter la bonne conservation de ces bétons au bout de cent quarante ans : ceci est dû à la résistance de ce ciment aux atmosphères acides. On note seulement la

disparition d'une pellicule de surface qui laisse deviner la structure gravillonnaire dans les endroits les plus exposés. En conséquence, la surface reste relativement lisse et laisse glisser la pollution des villes. L'absence de ferrailage (et des conséquences de la rouille sur des fers situés trop près des surfaces) contribue sans doute à la pérennité de l'ouvrage.

La société Vicat a déjà contribué par le passé à la restauration de monuments publics ou privés¹ réalisés en ciment naturel prompt, tout en s'attachant à retrouver les techniques anciennes. Dans le même temps, des artistes réalisent chaque année sculptures ou panneaux décoratifs modernes avec ce matériau retrouvé.

La reconstruction des balustrades sur la terrasse de la Casamaures est le prochain chantier de cette entreprise.

Dominique PETELAZ
Centre technique Louis Vicat
L'Isle d'Abeau - Isère

¹ Eglise de Chozeau (38).

Le Corbusier : archéo-ingénierie 1986-1996 à la Cité Radieuse de Marseille

LA "CITÉ RADIEUSE" DE MARSEILLE, C'EST

- sur un terrain de 3,684 ha, un bâtiment de 135 m de longueur avec une épaisseur inusitée de 24 m, un peu plus de 50 m de hauteur au niveau du toit-terrasse ;
- une masse totale de 50 000 t environ reposant sur trente-quatre piliers ;
- trois cent vingt-et-un appartements de quatorze types différents ;
- dix-neuf niveaux, sept "rues" longitudinales, trois ascenseurs, deux monte-charges, quatre escaliers de secours ;
- un hôtel-restaurant, un gymnase, une école maternelle, un théâtre en plein air, une supérette, une boulangerie pâtisserie, des bureaux, etc.

Actuellement, environ un millier d'habitants... un village en plein ciel...

Un mode de vie qui doit beaucoup à son concepteur.

Pour Le Corbusier, le but à atteindre était de "fournir dans le silence et face au soleil, à l'espace, à la verdure, un logis qui soit le réceptacle parfait d'une famille ; dresser dans la nature du Bon Dieu, sous le ciel et face au soleil, une œuvre architecturale magistrale, faite de rigueur, de grandeur, de noblesse, de sourire et d'élégance". (*L'homme et l'architecture* n° 11-14, 1947.)

Un tel langage demeure inhabituel au regard de bon nombre de réalisations où le résultat provient seulement de méthodes à la fois statistiques et arithmétiques et l'utilisation de vieilles recettes de mauvaise cuisine.

Avant de présenter la partie technique concernant le béton armé, il est bon de rappeler quelques faits.

La "Cité Radieuse" de Marseille est une œuvre de l'État, qui a permis à Le Corbusier d'exprimer librement ses théories sur l'habitat : "libre de toute réglementation" "sans règlements – contre les règlements désastreux".

Le maître d'ouvrage qui a osé passer commande était Raoul Dautry (1880-1951) lorsqu'il était ministre de la reconstruction et de l'urbanisme.

Raoul Dautry, ingénieur, ancien élève de l'école polytechnique privilégiait son devoir social envers ses concitoyens. Il convient de rappeler son action pour les "cités-jardins", la "Ligue contre les taudis", sa participation aux travaux préparatoires de la "loi Loucheur", etc.

On aime à évoquer le "Siècle des lumières" ; il faudrait honorer l'action des "techniciens-éclairés" de l'Après-Guerre dans les cabinets de Raoul Dautry et d'Eugène Claudius-Petit, et dans les délégations locales.

La commande de l'unité d'habitation Le Corbusier dite de grandeur conforme date du mois d'août 1945, la construction devant durer douze mois.

La première pierre sera posée le 14 octobre 1947, l'inauguration aura lieu le 14 octobre 1952.

Il ne faut pas oublier qu'outre des difficultés d'approvisionnement inhérentes à l'immédiat après-guerre, diverses actions de dénigrement soutenues par des campagnes de presse ont notablement retardé l'avancement des travaux.

Certains avaient même imaginé d'arrêter le chantier alors que le gros-œuvre n'avait pas encore atteint sa plénitude. En réponse à ses détracteurs, Le Corbusier écrivait le 15 juillet 1948 :

"Je ne puis pas, au boulevard Michelet, mettre debout un être vivant chez qui la tête existerait mais pas l'estomac, dans lequel un demi-poumon fonctionnerait et un intestin complet, dans lequel la boîte crânienne serait vide, dans lequel le système artériel serait aménagé mais démuné de sang, etc. Un vrai monstre !"

Il faudra toute l'énergie et le soutien indéfectible de Eugène Claudius-Petit, ministre de la reconstruction et de l'urbanisme, et grand ami de Le Corbusier, pour parvenir à livrer un immeuble quasiment achevé, sinon totalement complet.

Le gros-œuvre de la "Cité Radieuse" de Marseille est en béton armé, car les conditions de l'époque ne permettaient pas d'utiliser l'acier, comme cela se faisait habituellement aux États-Unis.

La vie est faite d'idées, de projets toujours généreux, et de contraintes qu'il faut savoir surmonter.

Lorsqu'on perçoit et comprend la proportion, la modénature, la texture et la "peau" du béton armé mis en œuvre à Marseille, et la poésie qui se dégage de ce matériau, souvent ressenti comme froid, voire "brutaliste", on ne peut qu'admirer le résultat.

LA "PEAU" DU BÉTON

On y voit les traces de la scie.

On y voit les veines et les nœuds qui rappellent les branches.

On peut même reconnaître l'essence du bois.

La couleur change constamment sous le soleil et la lumière.

Des gravillons ou des galets sont inclus dans la "peau" des éléments préfabriqués en usine. Ils font des points blancs et des ronds au-dessus de la surface porteuse et l'ombre tourne autour.

Dans le hall d'entrée, on a même incrusté des "fantômes" de coquilles Saint-Jacques, comme dans les édifices du chemin de Saint-Jacques de Compostelle.

Dans la façade Est, Le Corbusier a voulu incruster en bas-relief la trace du "Modulor" qui donne l'explication de la proportion, qui délivre même son message aux visiteurs qui ne savent pas lire.

La "peau" du béton peut être ressentie comme rugueuse ou douce au toucher, comme celle d'un être vivant, froid en hiver, chaud en été.

On y voit les fissures, les cales d'épaisseur du coffrage, et le béton a coulé entre les planches mal jointes.

On y voit les reprises lors du coulage, les planches ont joué lors du pilonnage, et le béton caverneux a créé des nuages.

Le béton, c'est du gravillon, du sable, du ciment et de l'eau mélangés, et cela pourrait s'arrêter là si l'exécution avait été parfaite.

Heureusement, tous les défauts montrent aussi le résultat du travail des hommes et non celui impersonnel de robots.

Sous la lumière, on voit la nature, minérale et végétale, assemblée par la main de l'homme.

Après les habituelles dix premières années, et plus, pour tenir compte des aléas et prorogations des délais de procédures consacrées à essayer de faire valoir les droits de la garantie décennale, puis, après près de deux décennies durant lesquelles l'habitude de laisser en l'état, sans entretien, sous prétexte d'économies, est bien prise, une campagne de réfection ponctuelle des éléments préfabriqués est lancée peu avant 1980 avec les moyens de l'époque : résine et mortier de ciment.

Heureusement, aucun accident corporel n'a eu lieu entre-temps ! Ces reprises, parfaitement reconnaissables aujourd'hui, étaient précédées d'une purge avant réfection sommaire.

À l'approche des premières quarante premières années, le vénérable béton, qui était devenu "historique" demandait un traitement général.

Le découpage du scénario d'intervention tenait avant tout compte de l'urgence au regard de la sécurité des personnes.

C'est ainsi que la première tranche intéressera la tour dite des ascenseurs, édifiée au-dessus du toit-terrasse.

Cette tour d'environ vingt mètres de hauteur abrite sur deux niveaux les moteurs et les organes de commande et de régulation des trois ascenseurs et d'un monte-charge, au-dessus du palier d'accès au toit-terrasse.

Au-dessus se trouve un bassin de 100 m³ environ, servant à alimenter en eau potable les niveaux supérieurs (de la cinquième rue au toit-terrasse), et de réserve pour le réseau de lutte contre l'incendie.

La "peau" du béton devait présenter un aspect brut montrant la texture des planches du coffrage : veines et nœuds du bois.

Les planches étaient disposées verticalement ou horizontalement en formant des polygones réguliers séparés par des joints épais. Après décoffrage, le béton, caverneux par endroits, présentait des ventres et des flèches importants, et bon nombre d'aciers des treillis étaient apparents en surface.

Compte-tenu des difficultés du chantier, la solution adoptée par le Maître consista à faire recouvrir le tout par un enduit au mortier de ciment, des joints largement espacés devaient rappeler le tracé régulateur prévu à l'origine.

Compte-tenu des techniques de l'époque et d'une absence de préparation du support, l'enduit s'était détaché par plaques de surface souvent importante.

Il y avait dans ce cas un risque évident et immédiat pour la sécurité des personnes.

La deuxième tranche prendra en compte l'intégralité des façades verticales, horizontales et biaises, construites en béton armé coffré et coulé sur place (pilotis et "sol artificiel") et les éléments préfabriqués en usine (garde-corps, séparations entre les loggias et parties de façades aveugles – Sud-Est, Sud-Ouest – locaux techniques et clubs en façade Est, lames formant pare-soleil des niveaux sept et huit – rues commerçantes – et le splendide pignon Nord).

La finition consistera à remettre en peinture les joues des loggias, après avoir recherché et trouvé les teintes les plus proches possibles de celles d'origine, et en respectant le calepinage répartitif des couleurs d'origine et les modifications apportées par le Maître au cours du chantier.

La troisième tranche, la plus diverse, la plus complexe, donc la plus intéressante, concernait la remise en état des édifices bâtis en superstructure au-dessus du toit-terrasse : gymnase, cheminées de ventilation mécanique, cheminée de la chaufferie collective, jardinières, déshabilleurs, collines artificielles, crèche, rampe, escaliers et murs acrotères et du théâtre.

La quatrième tranche, à venir, concernera le local de collecte des ordures ménagères situé au Nord du jardin public.

Compte-tenu de la grande diversité des désordres rencontrés, variant souvent d'un élément à un autre, des limites des moyens techniques et modes d'intervention, et, dans certains cas, de l'émergence de nouveaux produits, ce chantier présente un panorama très complet du traitement des bétons des années cinquante.

Les pilotis, le hall d'entrée et le "sol artificiel" forment un support dont le béton armé a été coffré et coulé sur place.

Il en est de même pour l'ossature : poteaux, poutres, poutrelles des étages, ainsi que pour les éléments en superstructure du toit-terrasse.

Ce mode de construction a été utilisé pour tenir compte des limites des techniques et des difficultés d'approvisionnement de l'époque.

Les éléments en façades, du niveau 01 au niveau 17, ont été préfabriqués en usine avant d'être fixés définitivement.

La "peau" des éléments coulés sur place est un béton brut montrant les veines et les nœuds du bois de coffrage, la "peau" des éléments préfabriqués est une "mignonnette" montrant les galets insérés dans le béton.

LES CONTRAINTES

La carbonatation

Compte-tenu de la faible vitesse de propagation du phénomène, de l'état apparent des éléments, d'une confiance raisonnable dans la tenue de bétons qu'on peut qualifier de "rustiques", propre à ceux des années cinquante, et d'essais statiques effectués sur le site (belvédère), il fut décidé de faire l'impasse sur cette question.

Techniques de l'époque de la construction

Les désordres principaux proviennent de déplacements des armatures lors du compactage par pilonnage. Dans ce cas, il s'agit d'une mise en œuvre défectueuse de la part des entreprises, car les moyens techniques pouvant éviter ces désordres étaient bien connus depuis longtemps et utilisés constamment dans les ouvrages d'art. Le même problème se retrouve avec les bétons caverneux.

Pour les voiles minces coulés sur place (six centimètres d'épaisseur environ), il s'agit d'une insuffisance de protection des armatures au regard de l'atmosphère maritime (proximité de la Méditerranée).

Dans de tels cas, il a paru inconcevable de vouloir modifier l'épaisseur prévue à l'origine par l'architecte qui avait coté ses plans en utilisant le "Modulor". Ce problème se retrouve très souvent sur le toit-terrasse avec les murs des jardinières et du théâtre. Il paraît inconvenant

de vouloir modifier les proportions voulues par l'architecte dans un tel site.

En revanche, il peut paraître préférable de bousculer un peu les règles et les normes, ne serait-ce qu'en attendant de nouveaux produits ou modes d'intervention.

Esthétique

Le qualificatif de "rustique" précédemment utilisé est maintenu.

Le but poursuivi n'a jamais été de vouloir reconstruire un immeuble neuf. Le nettoyage préalable devait seulement permettre de vérifier intégralement l'état "sanitaire" du bâti avant toute intervention, de supprimer systématiquement les atteintes des pollutions incrustées dans la "peau" du béton, et tenter ainsi d'arrêter temporairement l'action en cours. Le traitement par hydrofugation retenu dans les parties où il s'avérait indispensable a été effectué pour retarder la pollution à venir. Le but poursuivi n'a pas été de donner l'impression du neuf, ni de tenter de vouloir réaliser certaines reprises ou travaux mieux que Le Corbusier, bien que ce soit techniquement possible sans grande difficulté.

Une patine a même été appliquée lorsqu'elle s'est avérée indispensable.

Ainsi, on rejoint parfaitement la déontologie propre aux travaux sur les monuments historiques et la nécessité pour la copropriété de revaloriser le bien commun des copropriétaires.

Après l'achèvement des travaux de reprise de la "peau" de la tour des ascenseurs, le chef d'équipe de l'entreprise Vivian et Cie, à qui il avait été recommandé de faire un travail montrant bon nombre de défauts d'aspect (nu imparfait, coulures entre les planches du coffrage, faux-aplomb, etc.) a déclaré : "Je n'ai jamais été payé pour exécuter un tel travail...".

Tout ce que nous pouvons dire au sujet d'un tel chantier ne peut donner tout au plus qu'une vue "stratosphérique" des travaux. La Cité Radieuse de Marseille est ouverte à tous et rien ne peut remplacer une visite in situ.

Richard M. BISCH
Architecte

Le Corbusier : archéo-ingénierie 1986-1996 à la Cité Radieuse de Marseille

LA SPÉCIFICITÉ DU SUJET

Faisant suite à la présentation effectuée au sujet de l'historique de l'opération, un rapide préambule est indispensable, pour tout ce qui concerne les travaux à cette période, la technique qui s'y rapporte, mais surtout leur éthique.

La note diffusée par Eric Pallot, pour définir le thème du colloque "Béton et patrimoine", précisait : "Évoquer l'utilisation du béton dans la restauration des monuments historiques". S'il devait s'agir "d'engager une réflexion sur l'emploi du béton aujourd'hui sur les chantiers monuments historiques", il apparaîtrait que le thème du colloque serait essentiellement d'évoquer des problèmes de structure d'édifices en pierre, auxquels le béton permet de nos jours d'apporter des solutions intéressantes.

La démarche sera un peu particulière, dès lors qu'il s'agit d'un édifice qui est lui-même en béton armé, et qui, de plus, figure depuis peu sur la liste encore restreinte des édifices en béton du XX^e siècle, classés monuments historiques.

L'œuvre de Le Corbusier y occupe une place privilégiée. L'unité de grandeur conforme, ou unité d'habitation de Marseille, ou encore Cité radieuse, a le privilège, en raison des travaux qui viennent d'y être effectués – ou se terminent – de présenter une confrontation sérieuse des abstractions de la théorie, de la rigidité des règlements et normes, et de la réalité de la pratique sur le chantier, dans un cadre bien défini – je cite encore l'énoncé du thème du colloque évoquant "les restaurations réalisées et les problèmes de conservation voire de dérestauration que posent certains édifices".

Nous voici parfaitement dans le sujet : la Cité radieuse, terminée en 1952, ayant été très rapidement le siège de désordres liés à des entrées d'eau, en raison d'une mise en œuvre défectueuse du béton en façade, avait fait l'objet d'une procédure devant le tribunal administratif. Il en avait résulté en 1965 une première intervention en restauration – ou plutôt en réparation – ; son image avait été gravement altérée par des films d'hydrofugation, qui avaient fait perdre en de nombreux points, l'aspect de l'épiderme initial en béton, si volontariste dans l'expression du matériau brut.

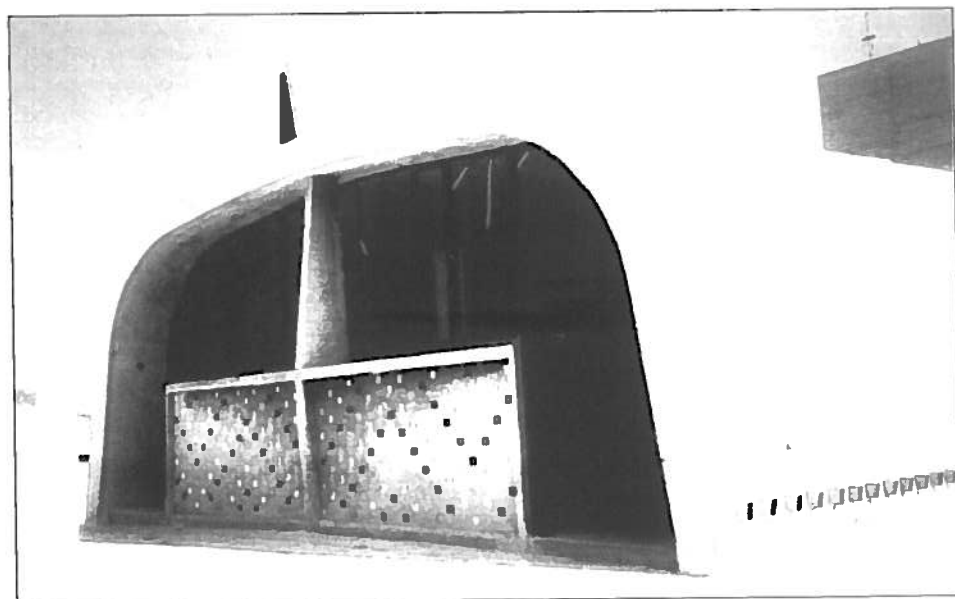
Ainsi, les interventions conduites entre 1986 et 1996 sur les façades ont-elles eu pour objet de remédier à de nouveaux désordres, mais aussi de "dérestaurer" pour revenir aussi près que possible des dispositions initiales. C'était aussi "débanaliser" l'œuvre, en débarrassant les parties concernées, de l'anonymat et de la systématisation des hydrofugations opaques.

Ce retour est envisageable dans certains cas. Il ne l'est malheureusement pas pour d'autres, en raison des moyens dont dispose la technique à ce jour. C'est bien là tout l'intérêt de l'analyse critique qui a été conduite au stade des études et tout au long du chantier.

Il est indispensable également de rappeler que cette analyse a pris en compte, avec la plus grande attention, les avis des divers intervenants hors Monuments historiques : l'avis du syndic administrateur d'immeubles, maître d'ouvrage délégué, soucieux de l'obligation de résultat et des garanties, l'avis d'un conseil syndical particulièrement motivé, bien conscient de la qualité de l'œuvre et de l'obligation de la maintenir, tout en supprimant l'origine des nuisances au moindre coût, l'avis du bureau de contrôle qui a parfaitement compris – avec une ouverture d'esprit à laquelle il faut rendre hommage –, que le respect de certaines dispositions Le Corbusier était aujourd'hui incompatible avec les D.T.U. et la garantie décennale et qu'il fallait trouver d'autres solutions, l'avis enfin de la fondation Le Corbusier, précieuse mémoire et garante du dogme, préoccupée de ce que l'intrusion incontournable de certains matériaux contemporains ne soit pas susceptible de dénaturer l'œuvre.

S'il me paraît intéressant de rendre compte sur le plan technique de ce qui a été réalisé, il me paraît plus intéressant encore de rendre compte, en fonction du thème "Béton et patrimoine", de cette confrontation permanente et passionnante d'archéo-ingénierie, pour rechercher, bien plus que pour un aqueduc antique, une église romane ou un hôtel classique, la compatibilité du respect de l'œuvre, et d'autre part, de ce qui découle à notre époque des notions de garantie avec la sacro-sainte couverture de risques par les compagnies d'assurances.

À ce titre, l'analyse technique de la restauration du béton armé à la Cité Radieuse, se place résolument dans le cadre critique d'une réflexion "Monuments historiques".



LE PROGRAMME DE RESTAURATION

C'est en 1983 que la première réunion avec les représentants de la Conservation régionale des Monuments historiques posa le principe d'une restauration générale des parties communes de l'immeuble et en particulier de l'enveloppe en béton. Sur ce dernier point, l'unité d'habitation de Marseille en avait le plus grand besoin. Les fers d'ossature, qui avaient été mal positionnés dans les coffrages lors du coulage, étaient apparents en des milliers de points. La rouille avait causé l'éclatement de l'épiderme. Les panneaux des travées aveugles présentaient de multiples fissures signalées dans le rapport de l'expert judiciaire. Ces fissures avaient été reprises par des rebouchages, des pontages et des films hydrofuges qui dénaturaient l'aspect de l'édifice.

De nombreux appartements, la halte-garderie – actuellement école maternelle – et surtout le gymnase, étaient atteints par des infiltrations dues non seulement à la défaillance de l'étanchéité, mais aussi à des problèmes de structure. La coque en béton du gymnase ne comportant aucun joint de dilatation, en était un exemple caractéristique.

La tour des ascenseurs se trouvait dans un état particulièrement préoccupant. En effet, l'enduit ajouté à regret par Le Corbusier à la suite d'une malfaçon au coulage du béton, se détachait de son support par plaques de plusieurs mètres carrés.

Il avait donc été décidé que la consolidation générale des façades serait effectuée dans l'ordre suivant :

- Tour des ascenseurs,
- pilotis et volumes du rez-de-chaussée,
- façades,
- ouvrages en superstructures : cheminées, jardinières, école, théâtre, gymnase et ouvrages divers,
- un peu à l'écart : local de collecte des ordures ménagères, ce dernier ouvrage étant actuellement en chantier pour clore ce programme.

LA TOUR DES ASCENSEURS

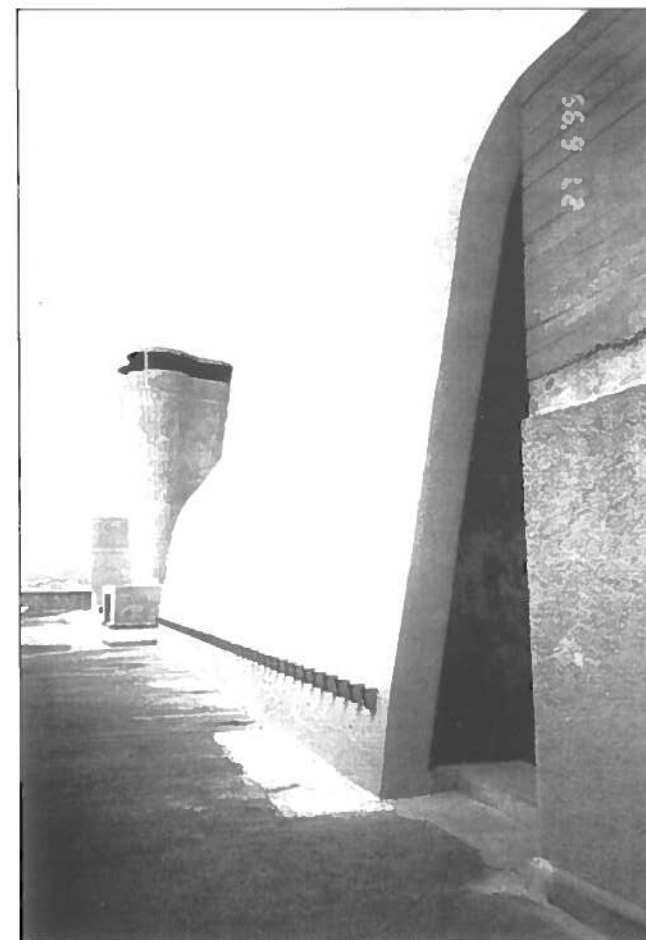
L'intervention sur la tour des ascenseurs a été considérée comme la priorité. Elle débuta effectivement en 1985 avec la réalisation de prototypes, mais ce n'est qu'en 1989 que les travaux lourds furent engagés.

La tour des ascenseurs pose un problème spécifique : les fers de coffrage mal positionnés étaient apparents en un si grand nombre de points qu'un enduit constituant protection et cache-misère s'était avéré nécessaire. Le défaut d'adhérence au support a conduit à un état de péril, en raison des risques que présentait la chute d'éléments de grande taille, se détachant à plus de quarante mètres du sol, avec des vents dépassant de temps à autre cent kilomètres à l'heure.

Un premier problème se posait avec cette mise en sécurité de l'édifice. L'alternative était la suivante :

- Soit purger tout ou partie des zones où l'accrochage serait reconnu défectueux et refaire un enduit à l'identique, mais sur support armaturé et avec couche d'accrochage, ce qui ne représente plus de difficulté anormale en fonction des matériaux dont nous disposons quarante ans après la construction,
- soit se débarrasser en totalité de l'enduit et reprendre le parement suivant les dispositions initiales Le Corbusier, en reproduisant exactement le calepin des planches de coffrage apparaissant sous l'enduit.

Cette alternative a fait l'objet des premières discussions avec les divers intervenants déjà cités : syndic, conseil syndical, bureau Veritas, architecte des bâtiments de France, conservation régionale, avec le recours à l'inspection générale et de façon continue avec la fondation Le Corbusier ; n'oublions pas les entreprises dont les chefs de chantier étaient bien souvent déroutés par le type de finition de cette architecture brutaliste, à laquelle, pour Le Corbusier comme pour le Catalan Antonio Gaudí en d'autres lieux, les entreprises sont peu familières.



La seconde proposition a été retenue. Un microbéton avec adjuvant plastifiant réducteur d'eau (ligno-sulfonate) a été mis au point avec CEMEREX. Le voile d'origine de la tour des ascenseurs est de quinze centimètres d'épaisseur. Un enrobage des fers, d'un minimum de cinq centimètres a été demandé par Veritas, ce qui porte l'épaisseur de la maçonnerie d'enveloppe de la tour à vingt centimètres. Le Corbusier n'avait prévu aucun joint. Pour respecter cette disposition, mais parer aux fissurations probables, un armaturage léger a été réalisé. La couche d'accrochage sur le support a été préparée avec beaucoup de soins à partir d'une émulsion aqueuse, pour éviter que les phénomènes antérieurs ne se reproduisent.

Les fers ont été traités par passivation, en dégagant tout ce qu'il était possible de l'armature apparente. Un coffrage a été réalisé avec des panneaux constituant bandes, reproduction exacte de l'existant. Notons au passage que le plan de référence ATIBAT 1947 n'avait pas été suivi. La réalisation comportait des différences de cotes importantes. La technique de la fin du XX^e siècle permet de régler bien des problèmes de mise en œuvre du béton, difficilement ou non maîtrisés dans les années cinquante.

Pour la tour des ascenseurs, il appartiendra peut-être avec un peu plus de recul, de dire si les options prises ont été les bonnes et si cette restauration, qui est une dérestauration de Le Corbusier lui-même, a respecté l'œuvre. En effet, se pose ici l'une des questions, paramètre bien particulier de toute intervention, chaque fois que l'on porte la main sur l'ouvrage de Le Corbusier : les proportions et le respect du Modulor.

Nous nous trouvons devant une nouvelle alternative, qui s'est posée et se pose chaque fois qu'il est nécessaire de renforcer un parement détérioré par la rouille :

- Soit démolir le parement défectueux sur lequel l'armature est apparente, couper les fers qui ne sont pas en retrait de cinq centimètres, placer une armature neuve à cinq centimètres du parement, coffrer et couler un nouvel épiderme de béton, respectant les épaisseurs, le nu de parement et le dessin initial du coffrage Le Corbusier, ce qui ne permet pas de conserver le parement authentique ;
- soit traiter les fers et rétablir un parement avec l'épaisseur d'enrobage voulue, ce qui crée une surépaisseur de cinq centimètres et s'écarte des proportions initiales.

Dans un cas comme dans l'autre, l'épiderme d'origine disparaît ou n'est plus visible. Dans le premier cas, les proportions sont respectées, mais au prix d'une chirurgie destructrice, difficilement acceptable. Dans le second, l'intervention est légère, mais les proportions sont altérées et le résultat ne peut être totalement satisfaisant, bien que cette solution permette une réversibilité. Ajoutons que le prix de revient de la seconde solution reste raisonnable, ce qui n'est pas le cas de la première.

On peut admettre qu'un jour viendra où des moyens techniques dont nous ne disposons pas aujourd'hui permettront d'enrober un fer d'une protection de quelques millimètres d'épaisseur seulement.

C'est bien la seconde proposition qui a été retenue. La suppression de l'enduit, en dérestauration Le Corbusier, ce qui reste un cas de figure tout à fait particulier.

LES FERS APPARENTS

Les parties pleines des façades présentaient plusieurs cas de figure, les unes étant imperméables, les autres ne l'étant pas. Parmi celles qui étaient imperméables, plusieurs cas encore : certaines zones n'avaient jamais été affectées par les désordres dus au passage de l'eau ; certaines autres avaient présenté des désordres et avaient été réparées. Dans ce dernier cas, la réparation systématiquement effectuée entre 1960 et 1980, était malheureusement très visible, l'épiderme béton ayant été remplacé par un épiderme hydrofuge siliconé.

Les parties pleines qui n'avaient jamais été affectées par les infiltrations d'eau, présentaient un encrassement variable suivant les orientations et les effets de la pluie et du vent. Un nettoyage s'imposait pour reconnaître l'état du parement et d'éventuelles fissurations. Les considérations d'ordre esthétique, qui ont pu faire croire à certains que le retour à la teinte initiale était la finalité de cette opération, étaient tout à fait secondaires.

Ces parties pleines ont été lavées à l'eau, à une température de 90° et sous une pression de 60 à 80 bars. Il a été utilisé un produit de nettoyage avec un pH de quatorze.

Les fers apparents, tangeants à l'épiderme, qui ont été reconnus en bon état et avec une bonne adhérence au parement lui-même en bon état, ont été simplement traités à l'antirouille. Les fers détériorés ont été dégagés et ont été passivés (Framétaux) avant de recevoir une couche de peinture Piolite, d'une teinte très voisine de

celle du béton. Les raccords sur le parement béton ont été effectués avec colle époxydique et mortier de ragréage CPA 45/PCI.

Ce type de reprise peut être assimilé à des travaux d'entretien, retardateurs des effets de la corrosion. Il n'a pas été envisagé de vérifier plus loin l'état des fers dans le béton, en raison des effets destructeurs de cette reconnaissance.

Les façades ayant été affectées par les désordres et ayant été réparées ont posé des problèmes de nature différente.

Les travaux de remise en état de la travée Sud, aveugle, et de la façade Est, ont nécessité une approche particulièrement délicate. En effet, les travaux avaient été exécutés en 1965 sur injonction judiciaire, pour défaut d'étanchéité de la façade ; ils avaient conduit à une protection satisfaisante au point de vue de l'imperméabilisation, mais peu compatible avec le souci que portait Le Corbusier à la nature de l'épiderme du béton.

Il était donc souhaitable de supprimer la pellicule hydrofuge qui gommait totalement le grain du béton et modifiait la couleur. Toutefois, le déshabillage du parement ramenait à la situation qui avait motivé le procès : les multiples fissurations du béton, la mauvaise constitution des joints et la possible porosité des éléments, avec leurs incidences sur l'imperméabilité de la façade.

L'objectif était le suivant :

- Retrouver le parement Le Corbusier, dégager l'épiderme et les joints en creux, en partie occultés par les pontages,
- imperméabiliser le parement avec un hydrofuge sans brillance et laisser apparaître la granulométrie du béton de mignonnette.

La réponse a été apportée après de multiples mises au point avec le bureau Veritas, l'entreprise et divers fabricants de produits hydrofuges et la réalisation de plus de vingt prototypes. En effet, le traitement appliqué sur la façade remise à nu, devait être conforme aux D.T.U. pour obtention d'une garantie décennale incontournable dans ce cas, puisqu'il n'y avait pas de désordres au revers de cette partie de façade en béton, avant les travaux.

Un revêtement de catégorie I3, garantissant l'imperméabilité du parement pour des fissures présentes et à venir de un millimètre a été retenu. Les références en sont : produit Renaulac-Renul.

Renaulac-Renul façades 5915 beige mortier RC 5715, passé au rouleau sur épiderme débarrassé du film hydrofuge. Trois couches. Aspect mat. 1 kg par mètre carré environ, soit impression fixateur 150 g, couche intermédiaire 400 g, finition mat 400 g.

Une recommandation sévère, et très inhabituelle pour ce type de travail qui tend à donner une garantie d'imperméabilisation, a été formulée : Que l'entreprise n'augmente en aucun cas le dosage pour ne pas occulter les pores du béton et le grain de surface, qui restent visibles avec un produit treize, mais ne sont plus apparents dans le film protecteur si le poids au mètre carré dépasse un kilo.

Il n'existe pas dans le commerce d'induction treize rigoureusement incolore. La perception du film Renaulac-Renul treize est naturellement différente, si on l'examine à une distance de quelques centimètres ou à plusieurs dizaines de mètres, comme c'est le cas sur la façade Est. On peut dire qu'elle a repris un aspect très voisin de l'aspect d'origine pour la travée aveugle concernée par ces travaux, la distance relativisant naturellement la perception du grain de l'épiderme béton.

Un problème particulier n'a pas été maîtrisé comme il aurait été souhaitable, mais il est certain que les techniques du XXI^e siècle apporteront des solutions satisfaisantes. Il s'agit de la "dérestauration" de l'acrotère, mais il faudrait probablement dire "déréparation" car les options prises pour l'imperméabilisation de l'acrotère dans les années soixante-dix n'ont pris en compte que l'obligation de résultat et la couverture de risque en décennale, et en aucun cas le maintien de l'épiderme béton. Un film SICO, épais, solide et efficace vingt ans après sa mise en œuvre, est resté insensible à une projection d'eau chaude, dont la pression a été limitée à 150 bars. À cette pression, en effet, c'était le parement béton qui cédait, emportant avec lui son habillage siliconé. Il a été décidé en conséquence de conserver le film plastique et de le recouvrir d'une nouvelle induction, compatible avec lui, mat, et de même teinte que la protection employée en façade Est. La distance à laquelle est perçue l'acrotère relativise encore davantage la perception de ce réhabillage plastique.

LES OUVRAGES EN SUPERSTRUCTURE

Les travaux en superstructure ont été une série de combinaisons de ce qui avait été réalisé en façade. Les parements étaient tous différents : épiderme lisse sur la halte-garderie et les ouvrages de la zone de jeux, ainsi que pour le gymnase, parements coffrés pour le reste.

Deux cas de figure seulement seront examinés pour terminer : la consolidation des parements des cheminées et la reprise du voile de couverture du gymnase. Indiquons pour mémoire les difficultés qui résultent des remontées d'étanchéité ne pouvant être engravées en raison du positionnement des armatures tangeantes à l'épiderme.

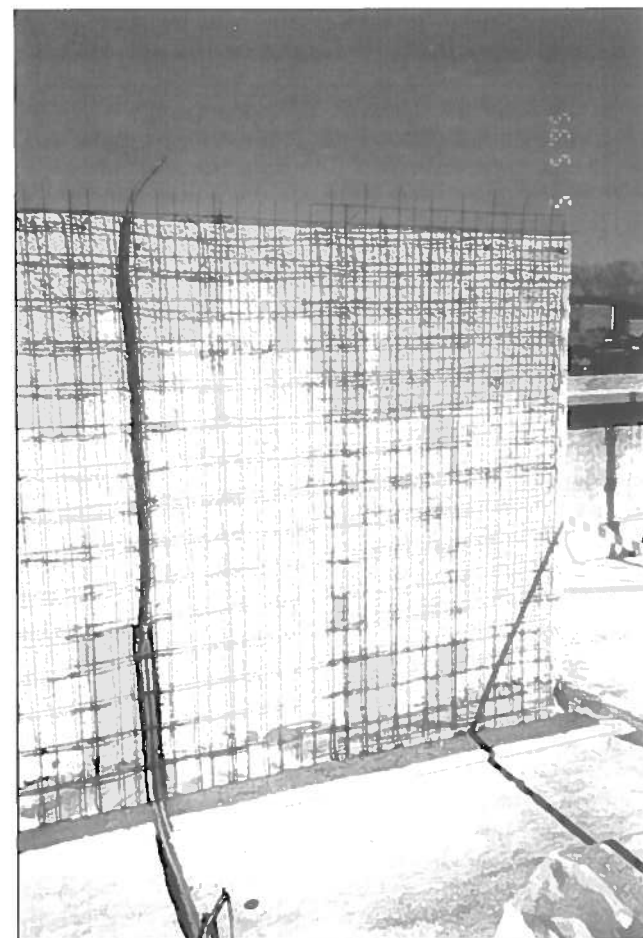
Les cheminées se trouvaient dans un état de dégradation préoccupant et de présentation déplorable, à la suite de multiples reprises des fissurations et éclats dans le parement.

Une purge de toutes les parties défectueuses et une reprise au mortier, en respectant les dessins de coffrage, a permis de revenir à l'aspect initial. Pour une plus grande protection, mais sans aller à l'application d'un produit I3 jugé inutile si les fissurations ne reviennent pas, le béton des cheminées a tout de même été traité avec une induction hydrofuge IMLAR. Ce film est presque incolore et pratiquement invisible.

La situation la plus préoccupante à la Cité radieuse en 1994 était celle du voile de couverture du gymnase.

Le problème incontestablement le plus difficile a été celui de la compatibilité d'une présentation voisine des

dispositions d'origine et de l'étanchéité d'une coque qui avait été prévue sans joints de retraits. Ce voile mince était fissuré longitudinalement et transversalement. Il avait fait l'objet de pontage des fissurations et d'une superposition d'hydrofuges. Il prenait l'eau en de nombreux points. Son aspect était misérable.



Le premier travail a été de débarrasser le béton de tous les pansements qu'il avait reçus pendant quarante ans et de réparer soigneusement les fissurations au mortier. La deuxième intervention a été de créer des joints en suivant pratiquement le tracé des cinq joints verticaux et des deux joints horizontaux qui s'étaient créés naturellement et de les ponter pour retrouver une surface plane. L'avenir dira si ce pari était le bon et si les joints peuvent rester cachés. C'est encore un film treize qui a été employé pour réhabiliter l'ensemble, avec une difficulté signalée par Veritas : le film treize est prévu pour application sur des éléments verticaux. Les parties inclinées posent donc un problème et plus particulièrement la partie supérieure presque horizontale. Le principe d'un film plastique épais, assurant une étanchéité conforme aux normes mais gommant totalement l'aspect béton, a été

écarté. En conséquence, ces travaux sont hors garantie décennale et de nouvelles interventions restent possibles dans les années à venir, dans l'attente de la mise au point probable d'un produit permettant de répondre à la fois aux deux préoccupations.

Je terminerai avec la délicate question de la remontée d'étanchéité sur un voile mince en béton de la paroi à laquelle la jardinière Nord-Est est adossée.

Le Corbusier avait d'abord fait réaliser l'étanchéité de l'esplanade Nord, puis avait placé ensuite la petite scène de théâtre et la jardinière. Une intervention impérative pour mise hors d'eau a nécessité récemment de créer une remontée d'étanchéité tout au long de la paroi qui constitue le fond de la jardinière. Toute saignée pour encastrement d'une remontée était exclue, l'armature étant pratiquement tangeante au parement. La dépose-repose de la jardinière monolithe a été également exclue comme hasardeuse et déraisonnable. Aussi a-t-il été prévu et réalisé de faire remonter l'étanchéité sur la paroi et de créer un parement rapporté avec treillis d'accrochage et mortier reprenant le calepin du coffrage. Le parement a été préalablement piqué pour assurer l'adhérence du doublage. Il en résulte une surépaisseur de cinq centimètres.

Le cas du voile de la jardinière est un cas limite. La décision n'a été prise qu'après une large concertation. La garantie de l'efficacité d'une réfection d'étanchéité, dans une zone où il y a des infiltrations depuis l'origine de l'immeuble et dans laquelle les problèmes d'entrée d'eau ne sont maîtrisés que pas à pas, a été considérée comme l'élément prioritaire. Il n'y a pas de réponse satisfaisante à ce jour à ce type de difficulté. L'image du mur de la jardinière est une réplique en béton, aussi fidèle que possible, mais avec une proportion différente, et le non respect du Modulor.

L'équipe qui a travaillé à la Cité Radieuse a cherché à poser les bonnes questions. Dans la restauration qui se termine, elle n'a pas apporté de réponses entièrement satisfaisantes. Mais y en a-t-il actuellement ? Non, à l'évidence. Elle aura cherché à rendre compatible deux démarches à finalité différente : réparer pour une obligation de résultat avec les normes et les matériaux de notre époque, et restaurer pour une obligation de résultat certes, mais dans le respect intransigeant de l'œuvre.

C'est en ce sens que l'archéo-ingénierie du contemporain à l'Unité de grandeur conforme de Marseille, espère avoir apporté modestement sa contribution à la réflexion engagée aujourd'hui sur "Béton et patrimoine".

Jean-Pierre DUFOIX
Architecte en chef des Monuments historiques

Etienne Poncelet

Les questions de ce débat peuvent s'ordonner en des questions très techniques essentiellement des questions d'épiderme, des questions de finitions – comme au Havre avec les problèmes du béton bouchardé –, des questions de structure, de joints de dilatation, de joints de rupture et enfin les questions d'usage avec l'aspect un peu extrême de la réutilisation de la Cité radieuse qui a été évoqué plus haut.

Jean-Michel Pérignon

Les fondations en béton réalisées par monsieur Flachet sur la cathédrale de Bayeux permettent en fait de donner un point d'appui aux tabourets et aux cintres qui lui ont servi à soulever toute la tour centrale de plusieurs centimètres afin de pouvoir démonter chaque pile alternativement et les remplacer ; le dôme de Moussart a été démonté et remplacé par le dôme de Crétin en métal. Il y a donc eu des interventions très lourdes sur la cathédrale de Bayeux et les puits en béton n'ont pas tant servi à soutenir la structure qu'à permettre aux échafaudages de s'y appuyer.

Eric Pallot

Nous avons souhaité présenter l'exemple de ce démontage parce qu'il est assez paradoxal dans le contexte de l'époque dans la mesure où l'on ne savait pas encore intervenir. Et c'est ce qu'ont proposé messieurs Tostain et Flachet qui a effectivement permis de restaurer le bâtiment. Mais paradoxalement ils ont changé beaucoup plus : ils ont plus démonté le bâtiment en le reposant sur cette structure en béton armé formée de puits que cela n'aurait été fait si l'on avait dû, comme le proposait Viollet-le-Duc, démonter la partie supérieure...

Didier Keisser

Le procédé de réalkalinisation des bétons par électrochimie requiert, selon vous, un recul d'une dizaine d'années afin que l'on puisse voir son comportement sur les édifices. Je rappellerai ici que ce procédé a déjà une douzaine d'années : nous sommes le cinquantième pays au monde à l'utiliser ; nous ne sommes pas très en avance !

Plus de quatre cents mille mètres carrés ont été traités et les premiers édifices sont suivis chaque année de façon à évaluer leur comportement et notamment leur résistance à la carbonatation : ils se comportent très bien puisque les premiers chantiers faits en Norvège montrent qu'au bout de douze ans la carbonatation n'a pas progressé de plus de deux millimètres sur ces façades. Ils font l'objet d'un suivi annuel.

Benjamin Mouton

Une observation a retenu mon attention : il semble que lorsqu'on applique certains traitements de surface au béton il est pratiquement impossible ensuite de traiter en profondeur par le système d'électrolyse. Par conséquent, il est très important d'évaluer si certaines techniques de consolidation de surface ne deviennent pas, d'une part, irréversibles, et d'autre part ne se présentent pas comme une barrière à d'autres traitements en profondeur...

C'est pourquoi j'ai évoqué la nécessité de prendre des précautions de sorte à ne rien faire d'irréversible sans quoi on pourrait se trouver, comme pour la pierre aujourd'hui, devant des situations extrêmement douloureuses.

Jean Michel Musso

La restauration du Raincy montre des remplacements d'armatures métalliques en acier inoxydable ; quels en sont les avantages et les inconvénients ? Cela a-t-il également été fait ailleurs ?

Serge Carnus

L'acier inoxydable a été utilisé pour les parties qui avaient des sections extrêmement faibles, cela pour éviter tout problème de corrosion par la suite.

Dans les éléments comme les claustras le rôle de cet acier n'est pas primordial ; on peut même imaginer que c'est uniquement pour des problèmes de manutention après avoir coulé le claustra...

En ce qui concerne les ferraillements de poutres ou de poteaux, il est évident que le fait d'utiliser un acier inoxydable, qui est très lisse, poserait des problèmes quant à l'adhérence du dit acier sur le matériau béton et quant à son rôle dans la poutre ; ainsi cet acier n'a pas été utilisé pour les grosses parties et l'on n'a pas fait d'études spécifiques là-dessus.

Un intervenant

Un grand nombre des claustras que l'on a démontés étaient totalement dépourvus d'armatures ; les claustras tels qu'ils sont faits aujourd'hui avec des ciments de bien meilleure qualité et un soin beaucoup plus important apporté à leur réalisation n'ont absolument pas besoin de ces armatures...

On peut considérer ces armatures comme des appoints et non pas comme des éléments collaborant à la structure elle-même.

Richard Bisch

Le cas s'est présenté à la Cité radieuse ; Marseille est le symbole du bon béton sympathique des années cinquante : il y a beaucoup plus de ferraille qu'il n'est nécessaire !

Il était difficile de voir à cause du contraste. Dans les cheminées de ventilation qui sont sur le toit on a trouvé des fers verticaux, presque assimilables à des rails ; c'était très gros. La seule chose qu'il ait été possible de faire fut un traitement de passivation.

Dans d'autres cas on a trouvé des murs auto-porteurs qui font à peu près deux mètres de haut, notamment sur le toit-terrasse. Ils sont là depuis quarante ans avec la ferraille qui a rouillé, qui a bougé car elle était mal disposée ; on a jugé que cette ferraille pouvait être supprimée, ce que l'on a fait pour une bonne partie, parce que le mur tenait tout seul dessus : ce ne sont pas les vingt centimètres de ferraille qu'on a pu enlever qui auraient changé quelque chose à la tenue de ce mur !

Dans certains cas on s'est aperçu que c'était bien confortable ce qu'il y avait comme ferraille par rapport à ce qu'on ferait aujourd'hui... !

Un intervenant

On fait du béton armé avec des aciers inoxydables en Angleterre ; pourquoi en France ne développe-t-on pas plus cette technique ?

Paul Poitevin

Le problème s'est posé aux États-Unis pour les dalles des tabliers et des ponts : les ingénieurs ont longuement hésité entre les armatures galvanisées et les armatures revêtues de résine époxyde ; finalement ils ont choisi les revêtements en usine de résine époxyde plutôt que la galvanisation.

En France il y a une campagne pour la galvanisation des armatures qui ne perce pas parce que pour avoir des ossatures galvanisées à des prix raisonnables il faudrait qu'elles soient produites en grande série, or la réglementation ne les impose pas dans beaucoup de cas, par conséquent ça ne sort pas. Il faut savoir que si l'on veut galvaniser une armature par des procédés dans un bain, cela coûte cinquante pour cent de plus que l'armature elle-même.

Henri Decotignie

Il faut aussi préciser que le façonnage des dits aciers peut détruire la galvanisation. Quant aux aciers inoxydables, le faible emploi de ces matériaux tient au prix du produit ; sa qualité lisse n'est pas gênante car on a armé le béton avec des aciers lisses pendant très longtemps : il faut simplement faire des calculs particuliers pour l'ancrage mais cela ne présente pas de difficulté majeure.

André Raharinaivo

Les aciers inoxydables utilisés en Angleterre sont en fait des restes des chantiers du Moyen-Orient qui étaient fournis par les Anglais ; ils ont donc un passé et c'est une production qui est rationalisée pour eux.

En réalité il n'y a guère de différence entre l'acier inoxydable et l'acier galvanisé : l'acier galvanisé a été utilisé pour le grand stade, le stade de France ; l'avantage de ces aciers inoxydables n'apparaît pas majeur si on a un bon béton, compte tenu du prix, bien qu'ils soient meilleurs que l'acier simple.

François Botton

L'exemple que j'ai présenté dans lequel le béton était vieux de cent quarante ans n'existerait probablement plus si le béton avait été ferrailé ; donc pour des éléments qui ne sont pas structurels le ferrailage n'est pas indispensable. Par contre, pour compenser les fissurations de surface il arrive qu'on fibre le béton ce qui est une solution tout de même plus élégante : pour éviter les problèmes de fissuration superficielle, on a légèrement fibré le béton des éléments qui ont été présentés ; on a utilisé de la fibre polypropylée.

Pierre Halleux

L'utilisation de l'acier inoxydable comme armature dans le béton n'est pas évidente car ce matériau présente en fait un défaut non négligeable, son coefficient de dilatation thermique. Si on a pu réaliser du béton armé depuis bien longtemps c'est précisément parce que le matériau béton et l'acier ordinaire ont tous deux un coefficient de

dilatation thermique qui est de l'ordre de 10.11-10.6 par degré centigrade ; or avec de l'acier inoxydable on aura 16.10-6.16 et demi. Par conséquent, en cas de variation importante de température on a des dilatations thermiques différentielles qui induisent des cisaillements à l'interface métal/béton qui peuvent à la limite rompre l'adhérence entre les deux matériaux.

Pour information, tout récemment dans le cadre de la restauration de la grande tour gothique de l'hôtel de ville de Bruxelles – qui est construite en pierre – j'ai été amené à utiliser en lieu et place de l'acier inoxydable que le cahier des charges prévoit initialement d'employer, du titane qui est nettement plus compatible du point de vue des coefficients de dilatation thermique...

Philippe Oudin

La réalcalinisation du béton de l'église du Raincy n'a pas été faite mais tous les abouts de voile ont été changés c'est-à-dire que l'on a enlevé sur toute la hauteur tantôt vingt centimètres tantôt trente centimètres de béton et on a restitué les extrémités. Cela a été fait systématiquement et à d'autres endroits on a regardé le béton qui était en mauvais état, tous les 50 cm² ; on l'a sondé, on l'a purgé ; bien évidemment il y a des parties qui ne sont toujours pas carbonatées mais elles le seront par la suite.

Nous avons traité les trois voiles du clocher – il y en a vingt-quatre ; il en reste vingt à traiter qui sont moins hauts – ; un appel d'offres a été lancé afin de re-traiter les autres voiles. Il y a également d'autres systèmes de voiles qui sont en biais, qui posent un problème d'étanchéité mais c'est une autre chose.

Lorsque l'on aura traité mécaniquement l'ensemble, il faudra protéger la totalité de l'église au moyen de la réalcalinisation qui devrait apporter justement la protection des fers attendue.

Ce qui est important c'est que dans le cadre de la restauration du clocher on a repassivé les sphères et si on est amené, pour préserver l'avenir comme le disait Benjamin Mouton, à prévoir une électrolyse, au cours des prochaines tranches de travaux, je ne protégerai pas les fers : je les ferai bien nettoyer pour permettre cette action.

Philippe Bromblet

Les architectes sont conquis par la réalcalinisation mais il y a cependant des réserves à émettre sur ce procédé. Nous sommes en train d'étudier ce procédé plus à fond, sur des éprouvettes. Les réserves qu'a émises monsieur de Jong me paraissent tout à fait fondées : il faut absolument savoir si le béton utilisé ne contient pas des granulats potentiellement réactifs vis-à-vis de l'alcali-réaction.

Il est absolument impératif de le savoir parce que le procédé utilise un carbonate de sodium, un sel alcalin ; vous mettez donc des alcalins dans votre béton et si vous avez des agrégats siliceux qui peuvent relâcher de la silice vous allez avoir des réactions d'alcali-réaction avec les désordres que nous a montrés monsieur Hornain, à savoir les grandes fissures... Par ailleurs, quand on s'intéresse à la conservation de la pierre on sait que le car-

bonate de sodium est un sel soluble qui est très dangereux et instable et qui avec du sulfate de SO_2 devient du sulfate de sodium donc quand vous réalcalinisez le béton vous y introduisez des sels solubles ; je ne suis pas un spécialiste du béton mais c'est une chose que je ne ferais pas dans la pierre.

Le béton n'a pas les mêmes propriétés que la pierre, il faut cependant être très prudent.

Jean-Claude Bourcy

Notre entreprise détient des licences concernant ces procédés de réalcalinisation.

On ne peut en effet nier qu'il existe des problèmes d'alcali-réaction ; mais pour ce qui nous concerne, nous avons douze ans d'expérience derrière nous et nous exigeons de tous les maîtres d'œuvre – exigence que nous avons aussi en tant qu'entrepreneurs – que des essais soient faits en vue de vérifier si le béton ne contient pas ces indices ; différents essais sont possibles : gaufrements, examens pétro-chimiques...

La diffusion des carbonates de sodium dans le béton et la pierre n'est pas du tout la même ; d'un point de vue chimique, on n'est pas dans le même champ. Il est possible d'utiliser d'autres carbonates ; il se peut que dans certains cas le carbonate de sodium ne fonctionne pas pour certaines raisons mais, par exemple sur un ouvrage d'art, un viaduc, nous avons été amenés à utiliser le carbonate de lithium : le procédé n'est pas lié à l'utilisation du carbonate de sodium.

Etienne Poncelet

Il serait intéressant d'orienter à présent le débat sur les problèmes de structure à proprement parler (joints de rupture, reprises, créations et parties architecturales de restauration).

Christiane Schmückle-Mollard

Tout d'abord, une observation : Si on a retiré le chantier de restauration de la villa Savoye à Le Corbusier, cela signifie que la démarche des Monuments historiques n'était pas vraiment celle qu'il avait lui-même à l'âge où il était en train de construire Firminy ; c'est un véritable débat qui se pose à tous les architectes des époques récentes, parce que lorsqu'ils ont à reprendre leur œuvre vingt ou trente ans plus tard, ils n'ont pas forcément la même démarche que celle du service des Monuments historiques.

Et maintenant, une question sur la réalité du dossier : si on arrive à percer ces fenêtres – ce que je trouve tout à fait étonnant et passionnant –, quelles études sont faites sur les structures sachant que les chantiers de Le Corbusier n'étaient pas très bien dirigés, voire mal exécutés et que les problèmes de structures sont vraiment réels ?

Denis Joxe

Je me suis bien sûr posé cette question, car évidemment lorsque l'on casse tout tombe... La seule réponse que j'ai obtenue, pour l'heure, c'est – d'après Ciriani – qu'il va falloir tirer des câbles afin de rendre les lignes de force du bâtiment visibles, comme un voile... Les études tech-

niques vont durer de six à huit mois mais l'on pense que c'est théoriquement possible. Je précise que l'on ne touche pas aux façades, c'est-à-dire que l'on ne crée pas, ces fenêtres vont faire une sorte d'effet de moirage ; vue de loin la façade sera à l'identique et en plus, on verra partiellement le soleil de l'autre côté ; l'effet le plus impressionnant sera à l'intérieur, mais de loin les changements se verront à peine.

Etienne Poncelet

Et à l'inverse, monsieur Bisch, vous ne modifiez rien à la Cité radieuse de Marseille ?

Richard Bisch

En effet, on ne touche à rien mais je pense que le projet qu'on nous a présenté sur Firminy pourrait techniquement se faire à Marseille puisqu'on a des poutres, des poteaux en béton et que l'on n'a pas la même structure qu'à Firminy qui est faite de coffrage tunnel ; à Marseille on a une structure avec des poutres et des poteaux en béton.

Etienne Poncelet

Comment pouvez-vous expliquer qu'à Marseille vous êtes les gardiens scrupuleux au millimètre près de l'œuvre de Le Corbusier dans toute sa pureté alors qu'à Firminy il y a des rues pures et des rues impures ?

Richard Bisch

À Marseille nous travaillons sur une co-propriété c'est-à-dire que chaque lot a un propriétaire, à Firminy c'est une société de HLM qui est propriétaire à 100 % de l'ensemble, par conséquent elle peut vider la moitié de l'immeuble ou ne pas permettre d'occuper la moitié de l'immeuble – ce qu'elle a fait –.

Denis Joxe

C'est ce qui a préservé l'immeuble car il y avait un projet de la Direction départementale de l'Équipement de le faire imploser...

Richard Bisch

En effet, à Brilly aussi ; d'ailleurs quand ils ont vu le prix de l'opération d'implosion, ils ont préféré vendre... Le contexte est important : il fut une époque où on démolissait toutes sortes d'immeubles dans le centre de Firminy pour construire des logements sociaux face à la plus ancienne bourse du travail de France.

Alors que pour aller habiter dans l'immeuble de Le Corbusier à la maison radieuse, il fallait vraiment insister ; la société HLM avait toujours autre chose à proposer.

J'ai connu la période où on ne vous aurait jamais proposé un appartement dans l'immeuble de Le Corbusier ; c'est comme cela qu'un jour on s'est aperçu que l'immeuble était à moitié vide, alors on a "déménagé" les gens qui étaient dans la partie Nord et on a muré...

Denis Joxe

On a muré et le lendemain la porte de la mairie était murée ; depuis, c'est vitré !

Michel Polge

La comparaison des deux projets des cités radieuses est très intéressante ; peut-être faudrait-il développer un peu... De façon générale les problèmes posés aujourd'hui par les cités radieuses sont passionnants.

À Marseille on a une population très sensibilisée à la qualité de l'immeuble ; ça n'a peut-être pas toujours été le cas mais à l'heure actuelle il n'est pas nécessaire de plaider longuement pour faire comprendre l'intérêt de la chose.

À Firminy la population n'existe quasiment plus : c'est un immeuble qui était tellement vide qu'on aurait pu circuler en patins à roulettes dans les couloirs sans rencontrer personne !

En Lorraine, avec la cité radieuse de Brilay le problème s'est posé de façon encore plus aiguë ; on a d'abord pensé la démolir, puis on a considéré qu'il ne fallait pas démolir un immeuble de Le Corbusier et on s'est trouvé au cœur de ces problématiques patrimoniales au sens culturel et de ces problèmes patrimoniaux au sens valeur d'usage qui se heurtent de plein fouet...

C'est une approche tout à fait nouvelle, passionnante, car à l'origine les Monuments historiques s'intéressent surtout à des objets qui ont connu une grande période d'obsolescence ; les Monuments historiques apparaissent après la Révolution et s'intéressent à un patrimoine qui en général était suffisamment abandonné pour qu'on ne puisse plus se pencher sur l'objet comme ayant une "valeur d'usage" !

François Gondran

On peut dire que le permis de démolir est actuellement une des premières portes d'entrée pour connaître, – ou se poser – la question du patrimoine en béton armé, et qu'il y a réellement une discipline qui peut quasiment être patrimoniale, la discipline du programmeur qui va retrouver une valeur d'usage qui soit compatible avec un bâtiment en déshérence. Avant même de commencer les études de l'architecte il faut s'intéresser aux études du programmeur ; c'est une question qui serait à développer avec le service des Monuments historiques.

J'ai réalisé un questionnaire demandant aux architectes des bâtiments de France s'ils intervenaient avec le béton armé sur le patrimoine monuments historiques et s'ils entretenaient des œuvres des architectes en chef des Monuments historiques d'il y a vingt, trente ou cinquante ans ; il s'avère qu'ils sont très peu à le faire ; cependant c'est une chose à laquelle on devrait penser en commençant par créer une sorte de mode d'emploi de nos restaurations actuelles et de celles de nos anciens.

L'usage du béton armé dans les monuments a beaucoup évolué si bien que si l'on ne veut pas perdre cette mémoire, il est important de mener une réflexion sur l'avenir de ces grandes restaurations et de ces techniques.

Benjamin Mouton

Il est impératif d'assurer une surveillance sur ces ouvrages en béton armé parce que ceux qu'on a cités précédemment sont facilement visitables ; ils sont d'ailleurs – et heureusement – dans des enceintes protégées.

La Chapelle-en-Morbihan est dans un état réellement très préoccupant mais le plus préoccupant ce sont les chaînages en béton armé dont on a dardé nos édifices, qui sont complètement masqués et de la vie "secrète"

desquels on ne connaît absolument rien ; ils peuvent nous condamner demain à des rendez-vous extrêmement douloureux parce que, si on tient compte de la force que peut avoir une ferraille en cours de corrosion, on peut imaginer facilement ce que ça peut entraîner sur des ouvrages dont dépend la stabilité d'un édifice...

C'est pourquoi il me semble souhaitable de mettre au point un protocole de surveillance des ouvrages de renforcement. Il serait bon de mettre au point un système de surveillance des ouvrages masqués par un certain nombre de fenêtres de carottage ou autres...

Ceci est d'autant plus important que l'on va tourner le dos aux solutions lourdes, aux solutions inertes pour s'orienter vers des solutions dynamiques dans lesquelles on introduit le plus de légèreté possible mais dans lesquelles on introduit aussi des pressions, des mises en compression, le plus souvent contrôlées.

L'exemple de Saint-André-le-Bas à Vienne est à ce titre significatif : le système de consolidation mis au point par Jean-Louis Taupin ne fonctionne que si ce système dynamique est contrôlé or le système de contrôle est désactivé ce qui apporte un argument supplémentaire à la nécessité de mettre au point un protocole de surveillance et d'entretien et à la nécessité de convenir d'une technique qui permettrait d'y répondre.

Richard Bisch

Il y a deux autres immeubles de Le Corbusier que l'on n'a pas évoqués : l'un est à Resay ; il est à 80 % propriété d'une société de HLM et à environ 20 % propriété privée ; il se trouve face à d'énormes travaux mais il ne fonctionne pas mal. L'autre est à Berlin Charlottenbourg ; l'absence de contacts avec les Allemands doublé de leur manque d'intérêt pour Le Corbusier fait qu'il est traité comme une co-propriété comme une autre. Pourquoi chercher une solution générale puisque l'on voit avec ces cinq exemples que chaque situation est particulière ?

En ce qui concerne l'emploi du modulator, il y a effectivement des cotes qui sont très précises : on les a en centimètres, en millimètres, on les a en pieds, en pouces, etc. Prenons l'exemple du mur qui sert de jardinière sur le toit-terrasse à côté du théâtre en plein air : il fait entre huit et neuf centimètres d'épaisseur, il est à cinquante-cinq mètres au-dessus du sol, dans un climat marin et il est traversé par des ferrailles.

Comment dans ces conditions obtient-on les quatre ou cinq centimètres d'enrobement de béton qu'il faudrait avoir des deux côtés ?

Cette même question s'est posée sur d'autres parties que l'on a vues en photo notamment sur la partie horizontale qui est sous le vide sanitaire, c'est-à-dire au-dessus des pilotis, là où on voit les ferrailles ; évidemment elles étaient plus ou moins bien fixées et elles ont touché le fond du coffrage si bien que lorsque l'on a nettoyé avant de faire les travaux afin de repérer l'état du bâti, on s'est aperçu qu'en bien des endroits la protection était de l'épaisseur du millimètre – c'était essentiellement de la laitance qui avait coulé en fond de coffrage –. Quelle méthode employer dans de pareils cas ? Fait-on un gros

placard pour avoir l'épaisseur après avoir traité la ferraille ? (En ouvrant la partie apparente on fait le traitement, puis on casse un petit peu à droite et à gauche pour arriver aux parties qui sont encore saines, puis on met un gros pansement dessus ?)

En l'occurrence nous avons ouvert, traité, fait une passivation, et nous avons mis une "petite barbouille" par-dessus, un produit très mince pour ne pas défigurer les proportions qui étaient prévues au départ avec l'espoir – et je pense l'espoir raisonnable – que d'ici quelque temps on trouvera le produit suffisamment mince qui évitera ce genre de fantaisies...

Cet exemple a pour but de mieux faire comprendre les scrupules tout à fait honorables qui président à l'utilisation des cotes du modulator qui, dans bon nombre de cas, ont été bafouées pendant le chantier avec les fameuses règles des tolérances sur les dimensionnelles...

Etienne Poncelet

C'est la question que Philippe Oudin a eu à résoudre à Royan.

Philippe Oudin

En effet, au niveau de l'extrémités des voiles des V on avait huit centimètres donc avec un fer de trente il ne restait pas grand chose de chaque côté... J'ai donc triché un peu : puisqu'on refaisait le voile systématiquement, je n'ai pas cherché à savoir si c'était bon ou mauvais ; on l'enlevait systématiquement et on a gagné quelques centimètres donc cela ne se voit pas.

Nancy Bouché

Question d'usager à usager : Monsieur Bisch, vous avez été tout à fait discret sur la façon dont le montage juridique et financier de l'opération de restauration qui est plus qu'une réhabilitation de la Cité radieuse a été faite par les co-propriétaires ; combien de co-propriétaires êtes-vous ? Comment le montage juridique et financier s'est-il fait dans un chantier qui a tout de même eu ses propres contraintes et quelques aléas ?

Richard Bisch

Il y a entre trois cent-vingt et trois cent-trente appartements, et en réalité trois cent cinquante lots, donc derrière chaque co-propriétaire il y a des millionnières puisqu'on a des millionnières de co-propriétés... dont soixante-quinze à quatre-vingts pour cent de propriétaires-occupants.

C'est pourquoi je ne voulais pas trop m'étendre sur le sujet, notamment quand on fait des comparaisons avec les autres unités de grandeur conforme construites par Le Corbusier. Il y a le côté appropriation comme ce fut le cas à une certaine époque à Firminy où on sentait vraiment une appropriation des locataires qui y vivaient, qui a précédé une période de lassitude organisée... Il est évident que quand on est dans une co-propriété on n'a pas la même réaction que si l'on est locataire. De plus la loi de 1965 limite à juste titre les droits des locataires dans une co-propriété.

Les décisions ont été prises conformément à la loi c'est-à-dire au cours d'assemblées générales après que l'in-

formation requise eut été faite. La réflexion a porté sur le fait que cet immeuble a été inscrit à l'inventaire des monuments historiques le 26 octobre 1964 c'est-à-dire douze ans après son inauguration, du vivant de Le Corbusier – auparavant on attendait que l'immeuble ait au moins cent ans et que l'architecte soit décédé... – Or depuis 1964 on n'avait pas fait grand chose et une nécessité technique s'est fait jour de restaurer l'immeuble avant qu'il ne soit en trop mauvais état. On savait qu'un immeuble inscrit pouvait recueillir cinq pour cent de subventions, le reste pouvant être déduit fiscalement ; mais il fallait tout de même supporter les quatre-vingt-quinze pour cent de travaux.

La première phase a donc consisté à essayer d'obtenir un classement de l'immeuble pour pouvoir obtenir des subventions plus importantes : en tant qu'immeuble privé on pouvait espérer environ trente pour cent – actuellement, quarante pour cent du coût des travaux peut être subventionné –. Dès lors, nous avons sollicité la région et le département ; voilà pour le montage financier. On aurait probablement pu remettre l'immeuble à niveau à moindre coût avec une moindre qualité, comme à Brilay par exemple où on s'est contenté de passer une "barbouille" – à savoir une induction sur du béton – ce qui selon moi est bien dommage, comme à Brasília, aussi...

Nous avons tout obtenu car le plus difficile c'est d'enclencher le premier wagon sur le train, après ça fonctionne parce que nous avons des interlocuteurs à la fois intelligents et attentionnés, qui nous aident dans nos travaux...

Jean-Michel Pérignon

Il y a cinq ans j'ai été intrigué par l'éclatement des parements des piles de la nef et du chœur de l'église Saint-Jean de Caen ; je me suis demandé si ce n'était pas l'effet des déformations dues aux charges mal placées du clocher porche puisqu'il penche – à la base il a quatre degrés de dévers –.

Avec Alain Bouineau nous avons fait une étude chimique des sels contenus dans la pierre : il y avait une migration de sels expansifs qui pouvait provenir de la présence du béton dans le sous-sol, les migrations de sel étant favorisées par la migration de l'eau – l'église Saint-Jean est construite dans l'île Saint-Jean et, lors des grandes inondations de 1935, il y a eu 1,50 m d'eau –.

Connaît-on d'autres exemples de présence de sels expansifs ou de migration de sels expansifs dans la pierre dûs à la présence de structures en béton dans le sous-sol ?

Benjamin Mouton

C'est une chose qui ne me surprend pas car j'ai souvent entendu parler de modifications de comportement de maçonneries dans lesquelles on avait encastré des ouvrages en béton, modifications de comportement qui n'étaient pas uniquement liées au phénomène de point dur ou non...

Il est tout à fait possible qu'il y ait eu une migration d'un certain nombre de sels, a fortiori dans un cadre pris en sous-œuvre, avec une qualité de pierre comme celle de la région de Caen, avec, de surcroît, la nappe phréatique toute proche...

Ce phénomène fait partie des recherches à approfondir. Pour en revenir aux immeubles de Le Corbusier, j'ai eu l'impression en écoutant les témoignages sur la maison radieuse de Marseille et sur celle de Firminy que si cette dernière avait été en co-propriété, le problème de sa réutilisation n'aurait pu se poser, mais ce n'est finalement pas évident car le cas de Firminy sur le plan urbain et sur le plan de la dynamique économique n'a rien à voir avec celui de Marseille : donc ce n'aurait pas été la solution. Il fut un temps où on disait qu'un monument utilisé est un monument sauvé : on s'acharnait à lui trouver une réutilisation pour être sûr que le problème serait réglé et que l'on pourrait enfin le faire revivre. Puis on a constaté, à l'occasion de plusieurs opérations, que s'il y avait des solutions de réutilisation elles ne laissaient pas pour autant une impression parfaitement convaincante ; pourquoi ? parce que l'on essayait de concilier l'inconciliable en demandant des aménagements au programme de réutilisation et une trop grande adaptabilité du monument ; c'est comme cela que l'on aboutissait à des échecs...

Puis on a commencé à se préoccuper de problèmes de capacité d'accueil d'un monument, de sa compatibilité avec tel programme de réutilisation... Le cas de Firminy est donc très intéressant et extrêmement courageux compte-tenu du côté "sacrificiel" de ce programme pour l'édifice.

Quels sont les paramètres qui peuvent permettre de dire que l'on a trouvé la bonne réutilisation même si la réhabilitation qui entraîne un sauvetage durable de l'édifice entame ce dernier ? Cette interrogation demeure car on n'est jamais totalement sûr que c'est le bon programme

de réutilisation. Quelle tolérance et quelle sécurité se donne-t-on pour être sûrs qu'on ne se trompe pas ?

Denis Joxe

Dans le cas de Firminy, un consensus a pu s'établir car le projet était suffisamment vague et ouvert pour permettre à l'office de HLM, quel que soit le moment, d'adapter son programme, par exemple en réintroduisant du logement. Le but poursuivi était plus d'inventer de nouvelles pédagogies et opportunités en laissant des portes ouvertes que de faire un programme définitif enserré dans une grille ; le programme était conçu de telle façon qu'il laissait la place à l'invention et aux adaptations...

Etienne Poncelet

Le béton a acquis ses lettres de noblesse lors des deux dernières guerres et les premières restaurations, les premières protections remontent aux années vingt avec notamment en 1922, celle de ce petit observatoire anglais de la Première guerre mondiale ; dans les années quatre-vingts ce fut le blockhaus d'Eperlec construit par les prisonniers qui fut protégé ainsi que les bétons cachés comme ceux de la villa Mallet-Stevens de Croix, bétons qui ont la même pathologie mais qui sont cachés derrière des plaquettes de briquettes...

Toutes sortes de questions se posent encore à nous, des questions d'épiderme, de structures, de ferrailage, d'utilisation de l'inox ou non, du titane...

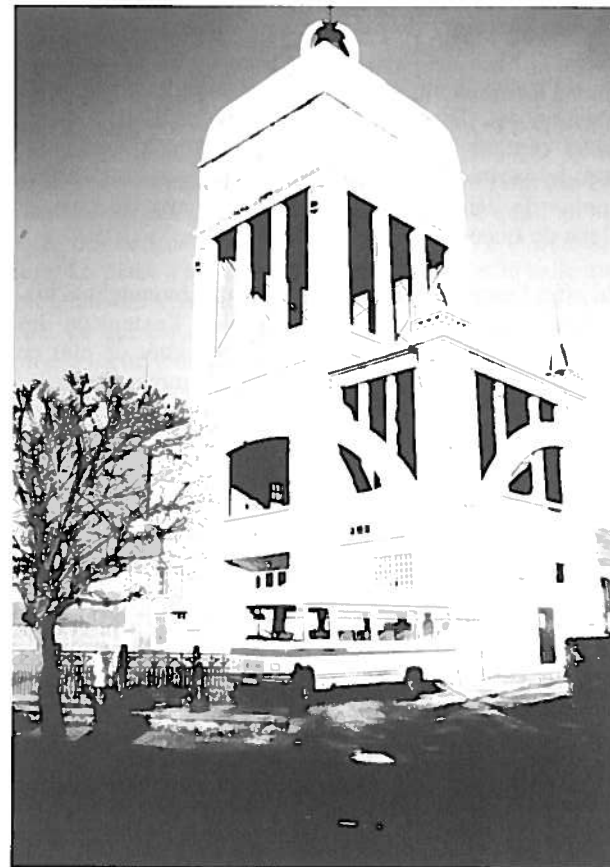
Le débat suivant traitera de la question : "Doit-on réhabiliter les habitations en béton ?"

Usages et réhabilitations

Faut-il sauver le béton armé ? Diverses expériences des services départementaux de l'architecture et du patrimoine

PRÉSENTATION DU CHÂTEAU D'EAU DE LUÇON

Cet édifice, construit suivant le procédé Hennebique autour de 1913 et récemment classé monument historique, a été sauvé de la démolition grâce à la vigilance et au talent de persuasion de mon confrère Jacques Boissière.



Château d'eau - Luçon

La presse locale, sous le titre "Le château d'eau du champ de foire : démolition ou inscription aux monuments historiques" (Ouest France du 5 mars 1990), relate le point de vue du maire de Luçon : c'est, selon lui, un monument jugé dangereux et laid par une bonne partie de la population ; il dénature le paysage de Luçon alors que des travaux d'embellissement sont réalisés chaque année

dans une ville qui a toujours eu le goût de l'esthétique ; la municipalité a d'autres priorités financières tournées vers un mieux vivre des habitants de cette ville si bien fleurie... Le même article donne le point de vue de Jacques Boissière, architecte des bâtiments de France : une loi existe pour la protection de tous les monuments ; les immeubles dont la conservation présente du point de vue de l'histoire de l'art un intérêt public sont classés monuments historiques, or c'est le point de vue de l'histoire qui donne à ce château d'eau toute sa valeur ; c'est un jalon significatif dans l'histoire de l'architecture. Suit une explication détaillée du procédé Hennebique qui sent bon le dossier de presse bien préparé...

L'article se conclut par un appel au courrier des lecteurs qui débouche trois semaines plus tard sur un second article : "Château d'eau du petit champ de foire, les Luçonnais donnent leur avis". On y voit que les défenseurs du château d'eau sont nombreux : jeunes lycéens qui veulent garder le château d'eau pour en faire un observatoire astronomique et un mur d'escalade, habitants qui proposent un musée d'histoire luçonnaise avec un belvédère sur l'ancien champ de bataille de Luçon, citoyens lyriques qui ne veulent pas que l'on détruise "l'antiquité de demain" ou "le château d'eau (qui) représente à mes yeux un échantillon d'une époque tout à fait authentique"...

Mais les détracteurs sont là aussi : "Comment conserver cette horreur ? le béton tombe par plaques c'est très dangereux !" "La salle des fêtes aurait parfaitement sa place à cet endroit puisque nous avons la possibilité du parking du champ de foire..." et enfin l'avis des Luçonnais économes : "Démolir c'est bien joli mais c'est très cher ; le béton armé en fait un véritable blockhaus..."

Ces opinions savoureuses me paraissent exemplaires et significatives du climat culturel dans lequel baignent nos concitoyens.

Dans cette affaire Jacques Boissière a cherché et obtenu l'appui des spécialistes, en l'occurrence l'Institut français d'architecture ; cet appui l'a aidé tant vis-à-vis du préfet que de l'accord (FAE) lors de la protection, mais il a également dû faire preuve d'un grand pragmatisme en se préoccupant des coûts de restauration, en cherchant des alliés dans la population, en expliquant calmement son point de vue ; on peut dire que l'issue heureuse de cette affaire est stupéfiante.

ÉLÉMENTS DE L'ENQUÊTE SUR L'EXPÉRIENCE DES ARCHITECTES DES BÂTIMENTS DE FRANCE

Lorsqu'il m'a été demandé en juin dernier de présenter l'expérience des architectes des bâtiments de France, j'ai commencé par réfléchir à ma propre expérience et à celle de certains de mes confrères ; très vite j'ai ressenti l'intérêt que pouvait représenter une recherche d'informations plus large. J'ai donc réalisé un questionnaire que j'ai adressé à tous les services ; cette enquête comprend trois volets :

- **Le patrimoine** avec une description si possible illustrée, de constructions ou architectures intéressantes en béton armé.

- **L'urbanisme** à travers leur avis donné sur les autorisations d'urbanisme dans le cadre de la participation au débat sur la ville et l'architecture, ou comment les architectes des bâtiments de France voient ces architectures.

- **L'expérience technique des chantiers** avec l'entretien des premiers monuments classés du mouvement moderne, la connaissance des chantiers des confrères notamment des architectes en chef des monuments historiques mais aussi des confrères libéraux et éventuellement les travaux de sauvetage ou les consolidations d'urgence.

J'ai donc obtenu dans le cadre de cette enquête cinquante-six réponses pour quatre-vingt dix-huit questionnaires transmis.

Premier volet de l'enquête : les expériences techniques des chantiers

C'est une partie de l'enquête qui est restée assez lacunaire ; je pense qu'il faudra la refaire dans quinze à vingt ans, on aura ainsi plus d'éléments.

En préalable, il faut indiquer que les expériences d'entretien du patrimoine en béton armé sont rares et que Le Corbusier intéresse particulièrement les professionnels concernés : grâce à lui nous avons un peu d'avance.

- Le courant de la Tourette : le service départemental de l'architecture du patrimoine commence maintenant à faire entre cent et cent cinquante mille francs de travaux d'entretien par an.

- La Cité radieuse de Le Corbusier : cette expérience a été suffisamment évoquée précédemment, nous ne nous y arrêtons donc pas.

- La villa Savoye à Poissy : des travaux ont été entrepris là par l'architecte en chef des bâtiments civils et palais nationaux.

- Pour ma part j'ai une expérience sur un édifice plus modeste mais qui a également été classé, une ancienne éolienne dans le Loir-et-Cher à Epuisay ; c'est un endroit intéressant parce que c'est un carrefour entre deux routes nationales et ça sert en quelque sorte de signal. Dans un premier temps nous avons eu beaucoup de discussions avec la commune afin de trouver des moyens de réutiliser et de revaloriser ces lieux. Puis nous nous sommes lancés dans le relevé de l'édifice avec une étude de faisabilité pour la remise en fonctionnement de l'éolienne qui est en fait un puits de cent cinquante mètres de profon-

deur, et nous avons cherché à réalimenter un plan d'eau proche de cet endroit. L'étude a abouti au dépassement, par rapport aux devis, de ce qui est autorisé dans les travaux d'entretien si bien qu'il a fallu, avec l'accord du conservateur régional, transmettre le projet à l'architecte en chef des monuments historiques.

Cette expérience est l'occasion d'évoquer ici une constante de l'enquête qui est le rôle reconnu par tous mes confrères des agences, des architectes en chef comme pôles de réflexion privilégiés sur les techniques de restauration du béton armé. Il m'a également été souligné le rôle des écoles d'architecture, des CAUE et de l'association DOCOMOMO international. On se doit également de mentionner l'agence de Cécile Briolle et Jacques Repiquet qui a fait un excellent travail à la villa Noailles et qui travaille sur l'hôtel Latitude 43 à Saint-Tropez.

La présence d'éléments en béton armé importants dans des monuments classés est indiscutable et on doit signaler les travaux d'Yves-Marie Froidevaux sur les dalles de gaine notamment au Mont Saint-Michel et au château de Chambord.

Second volet de l'enquête : l'urbanisme

C'est l'aspect le plus intéressant à cause notamment de la question des démolitions ; curieusement, l'un des premiers contacts de l'architecte des bâtiments de France avec le patrimoine en béton armé c'est véritablement le permis de démolir – nous l'avons vu avec le château d'eau de Luçon –.

En effet l'extension des protections des monuments historiques dans les faubourgs des villes, l'extension des sites inscrits fait que nous sommes consultés de plus en plus sur des territoires très larges, notamment pour les permis de démolir, ces démolitions concernant souvent des bâtiments en béton armé.

Un usage de plus en plus fréquent – qui reconnaît en quelque sorte l'expertise de l'architecte des bâtiments de France – est de demander des permis de démolir y compris en dehors des périmètres de protection ou des sites, notamment lorsqu'il y a une polémique locale. Dans la plupart des cas c'est un cas désespéré : un permis de démolir ça doit déboucher sur une démolition et c'est quasiment ficelé d'avance, c'est pourquoi dans l'enquête ces cas apparaissent comme regrettables. On pense ici à l'usine à gaz de Tours, à la piscine Gambetta à Rouen, au téléphérique du Mont Verrier au-dessus d'Annecy – il n'est pas encore démolé mais il semble que ce soit sur le point d'être fait – aux hangars de Berre l'étang dont une moitié a été démolie, au pont de Souza dans les Côtes d'Armor – un article tout à fait intéressant dans la revue *Pierre d'angle* a relaté cet événement ; il semble que ce qui a activé sa démolition c'a été le passage du tour de France ; le tour de France n'est pas seulement un événement médiatique c'est aussi un facteur de destruction dans nos départements –.

Dans le département de la Manche il y a eu un épisode homérique, celui des Chalutiers cherbourgeois, entrepôts et bureaux d'une société de pêche délocalisée qui était la

proie de promoteurs parapublics – ce sont souvent les pires – qui confondaient le port de Cherbourg et la promenade des Anglais : le projet se mesurait en kilomètres de balcons et l'on sacrifiait au passage deux immeubles de 1820-1830 et un entrepôt des années trente qui comportait une superbe mosaïque art déco en fronton !

Après d'âpres discussions j'ai obtenu la conservation de l'un des deux immeubles anciens, de la mosaïque et – tant s'en faut – un meilleur travail d'architecture respectant le parcellaire ; mais l'ensemble des entrepôts est passé sous les démolisseurs ! À Dieppe, on démolit la gare maritime pour mettre en valeur les quais du XVIII^e siècle ; à Dole notre confrère regrette également une superbe station-service située dans l'emprise du canal Rhin-Rhône...

Le patrimoine : quelques exemples de réussites

- À Dax, Gabriel Jonquières d'Oriola a fait pencher la balance en faveur de l'atrium casino d'André Granet (1928) qui était menacé de démolition, puis à la faveur d'une inscription à l'Inventaire il a été l'objet d'une restauration tout à fait intéressante dirigée par des architectes bordelais.

- À Saint-Lô, dans un contexte de réunion publique posant le problème du devenir de la place de l'hôtel de ville, Jacques de Vanoise, qui s'était méfié et s'était rendu à cette réunion, s'est trouvé quasiment piégé et a dû polémiquer publiquement avec le maire sur cette démolition ; finalement un permis de démolir n'a pas été accordé car dès la réunion publique on a su que l'architecte des bâtiments de France s'opposerait à la démolition. La place a été entièrement réhabilitée et la halle qui est attenante à la tour des pompiers sert de halle au marché, ce qui est en définitive une bonne utilisation ; au pied de cette tour qui sert de signal il y a un point accueil de l'office du tourisme.

- Toujours à Saint-Lô, on a pu conserver tout un hall en pavés de verre qu'il était prévu de démolir à la préfecture.

- À Chalons-sur-Saône, c'est Jean Guillaume qui s'est opposé à la démolition de la chapelle de la Colombière, une œuvre quasiment inconnue de Perret.

- À Mousson, en Lorraine, Sophie Chabot a utilisé une ruse pour prolonger une petite chapelle menacée de démolition. La chapelle étant située sur une hauteur, Sophie Chabot a exceptionnellement autorisé la mise en place d'une antenne de relais téléphonique, ce qui est habituellement quelque chose contre quoi nous luttons. Cela a permis en l'occurrence d'entretenir cette petite chapelle qui a maintenant une utilité puisqu'elle sert de support à une antenne téléphonique. Mais les inquiétudes restent vives pour la protection du patrimoine minier en Lorraine et également dans l'Allier, à Noyon-sur-Allier où il y a une association locale d'anciens mineurs qui se mobilise pour qu'on restaure ce patrimoine industriel.

- Les extraordinaires silos à grain de Larenc au port de Marseille ont passionné Le Corbusier ; ce dossier a fait l'objet d'un soutien éclairé de nombreux spécialistes du mouvement moderne : DOCOMOMO, Gérard Monier, Claude Jasmin, René Borgex – avec ses étudiants de l'école d'architecture de Marseille – et Gilles Bouillon,

l'architecte des bâtiments de France qui a donné un avis défavorable à la démolition. Or, l'avis n'était pas conforme puisque les silos sont en dehors des périmètres de cinq cents mètres ; cela a cependant engagé le préfet à surseoir à la démolition et à demander une expertise à la direction du patrimoine. Ce dossier a donc été transmis à nos collègues de la Direction régionale des affaires culturelles, notamment à François Goven qui est très passionné par ce type de patrimoine. Une mission d'inspection générale composée de messieurs Jantzen, Prévot-Marcihacy, Vincent assistés de François Loyer s'est rendue sur les lieux. Cette mission d'expertise penche pour la conservation et la réutilisation de ce bâtiment qui est exceptionnel tant par sa situation que sa valeur de mémoire ; mais il ne semble pas qu'on ait proposé de le classer ni même de l'inscrire au titre des monuments historiques. Quelle que soit l'issue de cette affaire, ce bâtiment aura suscité un nombre d'études extraordinaires et un surcroît de connaissance et d'intérêt pour ces architectures. Plus encore, il a engagé les Marseillais à prendre conscience de leur patrimoine récent et cela a donné lieu à la publication d'un numéro spécial de la revue *Monuments Historiques* entièrement consacré à cette ville dont on ne peut pas dire qu'elle ait une tradition de lieu de patrimoine.

- L'usine Vicat à Vif avec ses fours, la charpente d'un entrepôt traitée d'une manière qui se situe entre le métal et le bois, et un hangar tout à fait extraordinaire qui m'a été signalé par Marie Minier, architecte des bâtiments de France, présente un grand intérêt.

- La villa Caroy à Croix, qui est entre le zist et le zest, est toujours très menacée...

Dans tous ces cas les architectes des bâtiments de France sont très mobilisés mais ils ont besoin de notre appui.

Il faut rappeler que c'est l'appui d'une quarantaine d'architectes de renom, au moyen d'une pétition auprès du ministère de la culture de l'époque, qui déboucha sur l'instance de classement des halles de Reims. À l'époque notre confrère André était dans la solitude la plus complète ; il s'est arc-bouté, a résisté pendant plusieurs années à la démolition de ces halles et, grâce au réseau des architectes des bâtiments de France – c'est lors d'une mémorable réunion syndicale des architectes des bâtiments de France qu'il a été décidé de parler de ces halles tous azimuts et particulièrement dans les milieux de l'architecture – ces halles ont été sauvées : en effet Pierre-Antoine Gatier s'est attaqué au problème et quand Pierre-Antoine Gatier ou un architecte en chef travaille sur un bâtiment c'est en général qu'il est déjà sauvé !

- Les halles de Freyssinet de Berre-l'Étang subsistent encore et sont devenues un gymnase ; cela a été une réutilisation tout à fait exemplaire.

- L'usine Bloch à Châteauroux, construite par Hennequin en 1937, a été longtemps le camp américain de Déole à la sortie de Châteauroux ; c'est actuellement un lotissement industriel dans lequel toute une pépinière d'entreprises s'est installée avec ses sièges sociaux ; et selon notre confrère Siofi, tout cela fonctionne très bien.

- Le château d'eau de Blois est devenu un signal pour faire une salle de musique rock ; ce fut un projet traité avec humour par un professeur à l'école spéciale Gilles Perry de Boituyer.

- La maison de la culture de Bourges a été tout à fait rénovée. On ne peut pas dire que le programme ait beaucoup changé : c'était une salle des fêtes, c'est devenu une maison de la culture.

- Le château d'eau de Vandœuvre que j'avais découvert lors d'un palmarès de l'habitat près de Nancy, a été transformé en logements sociaux ; c'est un projet tout à fait intéressant.

- Le centre commercial moulin Alger près de Metz est entièrement construit dans une ancienne usine.

- L'ancienne usine de parfums de Grasse réhabilitée sans grande recherche architecturale par les services municipaux est devenue une salle de sport et d'expositions. L'intérêt de cette opération tient dans la qualité du bâtiment lui-même que l'on appelle la mosquée : il a été construit en 1898 avec des claustras en ciment armé sur le modèle d'un établissement plus ancien fait en briques à Boufarik en Algérie. Il est inscrit à l'inventaire depuis 1992 grâce au travail de monsieur Verrier, architecte des bâtiments de France, et de François Goven.

Il y a parfois des œuvres d'architecture contemporaine qui font l'objet de publications dans les revues comme la maison du livre et de l'affiche de Chaumont en Haute-Marne : d'anciens silos construits près de la gare ont été réhabilités par les architectes Patrick et Daniel Rubin de l'atelier Canal ; ils ont remarquablement tiré parti de cette friche située en centre ville près de la gare. Il y a dans ce travail d'architecture un mariage heureux entre des structures en béton armé d'une très forte présence et la créativité d'architectes férus de couleur et de détails raffinés. Ils ont été sélectionnés par voie de concours ; le projet était sous la présidence du maire de Chaumont, François de Rouvre, que l'on peut qualifier de maire éclairé quant aux problèmes d'architecture et d'urbanisme.

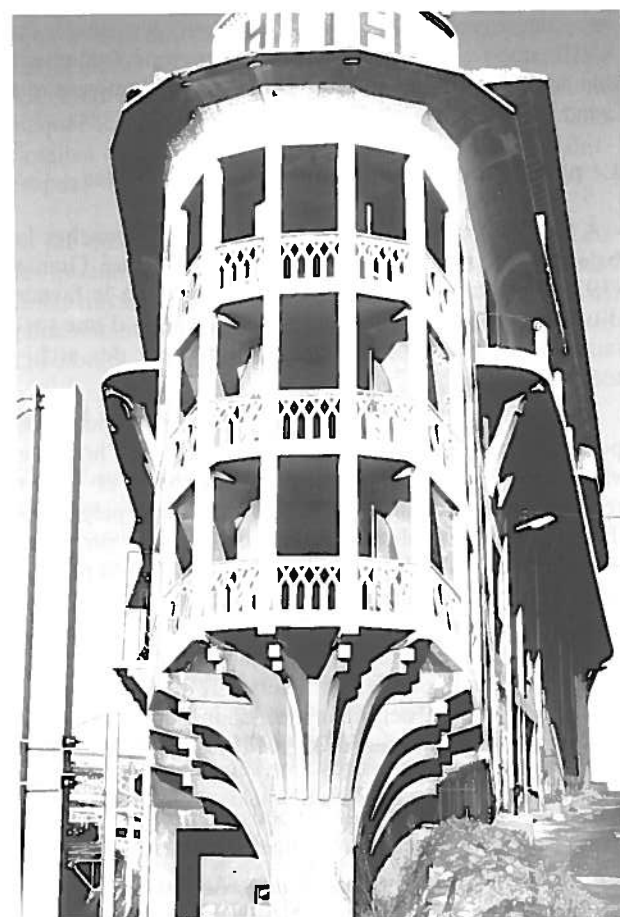
- Le mur de l'Atlantique : Max Robert, dans le *Bulletin d'Icomos-France*, a eu l'occasion d'étudier toutes ces constructions et en a fait de très jolis croquis ; ces nombreux bunkers ne sont pas tous devenus d'inquiétantes carcasses prêtes à basculer au pied des falaises attaquées par la mer !

Le film "Béton désarmé" réalisé par le cinéaste breton Jean-Pierre Le Bihan évoque toutes les fonctionnalités nouvelles de ces bâtiments : discothèques, studios de musique, résidences secondaires... Les artistes ont une façon particulière de revisiter ces blocs particulièrement fonctionnels qui n'ont heureusement pas trop servi.

En matière d'urbanisme les architectes des bâtiments de France sont confrontés à la recherche de règles qui puissent s'adapter de façon pertinente à chaque lieu. À ce titre la restauration et surtout la gestion quotidienne des quartiers modernes de Pessac, œuvre de Le Corbusier, ont amené le service départemental de l'architecture de Gironde et Jean-Bernard Faivre à rechercher des règles et une méthode. C'est à la suite de l'inscription à l'Inventaire de l'un des immeubles et grâce à une série d'études menées avec des financements publics que des chantiers pilotes subventionnés ont pu démarrer un processus : l'implication de la municipalité, la sollicitation de l'ANAH par mon confrère d'EDF ont permis de dégager plusieurs thèmes. Des financements de la Direction régionale de l'architecture et de l'équipement ont également été obtenus.

Toutes les séries à thème de menuiserie extérieure, protection de façades polychromie originelle ont été étudiées ainsi que les possibilités d'étendre les surfaces habitables. Un cahier des charges a alors été mis en place et a débouché sur une zone de protection du patrimoine architectural et urbain.

Lors du dernier colloque des architectes des bâtiments de France à Bordeaux, la visite de Pessac avec Jean-Bernard Faivre nous a montré le chemin parcouru depuis le temps où Boudon écrivait "Le Pessac de Le Corbusier".



Hôtel du rayon vert - Cerbère

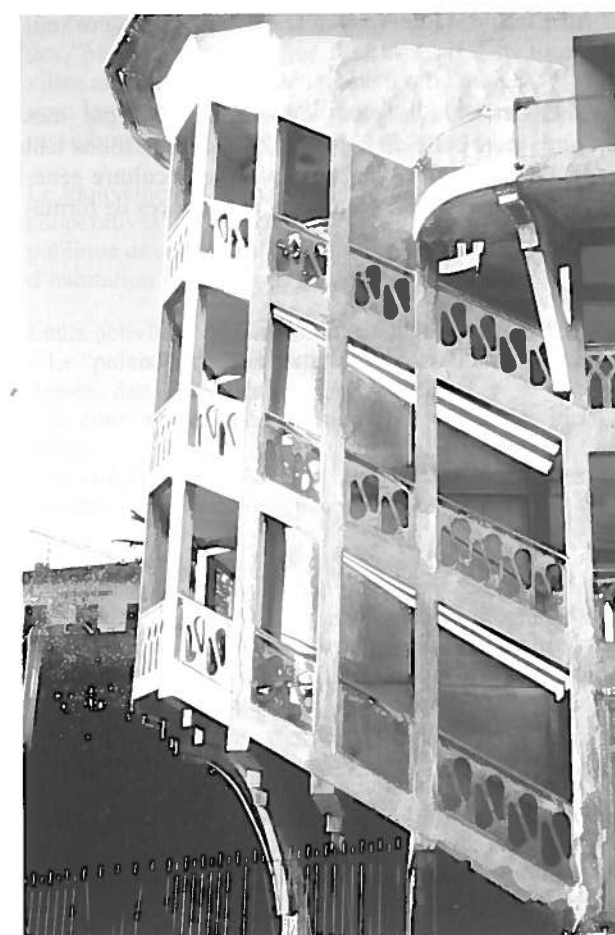
LES ZPPAU

Parmi les recherches de règles d'urbanisme la procédure des ZPPAU est de plus en plus utilisée par les villes de la reconstruction : Royan, Le Havre, Brest, Coutances, Lorient, Maubeuge, mais aussi par les villes ayant des parties urbanistiques modernes très affirmées comme Vichy, Osgore, Biarritz ou Villeurbanne.

D'autre part à Blois, Tours ou Rouen, les secteurs sauvegardés ont spontanément inclus des quartiers entiers de la reconstruction. À Blois c'est André Aubert, architecte urbaniste en chef de la reconstruction de Blois, qui fut le premier architecte du secteur sauvegardé de Blois et qui tout naturellement a inclus son œuvre dans la zone du secteur sauvegardé.

Lors d'une formation destinée aux architectes des bâtiments de France de l'Ouest de la France Max Boisrobert

et Jacques Boissière nous ont présenté la ZPPAU de Royan. Orientée vers la protection du patrimoine balnéaire d'une part et de tout l'ensemble reconstruit après la guerre, l'idée de création d'une ZPPAU remonte à 1986, année de la démolition de l'ancien casino. Cette démolition a agi comme un électrochoc et une exposition a été organisée par le CAUE et un festival de cinéma a pris pour toile de fond l'architecture des années cinquante, témoignant ainsi d'une prise de conscience et d'un intérêt pour cet urbanisme. En 1990 l'étude de la ZPPAU est confiée à Alain Charrier, architecte à Bordeaux, et à Marc Saboyat, historien. Pendant les quelques années de latence de la procédure, les services municipaux se sont complètement approprié cette démarche et ont peu à peu testé sans le dire le règlement proposé ; celui-ci comprend un classement des édifices intéressants et des degrés d'exigence adaptés aux diverses architectures et à leur gabarit urbain. Mais l'essentiel reste la meilleure connaissance et la valorisation de ces architectures aux yeux des élus et des habitants de Royan.

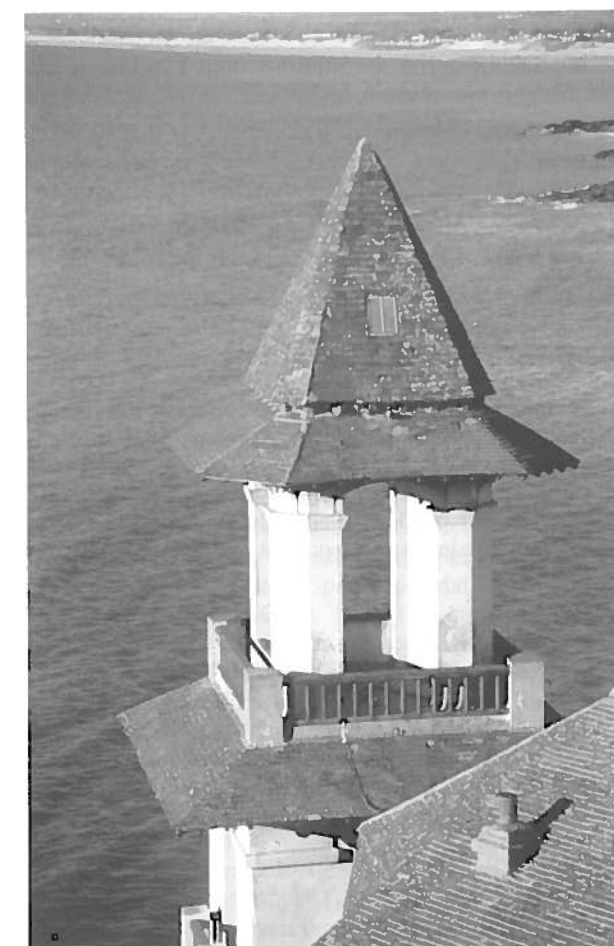


Hôtel du rayon vert - Cerbère

Les Directions régionales des affaires culturelles ont inventorié l'ensemble des protections monuments historiques sur les édifices en béton, ce qui m'a permis de classer par grands thèmes une série de vues qui correspondent à quelques coups de cœur des uns et des autres : ce ne sont pas toujours des édifices protégés au titre des monuments historiques...

- À Blois, il y a une église que j'ai fait découvrir aux Blaisois lors des journées de l'architecture ; un tout petit article est paru dans la presse et on a eu deux cent cin-

quante personnes ; j'avais fait venir in extremis le fils de l'architecte Paul Rouvière qui fut, je crois, le premier officier mort sur le champ de bataille de Dunkerque en 1940 et qui de ce fait n'a pu terminer cette œuvre que je trouve pour ma part tout à fait intéressante. Elle est attachante à un autre titre : grâce à la personnalité d'Yves-Marie Froidevaux, l'architecte qui a suivi ce chantier dans l'immédiat après-guerre et qui a très bien réussi tous ses détails d'architecture, de parements avec des sables tamisés, avec des effets de relief ; et enfin l'intérieur a été traité par le peintre-verrier Barillet.



Casino - Granville

- Toujours dans l'architecture religieuse, il y a la petite chapelle de Saint-Roin à Bollieu-sur-Argonne dans la Meuse qui est l'œuvre d'un moine-architecte, frère Ressigier.

- L'église Saint-Louis, de Marseille, est inscrite à l'Inventaire ; œuvre construite en 1935 par l'architecte Jourdeau, elle s'insère remarquablement dans le paysage marseillais.

- Sur le thème de l'habitat, on trouve par exemple la villa Sayer de Richard Bruer dans le Calvados.

- La maison de l'architecte Howard à Marseille avec ses créneaux est typique d'une certaine façon de travailler à Marseille qu'on appelle la rocaïlle.

- Certaines des maisons de Boulogne-Billancourt ont été construites par Lurçat ou par Perret.

- En matière d'architecture commémorative il y a une œuvre assez singulière, très ancienne puisqu'elle remonte apparemment aux années mille huit cent soixante-dix – on ne sait d'ailleurs pas très bien s'il y a des armatures – c'est la tour Rivalan à Fontenay-le-Comte.

- La tour Perret à Grenoble remplit aussi cette fonction ; elle doit d'ailleurs faire l'objet d'études par le Cercle des partenaires du patrimoine

- La tour de télévision de FR3 à Marseille

- L'architecture hospitalière a permis également des œuvres tout à fait extraordinaires comme le sanatorium de Henri-Jacques Lemaine à Praz-Coutan en Haute Savoie.

- L'hôpital mémorial de Saint-Lo dont l'architecte fut Paul Nelson présente un intéressant travail de Fernand Léger.

- Et enfin l'architecture industrielle offre le bel exemple des usines Vicat

- Dans le Loir-et-Cher à Saint-Amand-Longpré on trouve deux intéressants silos de périodes différentes.

- Et enfin l'œuvre de l'architecte Batla, construite en 1919 à Cerbère, à la frontière avec l'Espagne dans les Pyrénées-Orientales, est tout à fait extraordinaire.

Un des intérêts de l'enquête était de connaître l'approche intellectuelle des architectes des bâtiments de France par rapport au béton armé. Il y avait donc une question sur le sujet. J'ai pu constater que comme tous les architectes ils se sont abreuvés pendant et après leurs études au lait du mouvement moderne ; ils sont tout sauf indifférent au béton armé.

Certains s'en défendent : "Je ne suis pas là pour m'occuper des bars des années soixante", "Doit-on donner le label monument historique à des œuvres mal construites dès l'origine ?" "Le matériau n'a pas à prévaloir dans l'appréciation de la qualité d'une architecture"...

Plusieurs d'entre eux se considèrent comme investis d'une mission de vigilance : "La protection du patrimoine des XIX^e et XX^e siècles doit être la préoccupation majeure d'un architecte des bâtiments de France", "ce sont les époques les moins étalonnées à l'heure actuelle", "le temps n'a pas encore permis de sélectionner les œuvres"...

D'autres témoignent de leur enthousiasme voire de leur passion militante et exercent parfois une forme d'apostolat ; je pense à Jean-Marie Claustre qui a toujours son petit panier de diapositives et qui va faire des conférences tantôt sur l'urbanisme du XX^e siècle dans la Somme, tantôt sur l'influence de Vatican II dans l'architecture religieuse.

Mais la demande la plus souvent formulée par mes confrères reste celle de la formation à ces questions tant sur le plan technique que sur le plan de la culture générale. On connaît encore trop peu d'expériences de formation permanente sur ces questions.

François GONDRAN
Architecte des bâtiments de France

L'habitat des cités dans l'Allemagne des années vingt

On ne peut surestimer l'importance du "Neues Bauen" sur l'habitat de cette période hélas trop courte de la république de Weimar.

Ce fut un véritable défi que de s'attaquer aux quartiers des "Mietskasernen" – que l'on trouvait dans toutes les villes allemandes de la deuxième moitié du XIX^e siècle – avec leurs centaines de milliers de logements mal bâtis, insalubres, sales, mal entretenus et surpeuplés.

Le mouvement d'entraide de la classe ouvrière, avec ses coopératives d'habitation dotées d'un statut d'utilité publique développa des projets et réalisa des programmes d'habitation réussis mais en nombre insuffisant.

Leurs activités concernaient trois types d'habitation :

- Le "palais", couvrant un îlot complet dans des quartiers denses, dans les villes mêmes,
- la cour résidentielle dans les faubourgs des grandes villes,
- la cité-jardin située dans des zones limitrophes des grandes agglomérations, accessible en transport en commun.

L'immense succès que connurent ces premières réalisations (1890-1914) incita le gouvernement allemand à les utiliser comme modèles après la première guerre mondiale dans sa politique de développement d'une large production de logements en vue de remédier à la pénurie de l'après-guerre.

Avec la fondation par des communes, des lands, des églises, des patrons, des syndicats, de plus d'un millier d'organismes reconnus d'utilité publique, sous la forme de sociétés anonymes (S.A. et S.A.R.L.), la république de Weimar inventait les acteurs de l'habitat nouveau de masse. La conception moderne, saine et complète de ces cités, la qualité de leur architecture avant-gardiste, le respect qui apparaît à l'égard de l'usager sur les plans des appartements, de leurs équipements – toilettes, salle de bains, chauffage central, cuisine électrique –, leurs systèmes de financement, suscitait déjà l'admiration des professionnels du monde entier. Situées hors des centres urbains, la plupart de ces cités subvécurent aux bombardements de la seconde guerre mondiale, avec seulement quelques dégâts.

L'appauvrissement que connut l'Allemagne après-guerre, les changements qui s'opérèrent dans l'artisanat et dans les métiers, une mauvaise lecture de ces cités par les dirigeants des organismes propriétaires – une nouvelle

génération d'architectes et d'ingénieurs –, conduisit à un premier mauvais traitement de ces ensembles : l'emploi des matériaux "nouveaux" (les crépis, par exemple) sur les façades, de fenêtres "modernes", de couleurs "à la mode" banalisèrent ces cités, leur ôtant toute finesse et originalité.

Les vagues de "modernisation" qui suivirent anéantirent progressivement la qualité subtile de l'architecture originale.

Au cours des années quatre-vingt, une nouvelle génération d'architectes constatait avec regret qu'il ne restait que très peu de ces joyaux de l'architecture et de l'habitat du mouvement moderniste à l'état original. Fort heureusement, partout en Allemagne, des personnalités ne se contentèrent pas d'établir pareil constat. À Berlin, par exemple, la GEHAG et la GSW, propriétaires de quelques-unes de ces cités fameuses construites lors de la réforme de l'habitat dans les années vingt, se réunirent avec les responsables du service des monuments historiques local et des architectes engagés dans la "recherche de l'architecture perdue" – comme Helge Pitz et Winfried Brenne – afin de se rapprocher autant que possible de l'état antérieur.

Trois objectifs furent alors définis :

- Redécouvrir et retrouver l'état originel de l'architecture de ces cités au moyen de recherches approfondies ;
- établir une documentation sur l'ensemble des détails composant chaque cité en vue d'apporter les renseignements nécessaires à l'utilisation des matériaux idoines lors d'éventuelles opérations de réhabilitation et d'entretien ;
- recréer, chaque fois qu'une opération de réhabilitation s'avèrerait nécessaire, l'état original de ces cités.

L'intérieur des appartements et leur équipement technique étaient d'une telle qualité soixante ans après leur construction qu'il ne fut pas nécessaire d'intervenir. La majeure partie des travaux concernait les façades et la réparation des fenêtres.

Les dégâts déplorés sur les façades provenaient d'une mauvaise composition des matériaux utilisés lors des réparations d'après-guerre.

À l'origine, on avait passé plusieurs couches d'enduit – en frottant la dernière pour obtenir une surface lisse et ferme – puis on avait mis une peinture en guise d'enduit de peintre, peinture qui, avec ses composants minéraux,

avait rendu la surface siliceuse et l'avait fait durcir tout en lui donnant des couleurs brillantes persistantes.

Après la guerre, lors d'une opération de réhabilitation de l'habitat de Berlin, on a cru bon d'employer les matériaux les plus modernes, notamment les peintures vinyliques, acryliques et glycérophthaliques. Ces peintures ont formé un film de latex artificiel sur la surface de l'enduit ; or ce film ne résiste pas très longtemps aux tensions causées par les changements de température, l'humidité, la pression due à la vapeur. Sa dégradation se traduit par des lacérations, puis des lambeaux qui en se formant entraînent des petits morceaux d'enduit, en détruisant ainsi la surface.

Les travaux de rénovation ne concernaient pas seulement la restauration à l'état originel, ils nécessitaient des recherches préalables sur :

- l'état initial,
 - les matériaux utilisés à l'époque,
 - les anciennes méthodes d'utilisation de ces matériaux,
 - les éventuels matériaux de remplacement,
 - les effets physico-chimiques réciproques.
- Enfin, il fallut procéder à des recherches sur les couleurs initiales des cités, sans éléments de connaissance précis.

Grâce à cette initiative, quatre cité-modèles ont pu être récupérées et d'autres fleurons du patrimoine de cette époque ont pu être réhabilités par les Berlinoises, inspirés par cette coopération exemplaire. De plus cette méthode a fait école dans d'autres Länder de la République fédérale.

LES GRANDS ENSEMBLES DES ANNÉES SOIXANTE

Après la seconde guerre mondiale, les responsables politiques allemands durent faire face à une gigantesque pénurie de logements, ce qui les força à développer une importante politique du logement.

L'Allemagne occidentale, qui avait perdu le tiers de ses logements de 1939 pendant les bombardements, dut accueillir un grand nombre de réfugiés allemands des provinces Est de la nouvelle frontière germano-polonaise ainsi que d'Allemagne orientale ; c'est ainsi que la population de la R.F.A. passa de quarante millions d'habitants en 1939 à cinquante-quatre millions d'habitants en 1960.

La construction des cités sur le modèle urbanistique de la république de Weimar, avec des maisons d'une hauteur moyenne de quatre étages, ne suffit pas à répondre aux besoins nouveaux.

À la fin des années cinquante on vit naître partout en Allemagne occidentale les premiers "grands ensembles de tours et de barres" qui s'inspiraient de ce "style international" dont les premiers exemples, qui avaient vu le jour en Angleterre, dans les pays scandinaves, aux Pays-Bas et en France, avaient suscité l'intérêt des professionnels de la construction.

Ce type d'urbanisme qui se développait sur de vastes sites, permit une augmentation sensible de la production de logements avec l'utilisation de nouvelles méthodes de construction du béton et de montage d'éléments préfabriqués.

L'isolement de ces "villes-dortoirs", en général situées en marge des agglomérations, les problèmes de gérance propres à des grands ensembles comportant des centaines de logements sociaux, les inévitables problèmes que pose la cohabitation de tant de personnes en un seul lieu, attirèrent rapidement l'attention des gérants et des responsables de la politique locale et furent très vite au centre de leurs préoccupations.

Au moment où les premières réparations de grande envergure s'avéraient nécessaires sur ces grands ensembles, on dut à la fois intervenir sur les plans social, urbanistique et esthétique.

À Berlin comme dans beaucoup de villes d'Allemagne, on organisa dans un premier temps des réunions de concertation avec des membres de l'organisme-propriétaire, des architectes, des paysagistes, des sociologues, des représentants des locataires, des médiateurs locaux ainsi que des responsables politiques et administratifs. La participation des locataires et des administrateurs de la vie politique locale mena très vite à la concertation sur les priorités d'intervention dans tous les domaines, privés et publics, et força l'administration locale à attribuer les moyens nécessaires à la réalisation des opérations.

La liste des opérations sur les grands ensembles des années soixante concernait alors non seulement la réparation des immeubles, mais aussi un vaste éventail d'améliorations :

- réparation des façades avec une meilleure isolation thermique, voire acoustique des logements ;
- intervention sur les façades permettant des améliorations de fonds, c'est-à-dire des améliorations sur l'aspect esthétique des immeubles ;
- modification des entrées des immeubles plus adaptées au nombre d'usagers avec un accueil plus représentatif de ses usagers ;
- transformation des espaces autour des immeubles leur conférant plus de distance et de dignité ;
- vingt à trente ans après la construction de ces ensembles, les espaces verts étaient transformés en véritables parcs avec des grands arbres, au nombre d'arbustes limité et aux pelouses, chemins et espaces d'activités élargis ;
- la recherche urbanistique permettait la découverte d'un important potentiel de petits sites de terrains constructibles, potentiel qui, avec de nouvelles constructions, apportait souvent la correction des déficits en offre différenciée de logements, en matière d'urbanisme et d'esthétique ou en matière d'infrastructure sociale ;
- et enfin, amélioration, de l'accès de ces quartiers par le développement des transports en commun.

Ces interventions ont aidé à mieux intégrer ces ensembles dans le corps du bâti de l'agglomération, à améliorer les conditions de vie des habitants, à stabiliser la mixité sociale des quartiers, et à conférer une dignité architecturale aux immeubles.

Hans Jörg DUVIGNEAU
architecte-urbaniste
Gemeinnützige Siedlungs und
Wohnungsbaugesellschaft (GSW) - Berlin mbH

La gestion patrimoniale, urbaine et sociale, des grands ensembles des années soixante

Notre sujet trace en quelque sorte un parallèle entre ce qui s'est passé en France et ce qui s'est passé en Allemagne dans le mouvement du logement social. Il s'agit ici de traiter la question du patrimoine "HLM" en incluant la vie urbaine et sociale ; le patrimoine comporte deux typologies, les deux grandes sources du logement HLM : les ensembles construits dans les années vingt-trente en France, notamment en Ile-de-France, à travers l'action d'Henri Sellier, et les "grands ensembles" des années soixante.

La création des cités-jardins a été un mouvement très important en France notamment en région parisienne : ce mouvement a fondé de manière très forte l'action du logement social à travers d'une part des innovations technologiques, d'autre part un modernisme partiellement occulté par des aspects traditionnels, et également avec un projet social marqué.

Le bon état de ce patrimoine aujourd'hui - je le dis des HBM mais j'en dirai autant du patrimoine des années soixante - provient des opérations de grande réhabilitation que l'OPAC du Val-de-Marne a entreprises avec le souci de s'inscrire dans l'histoire, de comprendre et d'essayer de restituer ce qu'a été l'esprit de l'époque.

LA CITÉ-JARDIN DE CHAMPIGNY

Construite par Henri Sellier pour le compte de l'office des HBM de la Seine, elle n'attirait pas les clients à l'origine ; l'office des HBM de la Seine dut faire de la publicité pour avoir des clients pour ces logements !

L'organisation des logements montre un souci de fonctionnalité intéressant qui a posé un problème au cours de la réhabilitation ; c'est la coexistence de deux espaces très limités, une salle de bain et une cuisine d'une superficie très restreinte, avec des éléments quelquefois extrêmement modernes pour l'époque, à savoir un système d'assainissement commun qui permettait d'évacuer en même temps les ordures ménagères et les eaux usées. Des problèmes considérables se sont posés pour la rénovation des systèmes d'assainissement de plusieurs milliers de logements ; l'office des HBM de la Seine avait son propre réseau d'assainissement et ses propres usines de traitement des ordures ménagères.

La réhabilitation a été faite de telle sorte que par endroit il n'est pas possible de voir la différence entre le bâti-

ment d'origine et le bâtiment après réhabilitation. On ne voit pas la différence, si bien qu'on peut estimer que la construction originale était excellente ; ce sont des bâtiments qui n'ont guère souffert du temps. La réhabilitation a principalement porté sur les problèmes d'organisation interne des logements ; les dessins initiaux eux n'ont pas bougé. Mais dans certains cas il a fallu remplacer les fenêtres, les cadres de fenêtre d'origine, les ouvrants et les dormants qui étaient en acier, par du plastique pour des raisons d'isolation thermique et d'isolation phonique, et aussi parce que la refectation des châssis à l'identique aurait été d'un coût trop élevé.

Henri Sellier a manifesté une intelligence visionnaire en arrivant à faire un espace, un habitat relativement dense tout en maintenant un caractère du cadre de vie à la fois très urbain et très agréable. Il y aurait intérêt à rééditer aujourd'hui les textes d'Henri Sellier et des architectes qui ont travaillé avec lui : il s'y manifeste une extrême clairvoyance sur les plans architectural, urbain et social ; Henri Sellier aborde l'ensemble de ces problèmes avec beaucoup de modestie et de simplicité et en même temps une réelle profondeur ; les maîtres d'ouvrage, les architectes et les urbanistes seraient bien inspirés de relire ce qui a été écrit par lui et les équipes d'architectes qu'il avait réunies autour de lui dans les années trente.

La réhabilitation de ce patrimoine a atteint des coûts très élevés puisqu'ils sont chiffrés à environ deux cent vingt à deux cent trente mille francs par logement, ce qui est complètement hors normes si on se fonde sur les normes françaises de réhabilitation (les normes PALUOS). La raison en est que l'OPAC du Val-de-Marne a travaillé à l'intérieur des logements tout en remettant l'enveloppe en état ; le plus cher a été la remise à niveau des logements.

Le deuxième type de patrimoine qui appartient au parc des HLM et à l'OPAC du Val-de-Marne en particulier est celui des HLM des années soixante.

L'opération de réhabilitation dont il est question ici est une opération située à Orly-Choisy ; c'est un grand ensemble de près de six mille logements qui a été construit principalement par l'architecte Boileau-Labourdette et dont la qualité urbanistique et architecturale justifiait que nous le conservions en l'état.

Il est évident qu'il s'agit de constructions qui obéissaient à des objectifs de production de masse, d'industrialisation, de préfabrication, avec des panneaux préfabriqués et des ensembles qui ont des caractéristiques de rupture

par rapport au tissu urbain existant, ce qui n'est effectivement pas le cas des HBM de l'entre-deux-guerres.

Les bâtiments avant réhabilitation souffraient d'un manque d'entretien patent et d'une espèce de vieillissement des façades mais ils avaient un dessin que l'OPAC a voulu conserver.

On peut déplorer qu'un certain nombre d'opérations de réhabilitation de HLM se soient traduites par des rajouts de vêtues ce qui aboutit à un produit de bien moindre qualité qu'il ne l'était à l'origine au point de vue image et esthétique. Il y a là un véritable massacre d'un ensemble de paysages urbains qui trouve son origine dans le budget de l'opération – budget élaboré pour faire entrer ce type d'opération dans les enveloppes PALUOS –.

Quant à nous, dans cette opération, nous nous sommes attachés à garder l'esprit qui avait présidé au projet de Boileau-Labourdette à la fois en termes de plan de masse et de dessins de façades, avec le traitement des problèmes fonctionnels et en particulier tout ce qui a trait aux parties communes.

SITUATION DES GRANDS ENSEMBLES EN 1980

La nécessité patrimoniale d'intervenir, d'une part, et la nécessité sociale de remettre ce parc à niveau, d'autre part, se faisaient ressentir.

Les populations y résidant étaient généralement d'origine très modeste, et une dérive et une paupérisation de ces populations avec une tendance à la marginalisation s'y manifestaient. Ces ensembles sont sur la commune d'Orly, ville riche, mais aussi ville la plus pauvre, au regard de sa population, de l'ensemble du Val-de-Marne : c'est celle qui a le taux d'habitants non imposés le plus important. Le même ensemble est également situé sur la ville de Choisy-le-Roi.

L'activité de réhabilitation de ces immeubles s'est faite dans la mesure du possible en concertation avec les habitants, et avec l'objectif que ce patrimoine soit un patrimoine viable dans les vingt ou trente années à venir. Malgré la brutalité de ce type d'urbanisme il y a un traitement des espaces publics qui est assez satisfaisant, même s'il y a une légère rupture avec l'habitat existant. Il n'y a absolument aucune continuité, aucun traitement de l'espace urbain qu'utilisent les habitants le matin et le soir lorsqu'ils prennent le RER pour aller travailler à Paris.

LES PRINCIPES DE BASE DE LA RÉHABILITATION DES CITÉS HBM ET DES GRANDS ENSEMBLES

Le premier principe a été de s'appuyer sur tous les éléments positifs légués par ceux qui avaient construit ces ensembles.

Aussi bien dans les HBM que dans les logements, il nous est apparu très important de ne nous placer en aucune manière en rupture avec l'existant mais au contraire d'utiliser les aspects positifs.

Ce qui a importé c'est plus le sens de notre démarche que la problématique architecturale au sens strict.

Nous nous sommes attachés à définir comment on pouvait mieux exploiter l'environnement urbain existant et la situation géographique, comment on pouvait améliorer les valeurs d'usage des logements et des ensembles, et enfin comment on pouvait faire évoluer l'environnement et la vie sociale.

Les objectifs de la réhabilitation à proprement parler étaient essentiellement de rattraper le retard d'entretien et de tenir compte de l'évolution de la demande – en effet une grande partie de la programmation de ces logements correspondait à un état de demande quelquefois très ancien –, d'améliorer les normes de sécurité, de requalifier l'image de l'ensemble du quartier, d'engager un rééquilibrage du peuplement c'est-à-dire d'améliorer quand c'était possible la mixité sociale, et enfin de faire évoluer les comportements des habitants dont, pour une partie d'entre eux, toute l'éducation à la vie en collectivité urbaine était à faire. Il s'agissait en fait de travailler sur la réalité et sur l'image pour améliorer l'attractivité des groupes.

ÉLÉMENTS DE DIAGNOSTIC

En ce qui concerne les HBM, les points forts tournaient autour d'une grande richesse architecturale, de la connotation de quartier ancien avec une bonne intégration à la ville doté de moyens de transport d'excellente qualité, d'une communication rapide avec l'hyper-centre... Les points faibles sont la non-intégration de la voiture dans ces ensembles – problème important qui n'est toujours pas résolu –, la situation obsolète de ce que nous appelons des éléments de confort (le chauffage est presque toujours absent des salles de bain qui étaient des pièces humides, mal configurées), la présence de cellules assez étroites, de surfaces réduites, de populations anciennes bien ancrées mais peu désireuses de changement, et enfin d'une vie sociale banalisée avec un projet social – celui d'Henri Sellier – complètement dépassé. L'ensemble du mouvement des cités-jardins a essayé de faire vivre de manière concrète un projet social qui ne correspond plus aux réalités d'aujourd'hui...

Dans les HBM, il y a un niveau d'équipement qui date énormément – par exemple, l'évier-vidoir dans lequel on pouvait mélanger les ordures ménagères et les eaux usées servait en même temps de salle de bain – ; dans ces espaces il existe une tension extrêmement forte entre une grande richesse architecturale et une certaine pauvreté de l'espace à l'intérieur du logement, une opposition entre l'intérieur et l'extérieur.

En ce qui concerne les HLM les problèmes étaient de nature assez différente, avec principalement un problème d'intégration à la ville, mais avec, en revanche, des cellules d'assez bonne qualité, une volumétrie et des dessins d'immeubles assez bons. Et il est évident que nous avions un problème de dérive sociale tout à fait important : l'enjeu essentiel était d'utiliser au mieux les pratiques des habitants pour lutter contre les problèmes créés par la vie collective qui sont extrêmement grands dans ces ensembles.

L'OPÉRATION DE RÉHABILITATION D'ORLY-CHOISY : "HABITAT ET VIE SOCIALE"

Elle a d'abord consisté à revendiquer ce qui existait préalablement et notamment la présence du béton. La première démarche a été de présenter aux habitants l'opération de réhabilitation. Un document leur a été remis lors du démarrage de l'opération qui s'intitulait "Habitat et vie sociale". Nous avons volontairement essayé de replacer l'opération dans une perspective historique en indiquant ce qui était intéressant, ce qui était typique de l'époque et comment nous comptions le transformer. Nous avons instauré un dialogue avec les habitants en essayant de présenter l'opération et l'évolution des travaux avec régularité. Nous produisons donc des documents épisodiques que nous leur distribuons. Nous avons toujours tenté de leur faire voir ce qui avait été fait au regard du projet initial, d'intégrer les notions de service – élément très important dans ce type de quartier – et enfin de leur faire connaître les projets en relation avec les quartiers nouveaux.

LES RÉSULTATS

Les résultats que nous avons obtenus sont à la fois une requalification des espaces publics, avec un traitement de tout ce qui est à hauteur d'homme, et le maintien de l'architecture originelle ; avec par exemple, les entrées qui, jusque dans le plus infime détail n'ont volontairement pas été touchées. Par contre, dans les HBM, les entrées avec une fonctionnalisation par rapport au trajet des ordures et au trajet des personnes, ont été transformées de manière sensible ; il a été procédé au traitement des pieds d'immeubles de façon à permettre l'appropriation

par les locataires des pieds d'immeubles : une très grande richesse de végétation a été apportée, ce qui permet de donner une appréciation de l'ensemble architectural tout à fait différente.

Pour résumer, le travail a été beaucoup plus important sur les extérieurs dans les logements HLM et sur l'intérieur des logements HBM. En définitive, ces logements très populaires sont des logements qui sont occupés de manière "bourgeoise".

Quant à l'extension de ces quartiers, on a mis en place des programmes situés en bordure du grand ensemble, qui sont des programmes de liaison soit avec les transports soit avec le centre ville : le style d'architecture qui y prévaut est un style parfaitement cohérent, dont on peut dire qu'il s'inscrit dans la continuité ou avec des références architecturales assez proches de celles qui préexistent sur le site.

LES ARCHITECTES

Sur le grand ensemble, l'architecte est Boileau-Labourdette ; pour les HBM, il y en a plusieurs : l'opération de Maison-Alfort a été réalisée par les architectes Dubreuil et Humel – ce dernier est prix de Rome –, celle de Bobillot par l'architecte Maurey, et celle de Champigny par les architectes Pelletier et Teyssère.

Dans l'ensemble, les équipes d'architectes ont travaillé en relation étroite avec les principes d'Henri Sellier dans le cadre de l'École des hautes études urbaines.

Paul Louis MARTY,
Directeur général de l'OPAC du Val de Marne

Architecture et urbanisme dans une ville de la reconstruction : l'exemple du Havre

Parce qu'il bouleverse les catégories traditionnelles de l'esthétique urbaine, Le Havre dérange. Point, ou si peu, de vieilles pierres dont notre époque, fascinée par l'ancien, est friande. Nos repères, nos habitudes, ne trouvent guère de point d'appui.

Le Havre n'est pas de ces villes que l'on comprend d'un seul coup d'œil. Difficile d'accès, elle s'apprivoise. À ceux qui prennent le temps de s'arrêter, de regarder, d'y vivre, elle se révèle finalement le lieu d'une indéniable qualité de vie.

Si la reconstruction du Havre a posé, en son temps, nombre de problèmes à ses concepteurs, confrontés aux réticences des décideurs locaux, elle apparaît aujourd'hui comme un modèle d'urbanisme dans le monde entier.

Redécouvrir l'œuvre d'Auguste Perret et celle de son équipe, c'est essayer de répondre à des questions simples : Pourquoi ce Havre-là ? Comment s'est-il constitué ? Quelles images offre-t-il à qui veut comprendre ?

Lorsqu'il est chargé, en mai 1945, par le Ministère de la reconstruction, de conduire les travaux du Havre, Perret est l'une des figures marquantes de l'architecture du XX^e siècle. Afin de mieux cerner la singularité de la ville reconstruite, rappelons succinctement les grandes lignes de sa pensée. C'est une des clefs des rapports entre l'architecture et l'urbanisme de notre ville.

Perret a développé, essentiellement, deux convictions.

Premièrement, celle des potentialités du béton armé, qu'il utilise non comme un simple procédé technique, mais comme un matériau noble, mettant en valeur la structure des bâtiments – poteaux et poutres.

Deuxièmement, celle d'une culture architecturale classique, imprégnée des concepts de symétrie, de composition monumentale, et de rigueur géométrique.

Ainsi, l'aspect paradoxal de la démarche de Perret réside en l'application des principes d'inspiration classique à un matériau et une démarche résolument modernes.

Si les réticences esthétiques peuvent subsister, aujourd'hui encore, on imagine facilement le tollé qu'a provo-

qué son plan, lors de sa présentation aux élus locaux, en 1945. Ceux-ci, pénétrés de conceptions architecturales extrêmement conservatrices, ne rêvaient que de retrouver un calque de l'ancien Havre.

À les entendre, il aurait fallu, en plein XX^e siècle, plagier un style XIX^e qui était déjà, en son temps, de la copie ! La grandeur de Perret a été, précisément, de refuser cela.

Avec le recul, il semble qu'une reconstruction-reconstitution aurait donné un résultat semblable à l'image du Havre d'avant-guerre : une ville insalubre, à l'architecture très dense, d'autant que les logements étaient plus que vétustes.

Perret a donc imaginé un plan très aéré, fondé sur une extrême rationalisation du sol. Rigueur du tracé des rues ; systématisation de l'angle droit, générateur d'économie d'espace ; uniformité de construction. Autant de conséquences, formelles, d'une volonté d'homogénéité.

Quant à l'emploi du béton, il s'imposait. Préfabrication et construction en masse obligent ! Il s'agissait, alors, de reconstruire vite, tout en tenant compte de la pénurie généralisée. Pas question d'utiliser ni la pierre, ni la brique.

C'est là que Perret fait la démonstration d'un béton esthétique. Tantôt rose, tantôt jaune, coloré par des agrégats de minéraux ou de graviers, ce matériau ainsi anobli offre une diversité de teintes qui rompt la monotonie. Ainsi en est-il, par exemple, de la couleur des façades de l'avenue Foch.

Mais l'œuvre de Perret ne se juge pas uniquement à l'aspect extérieur des bâtiments. L'architecture rejoint l'urbanisme : la configuration interne des immeubles d'habitation est, elle aussi, révolutionnaire pour l'époque.

Ses premières réalisations, les ISAI, immeubles sans affectation individuelle, de la place de l'hôtel de ville, deviendront par la suite des classiques du genre.

Ils répondent non seulement aux exigences de l'ensoleillement, mais aussi aux nouveaux standards de l'équipement domestique et de distribution des pièces.

Cuisines ouvrant sur le séjour, vide-ordures, éviers en inox, salles de bains, eau et gaz à tous les étages : en

1950, on n'avait jamais vu ça ! Ainsi l'esthétique doit peut-être être relue, en tenant compte cette fois des enjeux que représentait une telle expérience de reconstruction.

Expérience frappante, par l'homogénéité du résultat, à l'exception de la ville haute où, faute d'avoir satisfait tous les besoins de relogement, la reconstruction a été suivie dans les années soixante et soixante-dix par une logique d'habitat social.

Cette deuxième étape va être le prélude à un éclatement urbain : entre la ville basse, monopole de l'Atelier Perret et lieu d'une unité architecturale rigoureuse et la ville haute, construite avec des moyens de fortune, la différence est flagrante. Elle souligne du coup la valeur constructive du centre.

Avant-guerre, ville la plus insalubre de France, Le Havre est à ce jour un modèle de relogement à grande échelle. Gardons-nous, par conséquent, des clichés nostalgiques, ne serait-ce que par respect pour un avant qui n'a de valeur que dans la mesure où le temps a opéré son travail d'idéalisation.

N'oublions pas non plus qu'en 1946, Perret avait devant lui une table rase. Comment résister à la tentation d'en faire une ville moderne, homogène, rationnelle, quand on a consacré toute sa vie à repenser l'architecture héritée des siècles précédents ?

Comment gérer cet héritage, telle est la question qui se pose aux successeurs de Perret.

Il ne s'agit pas de statuer le Maître : mais de faire vivre l'œuvre qu'il nous a léguée.

Protéger ce patrimoine hors du commun, certes : tel est l'objectif premier de la Z.P.P.A.U.P. créée en 1995, qui hisse cette ville contemporaine au même rang qu'un bourg médiéval ou une ville de l'Ancien Régime, qui font l'orgueil des autres cités de France.

Mais l'ambition est plus vaste.

Il s'agit, d'abord, de faire apprécier aux habitants cette architecture, pour laquelle ils ont perdu un regard neuf, ou qu'ils croient trop bien connaître à travers des itinéraires de découverte, par une mise en lumière des sites remarquables.

Il s'agit, ensuite, de convaincre les copropriétaires de respecter les normes de réhabilitation : couleurs du béton, encadrement des fenêtres, types de portes...

Il s'agit, enfin, de persuader les commerçants que la qualité architecturale de la devanture participe à l'attractivité de leur commerce et à l'image de marque de la ville.

Mais une ville n'est pas un musée ; une ville est vivante, elle évolue ; c'est le second défi à relever.

Pourquoi ne pas paysager certains espaces ? C'est une demande pressante des habitants qui peut contribuer à la mise en valeur de l'architecture.

Densifier la construction d'un centre qui ne l'est pas suffisamment pour des raisons historiques ? C'est certainement possible en harmonie avec ce qui existe.

La reconstruction a évité au Havre de connaître en son cœur les erreurs des années soixante, tout en la dotant d'un centre tout à fait moderne, capable de répondre aux exigences de l'urbanisme actuel.

Nos efforts doivent donc davantage porter sur les quartiers anciens, où il faut régler la pénurie de stationnement et la reconversion de l'ancien parc de bureaux ; notre action doit s'exercer dans le même temps et dans le même mouvement, en direction de ce que l'on appelait les ZUP de la ville haute et sur les quartiers du plateau où il nous faut requalifier les espaces publics et recréer la convivialité.

Le dernier enjeu porte sur les franges urbano-portuaires. Dans cet espace, où s'imbriquent les aires domaniales, se trouvent une diversité de bassins, d'espaces et d'architectures, dont le devenir sera déterminant pour l'image future du Havre.

L'étendue de ces espaces qui comportent des friches nombreuses, l'état de délaissement de certains d'entre eux, comme la force expressive indéniable de ces lieux, invitent à entreprendre là une œuvre urbaine ambitieuse, équivalente à celle qui a été entreprise au lendemain de la dernière guerre. Vous comprendrez que j'y insiste.

En s'imprégnant de l'esprit des lieux, de la configuration des volumes bâtis et des bassins, on peut saisir une chance sans équivalent, pour y produire un urbanisme et une architecture spécifique, où pourrait s'affirmer, de nouveau et fortement, l'identité portuaire du Havre.

Cette perspective, amorcée autour des bassins d'entrée de ville avec les implantations universitaires, le parc des expositions, l'espace Omnisport doit être confirmée.

C'est bien là le défi auquel la municipalité nouvelle a décidé de faire face. C'est donc dans le cadre d'une politique d'urbanisme volontaire, qui intégrera l'ensemble des contraintes liées au cadre urbain et architectural, mais qui s'engagera résolument dans la voie de la rénovation, qu'il faut inscrire notre vision du Havre de demain.

Parce que c'est à ce prix que Le Havre, ville déjà plusieurs fois nouvelle, pourra entrer dans la voie que nous avons choisie : celle de la modernité.

Christine d'ABOVILLE
Adjointe au Maire du Havre
chargée de l'urbanisme

Synthèse des rapporteurs

Le béton armé : histoire, techniques et architecture¹

L'histoire de la technique du béton et de sa mise en œuvre est celle de la construction durant l'ère industrielle : recherche d'un matériau économique disponible en tout lieu souple d'emploi, résistant au feu, aux tassements et aux tremblements de terre ainsi qu'au souffle des explosions. Sa production donne naissance à une stratégie de commercialisation et de développement d'entreprises, la mise au point de nouvelles méthodes constructives et surtout une modification profonde de la maîtrise d'œuvre : de l'inventeur au constructeur, de l'ingénieur à l'architecte, du constructeur au tâcheron, suivant une "organisation scientifique des chantiers" développée notamment à partir des années vingt.

Les capacités exceptionnelles de ce nouveau matériau modifient la conception de l'espace, de la structure à l'enveloppe architecturale, de l'ossature aux parois horizontales ou verticales et autorisent de nouvelles performances par l'utilisation du porte-à-faux et du pilotis. Cette capacité technique du matériau issu des formes calculées par l'ingénieur et dessiné par l'architecte conduit à une nouvelle esthétique.

Depuis une quinzaine d'années, l'histoire des techniques du béton armé a été renouvelée par les travaux de recherche sur l'industrialisation de la construction dont les revues comme la revue des Monuments historiques, les Cahiers de la recherche architecturale, ou Rassegna se sont fait l'écho. En France, les premières études sont lancées au ministère de l'Équipement par le plan-construction relayé ensuite par le secrétariat de la recherche architecturale. L'un des foyers de recherche est situé à l'École d'architecture de Nancy autour de Jean-Pierre Epron. Dès 1985 Joseph Abram présente ses premières recherches sur l'équipe Perret et son école et l'Institut français d'architecture organise alors un premier colloque sur l'histoire du béton armé. Le relais est ensuite pris en 1989 par l'École d'architecture de Grenoble aidée par le bureau de recherche architecturale.

Depuis cette époque, les études réalisées à partir des archives d'entreprises et des agences déposées récemment au centre des archives de l'architecture du XX^e siècle de l'Institut français d'architecture, celles déposées dans les archives publiques avec l'aide d'associations, ou des fondations comme la fondation Le

Corbusier donnent une nouvelle impulsion à la recherche. La thèse produite en 1995 par Gwenaél Delhumeau sur Hennebique et la construction en béton armé (1892-1914) a été réalisée à partir du dépôt des archives de l'entreprise. Un an plus tôt, Cyrille Simonnet présentait à l'École pratique des hautes études en sciences sociales également sa thèse sur l'origine, l'invention et l'esthétique du béton armé.

Ces recherches sur le béton ont été enrichies par les monographies récentes portant sur des architectes comme Le Corbusier, Auguste Perret ou André Lurçat, des ingénieurs comme Nicolas Esquillan ou Eugène Freyssinet, des études de synthèse sur les ouvrages d'art comme les ponts ou les églises parisiennes du XX^e siècle, des études d'inventaire topographique portant notamment sur des villes reconstruites comme Dunkerque ou Le Havre ou des études préalables avant travaux de restauration comme celle menée sur les halles de Reims.

En 1995, paraît la traduction française de *Concrete* – ouvrage précurseur sur l'histoire de l'invention du béton armé et l'œuvre du père de l'architecture en béton armé, Auguste Perret, écrit il y a plus de trente-cinq ans par un de ses anciens collaborateurs, Peter Collins. L'histoire technique du béton débute et se termine pour lui en France, avec des détours en Europe et en Amérique du Nord².

Au cours de la séance de travail du colloque du Havre, une étude comparative a été esquissée à partir de la présentation du résultat des recherches menées par la faculté d'architecture de Prague sur la République tchèque (Petr Urlich) et le centre R. Lemaire pour la conservation sur la Belgique (Luc Verpoest). Un panorama plus complet aurait été souhaitable pour souligner le rôle essentiel joué notamment par l'Allemagne et les Pays-Bas, et compléter les travaux de P. Collins et de R. Banham³.

¹ Pour une synthèse plus complète sur la France, voir Toulhier B., *Histoire du béton armé en France*. In : *Monumental*, n° 16, mars 1997.

² Collins P., *Concrete, the vision of a new architecture. A study of Auguste Perret and his precursors*. Londres : Faber and Faber, 1959, 307 p. Traduction française, *Splendeur du béton. Les prédécesseurs et l'œuvre d'Auguste Perret*. Paris : Hazan, 1995, 576 p.

³ Banham R., *A concrete atlantis. U.S. industrial building and european modern architecture 1900-1925*. London : The MIT Press, Cambridge, Massachussets, 1986, pp. 207-228.

UNE STRATÉGIE D'INVENTEURS ET D'ENTREPRENEURS

L'histoire du béton armé est d'abord l'histoire d'une idée. Elle émerge après un long tâtonnement à travers des intuitions et des erreurs, des inventions, des brevets et des techniques depuis la mise au point du mortier armé suggéré par Lorient en 1774. Le fer et le béton ayant sensiblement le même coefficient de dilatation, l'idée consiste à renforcer le béton par des armatures en fer ou en acier, judicieusement noyées dans la masse et qui permettront de faire travailler le béton ainsi armé, non seulement à la compression, mais encore à l'extension.

Les conditions matérielles de l'invention du béton ne seront réunies qu'au début de l'ère industrielle. La première usine française de ciment est créée à Boulogne-sur-Mer en 1848 et la mise au point du four Bessemer en 1855 autorise la fusion des minerais de fer de faible teneur. La barque en béton de ciment armé conçue par Joseph-Louis Lambot en 1848, présentée à l'Exposition universelle de Paris et brevetée en 1855 marque traditionnellement la naissance du béton de ciment armé.

Les premiers succès du béton tiennent à la commercialisation des brevets. Les principales inventions sont protégées par des brevets ou exploitées selon des systèmes imaginés par F. Coignet, Bordenave, W.B. Wilkinson, J.L. Lambot, J. Monier, P. Cottancin, A. Considère, F. Hennebique, etc. En 1855 et 1856, François Coignet dépose son brevet sur une armature de "tirants" de fer dans une masse de ciment. Dans son ouvrage de 1861, *Bétons agglomérés appliqués à l'art de construire*, il recommande l'emploi d'armatures métalliques incluses dans le béton. En 1867, le brevet du jardinier Joseph Monier porte sur des vasques à fleurs, des "caisses mobiles en fer et ciment applicables à l'horticulture". L'importance de Joseph Monier réside surtout dans la diffusion de son brevet en Allemagne, dans l'ensemble de l'empire austro-hongrois et aux Pays-Bas. Arnaud Considère invente en 1900 le béton fretté : les armatures enserrent le poteau pour résister à la compression. Jusqu'en 1906, deux cent soixante-deux brevets sur le béton armé sont déposés en France. Les principaux systèmes mis en œuvre jouent principalement sur les armatures des poutres et des hourdis-dalles et sur l'assemblage des poteaux et des poutres. L'objectif de cette industrialisation du bâtiment est claire : construire à bas prix du plancher en grande quantité à partir d'un matériau incombustible.

Le béton armé rencontre un faible succès chez les architectes : c'est d'abord un matériau mis au point par les entrepreneurs et les ingénieurs. Pour des architectes comme L.C. Boileau, secrétaire de la Société Centrale des Architectes, "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".

La création d'éléments préfabriqués est un des soucis constants de l'architecture en béton armé. Dès 1896, Edmond Coignet, le fils du fondateur de la société cen-

trale des bétons agglomérés, construit l'établissement de bains du casino municipal de Biarritz conçu par l'architecte Louis-Félix Calinaud avec des éléments préfabriqués, selon le système breveté en 1892.

En Europe centrale, l'exposé sur les réalisations tchèques – qui faisait encore partie au début du siècle de l'empire austro-hongrois – nous a montré que l'entreprise viennoise G.-A. Wayss et C. Freitag était plus connue que l'entreprise Hennebique pour les premières réalisations en béton armé de Prague. Hennebique comme d'autres inventeurs reprend le système traditionnel du poteau/poutre traditionnel appliqué au nouveau matériau. Mais le béton allemand, issu du système de Monier, tend vers une conception plus originale et applique le principe du béton armé à la dalle et au voile⁵. Le principe du voile mince sera également mis en œuvre dans les premières réalisations bruxelloises.

L'ingénieur zurichois G.-A. Wayss, associé avec C. Freitag en 1893, développe un modèle d'entreprise différent d'Hennebique selon un réseau de firmes avec prise de participation de capitaux dans les filiales, trustant l'ensemble de la chaîne de fabrication avec les producteurs de ciments et les laboratoires d'essais⁶.

Alors que le béton est largement répandu dans la construction, le béton des édifices nobles se cache encore ou se moule dans les habits et les ornements d'autres matériaux. Le béton est encore très lié aux édifices industriels et au génie civil. Pour des architectes comme L.C. Boileau, "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".

LE RAYONNEMENT DU SYSTÈME HENNEBIQUE

L'invention qui recevra la meilleure exploitation commerciale sera celle d'Hennebique qui développe les avantages de l'architecture en béton par des procédés liés aux armatures. Dans son brevet de 1892 modifié en 1893, François Hennebique place les fers en fonction des contraintes et préconise l'emploi des fameux "étriers" qui relient les fers longitudinaux pour répondre à l'effort tranchant. Hennebique applique ce principe à tous les éléments de la construction, les réunissant en une "construction monolithique".

L'originalité du système passe par la concession d'exploitation de ses brevets à des entreprises concessionnaires et des relations privilégiées avec les fabricants de matériaux comme les forges de Sedan. Hennebique suit le mode d'organisation industrielle à l'américaine – comme Ford aux États-Unis et plus tard Citroën en France – et développe un vaste réseau d'agents généraux. Ces agents d'Hennebique sont répartis dans toute l'Europe, en Russie, en Égypte et dans les colonies (deux

cent quatre-vingt-dix en 1902), avec des agents régionaux qui assurent les calculs et visitent les chantiers. Les concessionnaires sont des entrepreneurs locaux qui travaillent sous la supervision des agents et organisent les chantiers. En 1914, Hennebique compte soixante-quatre agences et sept cent vingt-cinq concessionnaires répartis dans trente-huit pays. La souplesse du système d'organisation est bien adaptée aux petites entreprises ou à la conduite d'énormes chantiers. À cette époque, le béton armé n'est ni une science d'ingénieur, ni un savoir-faire d'artisan, c'est une technique d'entrepreneur. Le contrôle de la bonne exécution des travaux mis en œuvre par une main d'œuvre peu qualifiée fait appel à des ouvriers spécialisés itinérants choisis par Hennebique et qui forment eux-mêmes les entrepreneurs agréés.

Mais le savoir-faire du chantier dépend d'abord du savoir-calculer du bureau d'étude. Ce bureau des études techniques (BET) est un maillon original de la chaîne de construction, véritable *prescripteur* d'un ingénieur-consultant qui décrète les dosages, dessine les configurations des armatures, calcule les phases du chantier... Hennebique forme dans son bureau technique central installé depuis 1900 au 1 rue Danton à Paris, de jeunes ingénieurs centraliens, futurs cadres de son réseau d'"assistance technique" et en contact étroit avec les agents régionaux ou étrangers. La maison Hennebique se veut apparaître "dans l'histoire de la construction contemporaine comme la plus grande école où tous, constructeurs et fonctionnaires, sont venus puiser de robustes connaissances pratiques et techniques en ces vastes bureaux de la rue Danton". Avant la première guerre mondiale une centaine d'ingénieurs et de dessinateurs y traitent plus de sept mille affaires par an.

La puissance de l'entreprise Hennebique réside dans sa capacité de démonstration, de promotion et de propagande. Hennebique est un pionnier des méthodes modernes de publicité commerciale : mode d'emploi du procédé, mise en place d'un congrès annuel sur le béton armé à partir de 1897, lancement l'année suivante d'une revue sur le "*Béton armé*" dont une partie est destinée aux seuls concessionnaires, présentation à l'exposition universelle de 1900... La revue d'Hennebique tire entre six mille et dix mille exemplaires et diffuse non seulement en France et en Europe mais aussi en Indochine, en Amérique du Nord et du Sud.

Le béton – utilisé comme matériau d'ossature ignifuge – est encore très lié aux édifices industriels et au génie civil. Les premiers bâtiments d'Hennebique sont des constructions utilitaires : la raffinerie parisienne à Saint-Ouen édifée en 1894-1895, la filature pour M. Charles Six à Tourcoing (Nord) en 1895 et celle construite pour Barrois Frères à Fives-Lille (Nord) en 1896, et la minoterie du Moulin idéal à Nort-sur-Erdre (Loire-Atlantique) en 1898. Le succès de la méthode est immense : entre 1892 et 1909, l'entreprise réalise plus de vingt mille ouvrages, dispersés sur plusieurs continents dont plus de mille trois cents ponts.

⁵ La maison Hennebique. In : *L'Architecture moderne*, mars 1914, p. 82.
⁶ *Le Béton armé, organe des concessionnaires et des agents du système Hennebique*. n° 1, 1^{er} juin 1898. Revue mensuelle éditée de 1898 à 1939.

LE BÉTON DES ARCHITECTES

Rares sont ceux qui, comme Anatole de Baudot dès 1894 avec la construction de l'église Saint-Jean de Montmartre (Paris), Tony Garnier en 1901 pour son projet théorique de Cité industrielle ou Auguste Perret en 1907 pour le garage de la rue de Ponthieu tentent de donner au béton une expression plastique propre. On retrouve par exemple la sémantique de cette construction de Perret dans la construction du palais Lucerna de Prague par Vaclav Havel. Pour l'avant-garde architectonique des années vingt, la nouvelle technique constructive produit une grammaire plastique spécifique

Avec le garage de la rue de Ponthieu, Perret marie la pratique du béton apparent au contrôle classique du système constructif. Cinq ans plus tard, avec le théâtre des Champs-Élysées, il transforme le projet et associe la trame architecturale de l'ossature de l'ensemble à la trame urbaine du parcellaire, conçoit la composition de la façade selon un tracé régulateur et y développe son nouveau vocabulaire. Monument public en béton armé le plus important de l'époque, le théâtre exploite toutes les qualités rationnelles liées à l'usage du béton armé.

Après la première guerre mondiale, Perret poursuit ses recherches sur l'ossature architecturée marquée notamment par la conception de l'église Notre-Dame du Raincy en 1922-1923, et le garde-meuble du Mobilier National en 1935-1936 – "*l'abri souverain*" – qui préfigure le Musée des travaux publics construit à partir de 1936, le prototype du nouvel ordre français.

Comme François Le Cœur, Perret interprète les éléments classiques en créant ce nouvel ordre architectural, celui du béton armé et en inventant un vocabulaire architectonique particulier qui s'étend jusqu'aux effets de matière du béton et sa texture telle maîtrise s'explique par la singularité de l'entreprise dénommée à partir de 1911 "Perret frères - Architectes - Constructeurs - Béton armé" qui permet d'associer le savoir-faire de l'architecte comme producteur de formes aux recettes de l'entrepreneur, expert en béton armé.

Suivant l'exemple des silos vus par Gropius et repris par Le Corbusier, l'architecture nouvelle exploite l'esthétique dépouillée de l'architecture industrielle et emprunte les principes de simplicité formelle, de transparence et de *vérité constructive*. Charles-Edouard Jeanneret propose notamment en 1915 le concept des maisons *Dom-ino*, destiné à une production industrielle en série en béton armé pour la reconstruction des régions dévastées par la guerre. Il reprend le principe de l'ossature de poteaux et de poutres orthogonales qui portent des planchers en dalles : la construction est libérée de la contrainte des murs porteurs.

En 1926, Le Corbusier prolonge sa réflexion dans "les cinq points d'une architecture nouvelle" sur les pilotis, les toits-jardins, le plan libre, la fenêtre en longueur et la façade libre. Cette construction "en ossature", adoptée par la majorité des architectes d'avant-garde de cette époque permet le percement des façades sur toute leur longueur. Les pilotis libèrent également l'espace sous l'édifice et la nature s'étend aussi sur le toit terrasse accessible et planté. Libéré des contraintes de structures, le plan de l'édifice se développe par rapport aux fonctions de l'édifice.

⁴ Joseph Monier resta longtemps l'inventeur du béton armé au vu des brevets qu'il déposa en Allemagne au début du siècle.

Cependant, pour des raisons d'économie et d'esthétique, on n'hésite pas à faire appel à la maçonnerie traditionnelle, réduisant l'emploi du béton aux planchers et aux porte-à-faux comme Mallet-Stevens à la villa Noailles. De même les apôtres de la *vérité constructive* sont obligés de tricher en masquant les parois de béton sous la peau d'enduits, de ragréages et de peintures qui posent aujourd'hui de fréquents problèmes de restauration. En 1898 déjà, la façade du siège de l'entreprise Hennebique est elle-même enduite de ciment par Edouard Arnaud de peur que la vue du béton brut n'attire les critiques. Au début du siècle, des pionniers comme l'architecte Auguste Perret n'hésitent pas à protéger le béton par un revêtement de céramique en grès flammé (voir par exemple l'immeuble du 25 bis rue Franklin à Paris, 1903). À cette époque, les compositions de céramique d'Alexandre Bigot, Émile Müller, Gentil et Bourdet font fureur sur les façades parisiennes en béton.

Ces recherches sur le rationalisme structurel s'expriment par l'*expressionnisme structurel*, qui se met au service de la *vérité constructive* du bâtiment. Pour Walter Gropius qui réfléchit sur l'usine moderne, l'expression structurelle devient un principe théorique et un principe esthétique. La façade vitrée de l'usine Fagus d'Afeld (Allemagne), réalisée avant la première guerre mondiale (1910-1914) avec Adolf Meyer forme une vitrine qui met en scène l'ossature du bâtiment.

Ce principe de transparence sera un thème cher aux modernistes que l'on retrouve après guerre dans le sanatorium d'Hilversum, plus tard dans l'usine Van Nelle de Rotterdam (par J.A. Brinkman et L.C. Van der Vlugt, 1926-1930). Ces principes ont été bien illustrés ici par les nombreuses maisons d'artistes parisiennes et quelques édifices de la Côte d'Azur et par les réalisations pragmoises de type "fonctionaliste" comme l'immeuble commercial Bata de la Place Venceslas ou le palais Olympique de la rue Spalena.

Les architectes modernes abandonnent la pureté abstraite de l'architecture blanche pour inventer une nouvelle esthétique : le béton s'exprime plus librement à travers une palette de textures et de formes. Le béton apparent, brut de décoffrage, est la source d'une esthétique de la trace qui valorise le travail sur la matière et la texture, comme à l'École nationale de musique (Paris), 1928-1929, ou au Musée des travaux publics (Paris), 1936-1946, œuvres d'Auguste Perret.

Quelques ingénieurs et de nombreux architectes pensent que cette structure doit d'abord découler de la logique et du calcul pour couvrir toujours plus avec moins de matière. D'après Antoine Picon, "le rationalisme structurel est d'abord lié à l'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". Cette économie d'énergie et de matériau est également soulignée à Prague dès 1926 par Jan Visek et démontrée aussitôt par la réalisation du Palais des expositions de Brno.

Le béton armé autorise le porte-à-faux et les dalles continues des "planchers champignons". Moulé, il se prête aux formes autostables comme les coques et les voûtes : voûtes nervurées, surfaces à double courbure comme les paraboloïdes hyperboliques des hangars d'Orly ou structures "pliées". La résistance de ces édifices en béton armé est due à leur forme qui répond à la "vérité de la structure".

La recherche de la performance par le calcul est particulièrement visible dans les ouvrages d'art comme les ponts français, toujours à l'affût des records de portée et de franchissement. En 1926-1929, Eugène Freyssinet construit un pont sur l'Elorn à Plougastel composé de trois travées de cent soixante-douze mètres. L'invention du béton précontraint en 1933 par Eugène Freyssinet, repoussera encore les limites du matériau.

Les études sur les voiles et les coques participent de ce même esprit, malgré la complexité des coffrages qu'elles exigent pour la mise en œuvre. L'exploit de l'ingénieur Nicolas Esquillan pour la voûte du CNIT de La Défense à Paris inauguré en 1958, en est un brillant exemple.

On notera également le paradoxe des architectes modernistes qui lient le nouveau langage plastique du béton armé aux recherches dans les courants artistiques du cubisme et du néoplasticisme. Le béton armé est le matériau du renouveau architectural qui permet d'obtenir des objets aux formes pures en échappant aux principes structurels traditionnels. La forme du béton armé ne dépend que du coffrage dans lequel il est coulé.

Les capacités plastiques de ce matériau sont aussi développées par des architectes comme Oscar Niemeyer. Les volumes courbes et blancs de la maison de la Culture du Havre (1979-1982) surgissent de la terre et de l'eau et dialoguent avec l'architecture de Perret, tramée et orthogonale, en béton brut ou peint.

L'USAGE INDUSTRIEL DU BÉTON DURANT L'APRÈS-GUERRE

La seconde guerre mondiale, avec la construction du mur de l'Atlantique, l'édification des bases aériennes et la reconstruction des ponts démolis développe les industries cimentières et prépare son emploi massif au lendemain de la guerre.

L'euphorie des trente glorieuses comme celle des années vingt pousse de nouveau le béton dans la voie des performances. Celle-ci ne sera plus qualitative mais quantitative, à la poursuite du record pour abaisser les coûts et augmenter la capacité de construire rapidement du plancher habitable pour le logement de masse. Une nouvelle réglementation pour l'emploi du béton armé est définie par le Ministère de la reconstruction dès 1945. Le système de préfabrication modulaire à l'échelle industrielle mise en place à cette date par Pol Abraham, architecte en chef de la reconstruction de la ville d'Orléans dans de petits îlots urbains est d'un prix de revient trop élevé et reste une expérience sans lendemain, comme celle de la cité du Champ des Oiseaux à Bagneux conçue par les architectes Beaudoin et Lods dès 1931.

Le marché du logement à grande échelle permet une préfabrication lourde d'éléments en béton armé à des coûts moindres qu'en béton armé classique. De 1950 à 1964, plus de quarante mille logements ont été réalisés par assemblages de grands panneaux préfabriqués selon le procédé de la société R. Camus et Cie dans leurs usines situées dans la banlieue parisienne, dans le Nord et dans l'Est. Ces panneaux de bétons sont coulés dans des moules métalliques et comprennent les baies et les équipements électriques et sanitaires qui sont montés en atelier. Le système Camus sera exporté dans toute l'U.R.S.S.

et dans les pays satellites. Des procédés analogues ou comparables sont mis en place par des entreprises comme Ed. Coignet, Balency et Schuhl ou des bureaux d'études techniques comme Barets. Les usines fixes peuvent être remplacées suivant les systèmes utilisés par des usines foraines ou mobiles, proches du chantier. Sur le chantier, la mise en œuvre du béton armé est facilitée par l'emploi de coffrages-outils qui permettent un "bétonnage continu" selon des systèmes dits "tunnels" ou des "coffrages glissants" verticaux (procédé *Concretor prometo* par exemple) et l'emploi de méthodes de durcissement accéléré (comme le système *Vacuum concrete*).

L'industrialisation du béton armé a été poussée à son point ultime de production en grande série d'éléments modulés comme pour les autres matériaux (pierre prétaillée, acier, bois, fibro-ciment...). Ces éléments standards préfabriqués et catalogués sont destinés à être assemblés comme de quelconques éléments de machines, de moteurs ou d'automobiles. En 1965, les soixante-treize usines fixes en exploitation, les cent cinq ateliers de chantiers et les soixante-trois applications de coffrages-outils offrent un potentiel journalier de construction industrialisée de quatre cent trente-huit logements environ. Mais l'industrialisation ne parvient pas à absorber la demande annuelle de logements : en 1956, elle ne couvre que le dixième des besoins.

Le transport de ces lourds panneaux limite le rayon d'action des usines, leur poids nécessite l'emploi de moyens de levage, ce qui entraîne la réalisation d'un plan d'ensemble figé suivant l'alignement de ces longues "barres" parallèles au tracé des "chemins de grue". Les baies sont étroites, pour maintenir la cohérence des panneaux pendant leur manutention. Les murs de refend porteurs conduisent à des plans rigides et la simplification des types induit une monotonie des façades.

À partir des années soixante-dix, le mythe du béton armé inaltérable aux attaques du temps s'effrite. Comme les autres matériaux, il subit les attaques des agents extérieurs qui l'altèrent. Aujourd'hui s'ouvre le temps de la protection, de la conservation et de la restauration.

IDENTIFICATION ET ÉTUDE DES OUVRAGES LES PLUS REMARQUABLES

Le ministère de la Culture pourrait afficher une politique générale de conservation de ce patrimoine par la mise en place d'une stratégie d'identification, d'étude, de protection, de conservation, de restauration et de sensibilisation, selon les principes recommandés par le Conseil de l'Europe sur la protection du patrimoine architectural du vingtième siècle. Cette stratégie devrait être concertée entre les différentes directions du ministère et leurs services déconcentrés.

Pour faciliter l'identification et le savoir sur le béton armé, et aider à mieux faire connaître ses réalisations les plus exceptionnelles, la direction du Patrimoine pourrait encourager la création de publications selon les vœux formulés dès 1987 au couvent de la Tourette lors du col-

loque sur *les enjeux du patrimoine architectural du XX^e siècle* et les recommandations du Conseil de l'Europe.

La rédaction d'un "vocabulaire" technique et historique sur le béton portant notamment sur la composition, le coffrage, la mise en œuvre et la réglementation pourrait être mise en chantier avec la coordination du Bureau recherche et méthodologie du service de l'Inventaire général. Les journées techniques internationales du Havre de novembre 1996, *Béton et Patrimoine*, ont démontré l'urgence d'un langage commun entre spécialistes et chercheurs de toutes origines pour décrire ce matériau moderne et réactualiser l'histoire de cette technique d'après les dernières découvertes.

De nombreux intervenants ont également souligné le manque d'ouvrages thématiques sur les nouveaux programmes architecturaux utilisant notamment le béton armé : architecture de l'aéronautique, architecture des réservoirs et silos, architecture des logements sociaux, ouvrages d'art... Ces publications pourraient être éditées ou coéditées par le Ministère de la Culture. Cette collection viserait à sensibiliser le grand public sur des formes nouvelles de Patrimoine contemporain et pourrait être soutenue par les nouvelles *Éditions du Patrimoine*.

POUR UNE PROTECTION RAISONNÉE DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ

Le premier édifice en béton armé protégé au titre de la loi sur les Monuments historiques dès 1957 est le théâtre des Champs-Élysées d'Auguste Perret. Mais les constructions en béton sont encore peu connues et reconnues par les autorités responsables et bénéficient généralement auprès du public de peu de considération : patrimoine récent aux témoignages abondants et de caractères hétérogènes. En 1997, l'ensemble de ces bâtiments protégés seront présentés dans les galeries de l'Assemblée Nationale lors d'une exposition sur l'architecture du XX^e siècle. *L'Indicateur du Patrimoine* qui accompagnera l'exposition présentera le corpus illustré des 1 000 édifices protégés au titre du XX^e siècle et contiendra les notices des édifices construits en béton armé.

Pour améliorer la protection de ces réalisations en béton armé, il serait judicieux d'utiliser la double procédure complémentaire d'une protection raisonnée au titre de la loi sur les monuments historiques basée sur un *recensement national des éléments les plus remarquables* – validé par une commission de spécialistes et mis à jour suivant l'avancée des connaissances – accompagnée par l'établissement d'études préalables dans les territoires à forte densité patrimoniale sur l'architecture du XX^e siècle en vue de l'établissement de Zones de Protection du Patrimoine Architectural et Urbain et Paysager (ZPPAUP). Les protections conjuguées de l'église Saint-Joseph et de la ZPPAUP du Havre sont des exemples à suivre.

Bernard TOULIER
Conservateur en chef du patrimoine
Mission patrimoine architectural XIX^e-XX^e siècles

* Recommandation n° R (91) 13 du comité des ministres des états membres relative à la *protection du patrimoine architectural du XX^e siècle*, adoptée par le comité des ministres le 9 septembre 1991 lors de la 461^e réunion des délégués des Ministres (cf. annexe 2).

L'histoire de la fabrication du béton, ses altérations et les remèdes

La matinée de vendredi était consacrée à l'histoire de la fabrication du béton, à ses altérations et aux remèdes que l'on peut leur opposer.

Du mortier au béton armé, de la voûte du Panthéon de Rome qui résiste à 5 mPa, aux bétons à poudres réactives dont la résistance atteint 800 mPa, des recettes de *Vitrive* aux formulations les plus élaborées de nos ingénieurs des Ponts-et-chaussées, nous avons survolé une formidable épopée technologique.

La facilité de mise en œuvre et l'incombustibilité furent deux moteurs de l'évolution et de la diffusion de cette technique, cependant Monsieur Poitevin nous a rappelé que la principale motivation de Coignet au milieu du XIX^e siècle était de concurrencer la pierre naturelle en lui substituant un matériau moulable, de résistance équivalente et surtout plus économique.

C'est aussi un souhait d'économie qui a contribué à faire évoluer les techniques de fabrication du ciment du four à voie semi-humide au four à voie sèche.

De ces techniques de fabrication et des mélanges dépendent essentiellement la durabilité du béton, ce qui fit dire à M. Poitevin que s'il n'y avait pas les armatures en acier, le béton pourrait durer mille ans.

Monsieur Hornain nous rassura définitivement sur la fiabilité du béton puisque c'est le matériau que l'on a choisi pour confiner les déchets radioactifs de nos centrales nucléaires...

Il faut cependant tempérer cet enthousiasme, le béton est un matériau vivant et évolutif. C'est peut-être d'ailleurs paradoxalement cette évolutivité et cette réactivité du béton qui le rend plus humain.

Le béton, pierre artificielle, ne devrait pas présenter les mêmes défauts que son modèle naturel puisque l'on peut en maîtriser exactement la composition. Cette maîtrise et la bonne connaissance des phénomènes d'altération n'ont cependant été acquises que relativement récemment.

L'exemple de l'étude analytique du béton qui compose l'église Saint-Joseph du Havre, réalisée dans le cadre du Cercle des partenaires du patrimoine, a permis de mettre en évidence les techniques d'investigation et de caractérisation des altérations.

La durabilité du béton dépend de plusieurs facteurs sur lesquels il est plus ou moins aisé d'intervenir.

La composition du liant et notamment sa teneur globale en chaux, le dosage en ciment et le rapport eau/ciment, la nature du granulat qui risque de réagir aux alcalins, la mise en œuvre du béton et la place des armatures sont autant d'éléments qui interviennent pour la pérennité du matériau.

L'environnement du bâtiment apparaît tout aussi important. Ainsi au Havre à la façade côté ville qui a réagi aux sulfates produits par la pollution (pollution passée nous a-t-on assuré), il faut opposer la façade côté mer qui doit subir les chlorures des embruns.

Subir n'est peut-être pas le mot juste puisque Monsieur Quénée a mis en évidence la fixation des cristaux de chloro-aluminates de calcium qui créent en quelque sorte une certaine stabilisation du matériau.

Nos hôtes doivent d'ailleurs être rassurés car Madame Marie Victoire a pu conclure que, malgré un certain vieillissement, les 4 200 m³ de béton de l'église Saint-Joseph du Havre ne sont pas en trop mauvais état.

Le matériau, sensible aux agents extérieurs, doit cependant être suivi. Monsieur Raharinaivo a évoqué une méthode très intéressante de calcul de prévision de l'amorçage de l'altération par mesure régulière de la carbonatation et de chloruration. On peut ainsi imaginer qu'un suivi systématique des bâtiments construits en béton armé permettrait d'intervenir avant le début de la dégradation et seulement quand le besoin en serait signalé.

La modélisation des structures et de l'évolution chimique des altérations est un autre outil d'avenir pour faciliter ce suivi.

Les principaux mécanismes d'agression sont maintenant bien connus. Il faut citer la dissolution ou plutôt la lixiviation de certains composants, l'expansion due aux sulfates extérieurs qui composent notamment la redoutable *étringite* secondaire, l'alcali-réaction causée par certains granulats et contre laquelle le remède reste à inventer, la carbonatation qui, positive en surface, devient très dangereuse quand elle atteint les armatures et favorise leur corrosion expansive par abaissement du pH.

Quand le béton est déjà dégradé, les techniques d'intervention sont maintenant traditionnelles : purge, passivation des aciers, ragréage.

Ces travaux doivent cependant être appliqués avec les produits adaptés à chaque cas particulier et suivant des procédures de mise en œuvre normalisées. Pour cela Yves Mouton nous a présenté un guide mis au point par le Laboratoire central des ponts-et-chaussées, auquel il faut ajouter celui édité par le Cercle des partenaires du patrimoine et le Laboratoire de recherches des Monuments historiques et le fascicule technique en cours d'élaboration par la Direction du patrimoine.

Intervenir avant que les altérations ne soient visibles reste la meilleure solution et certaines techniques nouvelles, prometteuses, pourront certainement nous y aider.

Le traitement peut se faire par imprégnation ou par voie électro-chimique. La technique électro-chimique permet soit la réalcalinisation, soit la déchloration.

Utilisée depuis dix ans en Europe du Nord, elle fait actuellement l'objet de chantiers tests en France.

Les avantages et les risques d'effets secondaires doivent être bien pesés. Il n'en reste pas moins que, dans certains cas, cela semble être le seul moyen pour sauver les œuvres du mouvement moderne.

C'est ce que Monsieur de Jonge a démontré à partir d'exemples hollandais, allemands et britanniques. Comment, en effet, éviter l'altération d'un élément de huit centimètres d'épaisseur avec son armature au milieu sans le dénaturer en l'amplifiant ?

Allant souvent de pair avec le caractère provisoire des constructions, la finesse des composants mis en œuvre

par le mouvement moderne est un des éléments fondamentaux de l'approche conceptuelle d'origine. La conservation de l'authenticité de ces constructions passe donc par l'utilisation de ces techniques nouvelles.

Cette matinée s'est conclue par l'exposé de Monsieur Bosc sur les bétons que composeront les monuments de demain. Ces nouveaux matériaux font rêver les architectes ; matériaux à très hautes performances physiques, éléments moulables jusqu'à la plus grande finesse, pompables à deux kilomètres de distance, colorés à souhait, très résistants (on a parlé de 800 mPa).

Ces matériaux font aussi rêver les spécialistes de la conservation puisqu'ils sont imperméables aux agents extérieurs et très résistants donc durables.

Monsieur Bosc nous les a d'ailleurs garantis plus de cent ans.

En attendant, il faut soigner les monuments existants et, même si la prudence est de règle, la progression de la connaissance des altérations et la mise au point des techniques d'intervention sont encourageantes. Les recherches doivent se poursuivre pour l'évaluation des restaurations récentes, la lutte contre des phénomènes tels que l'alcali-réaction, et une certaine réversibilité. Ces techniques d'intervention restent cependant assez lourdes, donc coûteuses. Le suivi, les méthodes de prévision des altérations, et bien entendu la maintenance des bâtiments restent donc à privilégier avec des techniques spécifiques en béton armé.

Daniel LEFÈVRE

Architecte en chef des Monuments historiques

Problèmes de conservation et de restauration

Après l'historique des diverses techniques de mise en œuvre du béton et l'approche scientifique de sa fabrication et de ses pathologies, la séance qui a suivi a été consacrée à la présentation de cas concrets de conservation et de restauration.

Monsieur Pallot a rappelé le rôle décisif de l'introduction de l'usage du béton dans la restauration ; rôle économique bien sûr, mais avant tout archéologique, les techniques de consolidation permises par ce nouveau matériau dès la fin du XIX^e siècle évitant de recourir de façon systématique à un processus de démontage-remontage, nuisible à l'authenticité des édifices. Après un rappel sur le rôle déterminant d'Anatole de Baudot, à la fois restaurateur et constructeur, est présenté un historique rapide de l'usage du béton dans la restauration des monuments : la consolidation de la tour de la cathédrale de Bayeux par Eugène Flachat au milieu du XIX^e siècle, la charpente en ciment armé de Henri Deneux à la cathédrale de Reims au lendemain de la première guerre mondiale puis les travaux de restauration des grands monuments de Normandie par Yves-Marie Froidevaux après la dernière guerre ; enfin les travaux de Jean-Pierre Paquet, thème développé par monsieur Mouton, en insistant sur l'apport décisif qu'a constitué dans le domaine du recentrement des charges, la mise au point des techniques de pinces en béton armé. Toutefois, si l'usage du béton permet de régler de nombreux problèmes techniques, monsieur Mouton a rappelé que les caractéristiques inhérentes au matériau (imperméabilité et création de "points durs") doivent tout de même inciter à une certaine prudence dans son emploi. Enfin, le béton est par nature un matériau difficilement réversible, ce qui peut poser problème, autant sur le plan de la doctrine que sur le plan de la tenue dans le temps des ouvrages qu'il convient de surveiller régulièrement.

Monsieur Oudin a présenté le cas de la restauration de l'église Notre-Dame de Royan dont il a assuré la maîtrise d'œuvre ; après avoir rappelé rapidement la place majeure que tient cet édifice dans le contexte de la reconstruction, il a fait un historique de sa réalisation par l'architecte Guillaume Gillet entre 1955 et 1958. Classée au titre des monuments historiques en 1988, l'église connut alors de graves désordres, dus principalement à la perte d'étanchéité des vitraux et à l'éclatement des bétons. Ceux-ci ont amené le service des monuments historiques dès 1987 à engager une importante campagne d'études (techniques sur la pathologie du béton et visuels

pour localiser avec une extrême minutie leur emplacement exact) ; ces études déboucheront sur une grande opération de restauration consistant principalement en une dépose complète et la réfection des vitraux ainsi qu'un traitement des bétons altérés : purge, passivation des fers, ragréages, etc., pour terminer par la réfection du beffroi... en bois.

Monsieur Mouton a ensuite présenté l'opération de restauration de l'église Notre-Dame du Raincy, monument majeur dans l'histoire de l'architecture moderne, conçue par les frères Perret, architectes, en association avec Bourdelle pour les sculptures, Maurice Denis pour les décors et Marguerite Huré pour les vitraux. Réalisée en treize mois et terminée en 1923, l'église fut classée au titre des monuments historiques en 1966. Plusieurs opérations d'entretien ayant été engagées dès les années soixante-dix, il s'avéra nécessaire d'envisager une restauration lourde qui se réalisera, à la suite d'une étude détaillée, sur une dizaine d'années de 1988 à 1996.

Monsieur Mouton a rappelé combien les analyses ont montré les imperfections de la construction d'origine ; il a insisté sur la nécessaire lisibilité des interventions et a conclu sur la prudence qu'il convient d'adopter dans ce domaine de la restauration en pleine évolution. Monsieur Carnus a complété l'exposé en décrivant les détails de mise en œuvre et en particulier les problèmes délicats posés par la restauration des claustras qui constituent l'essentiel des façades de l'édifice.

Monsieur Botton a ensuite exposé le cas de la restauration d'un ouvrage en "ciment moulé" construit dans la région grenobloise à Saint-Martin-le-Vinoux au milieu du XIX^e siècle dans un style très influencé par l'orientalisme en vogue à cette époque. Le classement au titre des monuments historiques en 1986 de cette villa, "la Casamaures", va permettre une restauration minutieuse dont Monsieur Botton a décrit le principe, essentiellement appuyé sur la restitution d'éléments en grande partie disparus mais que l'observation attentive et la recherche iconographique permettent de restituer. Monsieur Petelaz des laboratoires Vicat a complété l'exposé en décrivant les analyses techniques effectuées et en rappelant l'historique de la découverte et de l'utilisation des ciments naturels à partir du milieu du XIX^e siècle à Grenoble. Il a conclu en insistant sur la qualité de conservation de ces ouvrages en "pierre artificielle", en fait véritable béton, probablement due à l'absence de ferrallages.

Monsieur Bisch, architecte et copropriétaire de la Cité Radieuse a ensuite abordé la question de la restauration de cette unité d'habitation de Le Corbusier à Marseille actuellement en cours d'achèvement après presque dix années de travaux. Dans un vibrant hommage à l'architecte, il a rappelé le contexte de la réalisation de cet ensemble, premier d'une série de cinq, commencé en 1947 et inauguré en 1952, en insistant sur le rôle déterminant de Raoul Dautry et d'Eugène Claudius-Petit, alors ministre de la Reconstruction. Il a ensuite décrit les choix techniques qui ont été opérés en relation permanente avec la copropriété de l'immeuble. Monsieur Dufoix, maître d'œuvre de l'opération, a expliqué le rôle de surveillance permanent qu'a assuré la Fondation Le Corbusier en insistant sur les problèmes de doctrine suscités par une telle opération : doit-on par exemple privilégier les règles du "modulor" au détriment de la pérennité de certains ouvrages ? Chaque question relève d'un cas spécifique et doit déboucher sur un compromis acceptable. Il a conclu en évoquant les questions les plus difficiles à régler telles que celles des responsabilités et des garanties dans un immeuble de grande hauteur qui doit respecter les normes actuelles, draconiennes, en matière de sécurité.

L'exposé suivant a abordé, sous un tout autre angle, le cas de l'unité d'habitation de Firminy ; Monsieur Joxe, programmeur, a représenté l'architecte chargé de l'opération H. Ciriani. Il a expliqué le parti choisi, qui loin d'une démarche de type archéologique, visait à entreprendre la transformation d'un ensemble d'appartements

en les tronçonnant et en en permettant la lecture à travers une paroi transparente. Projet non mimétique mais dans l'esprit de la pensée de Le Corbusier dont H. Ciriani entendait perpétuer le message. Il a résumé l'objectif comme la réalisation d'un "lieu d'accueil pour de petites utopies concrètes", vraisemblablement sous la forme d'un nouveau centre culturel de rencontres.

La parole a ensuite été donnée à Monsieur Meyer qui a fait une brève intervention pour attirer l'attention de la salle sur les menaces que connaît actuellement un témoin historique de la construction française en béton, la maison de François Coignet, abandonnée et dans un état critique. À l'unanimité, l'ensemble des participants a demandé à l'administration d'envisager la constitution d'un dossier de protection à soumettre à la CO.RE.P.H.A.E. d'Ile-de-France.

La séance s'est conclue par un court débat entre les personnes présentes dans la salle dont il est principalement ressorti que la restauration du béton pose encore beaucoup de questions, tant de doctrine que de technique, et qu'une grande prudence s'impose dans les procédés à mettre en œuvre, surtout lorsqu'il s'agit de traiter les témoins architecturaux majeurs de notre siècle.

François GOVEN
Conservateur régional des Monuments historiques
de Provence-Alpes-Côte d'Azur

Usages et réhabilitations

François Gondran nous a décrit – en nous présentant un inventaire à la Prévert de tout ce qui pouvait exister en construction de béton armé dans notre pays – ce que pouvait poser comme problèmes le terme "d'usages" relativement au béton.

Il est intéressant de noter qu'il y a bien un usage particulier du béton armé, au moins dans les premiers temps, et qu'à cet usage se sont adaptés divers programmes : Lors de la première période, l'usage industriel est apparu comme une évidence ; François Gondran nous a montré les photos d'un château d'eau – le château d'eau de Luçon – bel exemple de l'usage du béton armé comme outil technique. Cet outil est apparu indispensable pour les constructions industrielles ou celles du génie civil, dont nous avons des exemples tout à fait fameux (silos et usines). Il existe également un assez grand nombre de ponts de génie civil ou d'autres ouvrages de génie civil en béton.

L'habitat social est un autre programme lié au béton ; c'est peut-être le goût de la nouveauté qui a porté ce matériau vers l'habitat social : à programme nouveau matériau nouveau.

Nous avons vu quelques réalisations berlinoises présentées par Hans Jörg Duvigneau ainsi que les constructions HBM du sud de Paris présentées par Paul-Louis Marty. On peut également signaler quelques expériences un peu plus originales où l'attrait pour la nouveauté et l'avantage technique du matériau ont été fondamentaux : des églises et quelques maisons individuelles ont été l'occasion de définir un nouveau langage plastique adapté à ce matériau.

Par ailleurs, il faut insister sur le fait que l'utilisation du béton a entraîné une nouvelle conception qui, lorsque l'on ne pouvait pas s'adapter à cette image, a induit l'usage de la maçonnerie imitant le béton : c'est étonnant à quel point la maçonnerie peut ressembler au béton dès lors qu'on le souhaite !

La deuxième grande époque de l'usage du béton a été la reconstruction : lors de la reconstruction la qualité du béton étant reconnue, il est devenu le matériau indispensable ; non seulement il n'y avait plus guère d'ambiguïté sur son usage mais on pouvait difficilement avoir recours à d'autres matériaux qu'à celui du béton armé ; il y avait un souci d'économie et un souci d'efficacité. C'est le

béton qui a permis l'utilisation de la préfabrication dont l'essor correspond à la période de la reconstruction.

Nous avons donc vu des exemples de constructions au Havre avec madame d'Aboville, à Berlin – reconstructions faites après la seconde guerre mondiale – et enfin des programmes souvent plus contestés mais tout à fait intéressants que sont les grands ensembles des années soixante.

En ce qui concerne les constructions plus récentes d'après-guerre, on ne peut plus parler de programmes spécifiques liés au béton armé puisque le béton armé s'adapte à tous les programmes et que tous les types de constructions avaient utilisé le béton armé.

S'il a rapidement été reconnu au plan technique, le béton armé a eu plus de mal à se faire reconnaître au plan culturel. François Gondran l'a rappelé, il y a d'abord un manque de documents : il n'y a pas d'ouvrage de référence tant technique qu'historique sur le béton armé ni vraiment d'ouvrage partiel qui porterait sur une ouverture internationale beaucoup plus générale, et non pas sur la situation contemporaine, sur ce que l'on peut trouver dans notre pays.

Ce patrimoine nouveau a fait l'objet de beaucoup d'oppositions : il y a un débat souvent difficile et les problèmes – disons sans avoir de distance suffisante – sont soulevés au moment des projets de démolition.

Là encore François Gondran a rappelé la solitude de l'architecte des bâtiments de France lorsqu'il a une décision à prendre dans l'urgence concernant la direction à suivre, à savoir si on doit essayer de sauver ou pas telle ou telle construction en béton armé.

Cette reconnaissance se fait petit à petit et pénètre l'opinion publique ; le premier signe de cette reconnaissance ce sont les ZPPAUP. Madame d'Aboville nous a parlé de celle du Havre, François Gondran nous a rappelé, en nous montrant de nombreuses photos, celle de Royan où ce sont précisément les constructions en béton armé qui ont servi de support à ces ZPPAUP.

Dans son exposé Hans Jörg Duvigneau nous a montré que ces ensembles, curieusement, étaient abandonnés dans l'ex-RDA et qu'il a fallu la chute du mur de Berlin pour qu'ils suscitent un regain d'intérêt et qu'on veuille à nouveau les restaurer.

Mais en réalité cette reconnaissance de la spécificité "culturelle" du béton armé n'est pas encore intégrée par le grand public.

Y-a-t-il une spécialité, un cas béton armé dans notre patrimoine ? Le béton a-t-il une place particulière ?

Les restaurations, on l'a vu, sont techniquement difficiles mais la réhabilitation et la réutilisation sont liées aux programmes que l'on a évoqués précédemment.

Il y a eu en premier lieu les programmes industriels, programmes où le génie civil est rentré en force et là encore lorsque cet usage premier a été perdu on a du mal à réutiliser ces bâtiments ; par contre en ce qui concerne les logements sociaux, l'usage est resté malgré les coûts de réhabilitation. Paul Louis Marty nous a rappelé qu'il a été difficile d'arriver à réhabiliter ces ensembles à des coûts modestes, puisqu'avec mille cinq cents francs par mètre carré il était très difficile de restaurer ces ensembles HBM d'avant guerre. Or les beaux ensembles que nous a présentés Hans Jörg Duvigneau à Berlin nous inciteraient fortement à réutiliser ce patrimoine de grande qualité.

En ce qui concerne les logements sociaux d'après-guerre, le problème est beaucoup plus difficile puisqu'il y a parfois une inadéquation du programme et aussi un problème lié à l'usage qui a été fait de ces bâtiments tombés en déshérence, qui ont été abandonnés : le respect de la qualité architecturale n'y est pas forcément la première priorité.

Il faut rechercher un patrimoine viable et attractif. Paul Louis Marty nous a dit qu'il fallait rattraper un retard d'entretien ce qui est effectivement le problème majeur des constructions en béton.

Le béton a rarement fait l'objet d'entretien et pourtant, on l'a vu, il n'est pas éternel et nécessite même un important entretien. Pour rattraper ce retard il y a évidemment

la nécessité – et l'urgence – de faire des diagnostics comme on l'a précédemment affirmé. Pour les grands ensembles on revient sur les problèmes de réutilisation et de programmes ; il y a des programmes sociaux à régler ce qui va de pair avec la reconnaissance du grand public pour lequel le béton est encore trop souvent perçu comme laid. Or c'est laid simplement parce que ce n'est pas entretenu et que ce sont les nouveaux quartiers qui sont en béton, c'est-à-dire le plus souvent les quartiers "à problèmes". La démarche pédagogique que nous a relatée Paul Louis Marty, celle qui consiste à expliquer aux habitants l'intérêt de leur patrimoine et les manières de se le réapproprier, est tout à fait intéressante.

Madame d'Aboville a rappelé le potentiel qui est celui du béton armé en citant Auguste Perret pour lequel le béton était un matériau noble au même titre que la pierre et la brique.

Matériaux et programmes, même s'ils sont en rupture avec la tradition sont devenus un autre patrimoine : Gardons-nous des clichés nostalgiques et interrogeons-nous sur la manière de gérer ce patrimoine et de le faire vivre.

On peut constater que ces préoccupations ne sont pas très différentes de celles que l'on a pour les quartiers anciens traditionnels : gérer cet héritage, l'adapter aux besoins nouveaux, le faire vivre, telles sont les questions récurrentes à la sauvegarde de tous nos quartiers anciens et les réponses qui ont été proposées ici ne sont pas nécessairement différentes de celles adaptées aux autres quartiers anciens existants ; ce qui veut dire que dans une certaine mesure le béton, par les problèmes qu'il pose et les solutions qu'on doit lui apporter, est bien rentré dans notre patrimoine comme tout autre matériau.

Jacques BOISSIÈRE
Architecte des bâtiments de France

Annexes

Liste des édifices construits en béton protégés au titre des monuments historiques

Recommandation du Conseil de l'Europe

Liste des participants

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Alsace	Bas-Rhin	Hunspach Ingolsheim	Fort de Schoenenbourg (ligne Maginot).		05/10/1992, modif. 14/01/1993	Génie militaire français	1930-1936	Gros oeuvre : 1930-1935 ; équipements intérieurs : 1933-1936
Alsace	Haut-Rhin	Mulhouse	Eglise catholique Sainte- Jeanne-d'Arc	77, rue Vauban		Kirchacker- Demant P.	1933-1954	La plus grande église du XXe siècle en Alsace. Chantier interrompu de 1940 à 1946.
Alsace	Haut-Rhin	Wittenheim	Chevalement du puits de mine Théodore. Bâtiment des machines d'extraction.	27, rue du Général de Gaulle (lieudit Mine Prince Eugène et Théodore)				
Alsace	Haut-Rhin	Zillisheim	Plate-forme et constructions attendant d'une pièce de 380 Krupp	Lieux-dits Gemeinwald et Gereut.	17/08/1995	Génie militaire allemand	1957-1958	Chevalement conçu par la société BBT
Aquitaine	Gironde	Bègles	Piscine municipale, établissement de bains- douches	1, rue Francis-de- Pressencé	18/12/1991		1932	
Aquitaine	Gironde	Blanquefort	Grotte de Majolan		21/12/1987			
Aquitaine	Gironde	Bordeaux	Bourse du travail		01/11/1986	D'Welles	1935-1938	
Aquitaine	Gironde	Bordeaux	Piscine Judaique et gymnase	464 et 466, rue Judaique et 45, rue Chaufour		Madeline L.	1931-1935	
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	43 bis, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	43, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	41, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	39, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	37, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	35, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	33, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	35, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	
Aquitaine	Gironde	Lège-Cap-Ferret	Lotissement Le Corbusier. Maison	33, avenue du Médoc	30/05/1990	Le Corbusier	1923-1925	
Aquitaine	Gironde	Pessac	Immeuble	Quartier moderne de Frugès 3, rue des Arcades	18/12/1980	Le Corbusier	1926	
Aquitaine	Landes	Dax	Casino municipal		01/09/1986	Granet	1928	Grande salle de spectacle
Aquitaine	Landes	Dax	Parc du Sarrat		01/01/1991	Guichemerre R.	1960	Parc avec maison et dépendances
Aquitaine	Landes	Dax	Hôtel Splendid		18/12/1991	Granet	1929-1930	
Aquitaine	Landes	Soorts-Hossegor	Sporting Casino		18/12/1991	Godborge	1927-1931	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Arcangues	Villa Berréts (ou villa Jean Patou)	Route dép. 932, lieu- dit Berréts-est	10/01/1996	Suë L.	1929-1931	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Biarritz	Casino municipal		07/10/1992	Laulhe	1929	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Biarritz	Hôtel Plaza		30/05/1990	Boileau ; Perotte	1928	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Ciboure	Feu amont d'alignement du port		08/10/1993	Pavlovsky	1936	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Ciboure	Villa Lehen Tokia	Chemin Axotareta	31/12/1992	Hiriart ; Tribout	1924-1926	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Ciboure	Villa Leïthorra	Rue du Docteur Micé	10/03/1995	Hiriart	1925-1929	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Guethary	Mairie		09/12/1993	Brana F.	1927	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Hasparren	Lycée Saint-Joseph : Chapelle du Sacré-Cœur		03/04/1996	Hiriart ; Tribout ; Lafaye ; Beau	1928	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Hendaye	Villa dite Maison rouge	Rue des Citronniers	29/11/1993	Durandean E.	1911	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Lestelle- Bétharram	Chapelle Saint-Michel Garicoitz		04/11/1986	Andral B.G.	1928	
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Saint-Jean-de- Luz	Feu aval d'alignement du port		08/10/1993	Pavlovsky	1936	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Aquitaine	Pyrénées- Atlantiques	Salies-de-Béarn	Casino		22/03/1995	Hiriart ; Tribout ; Beau	1930	
Auvergne	Allier	Vichy	Eglise Notre-Dame-des- Malades			Chamet ; Liogier	1925-1951	Béton apparent
Auvergne	Allier	Vichy	Etablissement thermal					Armature métallique et béton
Auvergne	Allier	Vichy	Grand casino					Armature métallique et béton
Auvergne	Allier	Vichy	Hôtel de Ville					Structure béton
Auvergne	Allier	Vichy	Ancien hôtel des Ambassadeurs	1, rue du Parc				Poutres béton
Auvergne	Allier	Vichy	Immeuble	39, rue de Paris				Béton apparent
Auvergne	Allier	Vichy	Immeuble	36, rue Salignat				Béton apparent
Auvergne	Allier	Vichy	Théâtre					
Bourgogne	Saône-et-Loire	Chalon-sur- Saône	Chapelle de la Colombe	72, rue d'Autun	27/12/1996	Perret	1928-1929	En totalité
Bourgogne	Saône-et-Loire	Louhans	Théâtre municipal	Grande Rue	ISMH en cours	Lamirand (architecte municipal)	1936	Salles et façades
Bourgogne	Côte-d'Or	Dijon	Cinéma L'Eldorado	21, rue Alfred de Musset	20/08/1986		1919	Façade
Bretagne	Côtes-d'Armor	Dinan	Gare SNCF		21/11/1995			Structure en béton
Bretagne	Côtes-d'Armor	Étables-sur-mer	Villa Le Petit Carhiuel		13/06/1986			Structure en béton
Bretagne	Côtes-d'Armor	Fréhel	Villa Collignon		08/08/1995			Béton armé pour les balcons ; pierre pour le reste
Bretagne	Côtes-d'Armor	Lannion	Chapelle Saint-Joseph		28/07/1995			Structure en béton ; pierre pour le reste
Bretagne	Côtes-d'Armor	Saint-Brieuc	Grand Séminaire		21/11/1995			Clocher en béton, béton et pierre pour chapelle et cloître
Bretagne	Côtes-d'Armor	Saint-Quay- Portrieux	Cinéma-dancing		21/11/1995			Pierre et béton
Bretagne	Finistère	Benodet	Hôtel Le Minaret		21/11/1995 ismh en cours			Tout en béton

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Bretagne	Finistère	Brest	Hôpital Morvan		ismh en cours			
Bretagne	Finistère	Loquégnole	Maison Kerantern		21/11/1995			Tout en béton
Bretagne	Finistère	Morlaix	Manufacture des tabacs		ismh en cours			Tout en béton
Bretagne	Finistère	Ploumoguer	Maison Quéré		21/05/1996			Charpente en béton de la "cathédrale"
Bretagne	Finistère	Quimper	Ty Dibab		ismh en cours			Tout en béton
Bretagne	Finistère	Quimper	Ty Kodak		ismh en cours			Tout en béton
Centre	Cher	Bourges	Maison de la Culture - école de musique	1, rue de Séraucourt ; place André Malraux	12/08/1994	Pinon M.	1936	A l'origine salle des fêtes et école de musique. Structure en béton ; parement en brique
Centre	Cher	Vierzon	Jardin de l'Abbaye. Bassin. Pilastres. Kiosque-lavoir.	Square Lucien-Beaufrière	09/08/1996	Karcher	Années 20	
Centre	Eure-et-Loir	Chartres	Hôtel des Postes	Boulevard Maurice Viollette	19/08/1994	Brandon R.	1923-1928	Structure en béton
Centre	Eure-et-Loir	Dreux	Arsenal des pompiers		31/12/1996			En partie en béton
Centre	Indre	Déols	Ancienne usine Marcel Bloch		29/03/1981, modif.			
Centre	Indre-et-Loire	Tours	Bibliothèque municipale		02/03/1992	Hennequin	1936-1937	Structure en béton
Centre	Indre-et-Loire	Tours	Chapelle de l'ancien couvent des Capucins		ismh en cours			Structure en béton
Centre	Loir-et-Cher	Blois	Basilique de la Trinité	8, rue de la Pierre	14/11/1977	Perret	1925	
Centre	Loir-et-Cher	Blois	Maison dite "Logis du Loup"		28/11/1995	Besnaud Rouvière ;	1932-1936 ; 1939 ;	Chantier exécuté sur trois périodes
Centre	Loir-et-Cher	Blois			ismh en cours	Martineau M.C et L.	1928-1930	Béton ; béton armé

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Champagne-Ardenne	Ardenne	Charleville-Mézières	Bains-Douches (Anciens)	5, rue Couvelet	27/02/1996	Despas	1925	Façades sur rue et façades latérales du corps central sur toute leur hauteur jusqu'à la limite des cheminées.
Champagne-Ardenne	Ardenne	La Ferté	Fort de la Ligne Maginot		12/06/1980		1937	
Champagne-Ardenne	Ardenne	Semide	Emplacement de la pièce allemande à longue portée "Noue Ramon"		12/09/1922		1ère Guerre mondiale	
Champagne-Ardenne	Marne	Châlons-en-Champagne	Cirque	11er, avenue du Général Leclerc	08/10/1984	Gillet	1899	
Champagne-Ardenne	Marne	Montement-Montgivroux	Monument de Mondement		04/10/1991	Bigot (architecte) ; Bouchard (sculpteur)	1931-1938	
Champagne-Ardenne	Marne	Reims	Halle du Bouligrin		09/01/1990	Maigrot et Freysson	1927-1928	
Champagne-Ardenne	Marne	Reims	Villa Douce	9, bd de la Paix	29/06/1992	Gosset	1932	
Champagne-Ardenne	Marne	Saint-Hilaire-le-Grand	Chapelle russe		21/11/1989	Benoit	1935-1937	
Champagne-Ardenne	Marne	Souain-Perthes-les-Hurlus	Monument commémoratif de la 1ère Guerre		27/01/1994	Bauer (architecte) ; Real del Sarfe	1924	Structure en béton
Champagne-Ardenne	Marne	Verzy	Blockhaus		23/01/1922		1ère Guerre	
Corse	Haute-Corse	Calvi	Hôtel Nord-Sud		29/10/1975	Lurcat A.	1930	
Corse	Corse du Sud	Ajaccio	Usine Alban		27/10/1992			Façade et minaret de l'ancienne manufacture de tabac
Corse	Doubs	Audincourt	Eglise du Sacré-Coeur	Rue du Pauvrement	28/07/1994	Novarina M.	1949-1951	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Franche-Comté	Doubs	Besançon	Usine Dodane	7, avenue de Montrapon	20/06/1986 cl. en	Perret	1939-1943	
Franche-Comté	Jura	Port-Lesney	Pont Bow-String		ismh cours		1938-1940	
Franche-Comté	Haute-Saône	Gray	Gare routière	21, avenue Carnot	28/07/1994	Chazal H.	1950-1953	
Franche-Comté	Haute-Saône	Ronchamp	Eglise Notre-Dame-d'En-Haut		08/11/1967	Le Corbusier	1955	
Franche-Comté	Territoire de Belfort	Méroux	Ouvrage militaire		28/12/1995		Avant 1914	
Ile-de-France	Paris	Paris Ile	Cinéma Rex	5, boulevard Poissonnière	05/10/1981	Bluysen	1932	
Ile-de-France	Paris	Paris Ile	Magasins de la Samaritaine de Luxe (Anciens)	27, bd des Capucines	08/12/1981	Jourdain F.	1914-1917	
Ile-de-France	Paris	Paris Ile	Théâtre Daunou	7 et 9 rue Daunou	20/01/1992	Bluysen	1919-1921	
Ile-de-France	Paris	Paris IVe	Mémorial des Martyrs de la Déportation	1,3,7 quai de l'Archevêché	05/07/1993	Pingusson	1961	
Ile-de-France	Paris	Paris IVe	Mémorial du Martyr Juif Inconnu	17, rue Geoffroy-l'Asnier ; 5, rue du Grenier-sur-l'Eau	02/10/1992	Golberg ; Persitz ; Arretche	1954-1956	
Ile-de-France	Paris	Paris IVe	Synagogue	10, rue Pavée	04/07/1989	Guilmard	1913	
Ile-de-France	Paris	Paris Ve	Collège de France. Bâtiment de Guilbert	Place Marcelin-Berthelot ; 11, rue Saint-Jacques	25/11/1993	Guilbert		
Ile-de-France	Paris	Paris Ve	Ecole Normale supérieure. Bâtiment de Guilbert	45, rue d'Ulm	14/11/1994	Guilbert	1930-1937	
Ile-de-France	Paris	Paris Vie	Ecole Nationale des Beaux-Arts. Bâtiment Perret.	Rue Bonaparte	31/01/1972	Perret		
Ile-de-France	Paris	Paris Vie	Ecole Nationale des Beaux-Arts. Ateliers extérieurs.	1, rue Jacques Callot	01/04/1996	Expert	1930	
Ile-de-France	Paris	Paris Vie	Immeuble	14, rue Guynemer	22/04/1986	Roux ; Spitz	1925-1928	
Ile-de-France	Paris	Paris Vie	Immeuble	140bis, rue de Rennes	15/01/1975	Auscher P.	1904	Procédé Hennebique
Ile-de-France	Paris	Paris Vie	Immeuble	26, rue Vavin	15/01/1975	Sauvage ;	1914	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Ile-de-France	Paris	Paris Vie	Institut d'Art et d'Archéologie	3, rue Michelet ; 8, avenue de l'Observatoire ; 2, rue des Chartreux	09/09/1994	Bigot P.	1927	
Ile-de-France	Paris	Paris Ville	Maison de Verre	31, rue Saint-Guillaume	02/11/1982	Chareau		
Ile-de-France	Paris	Paris Ville	Salle Gaveau	45 47 rue La Boétie	17/12/1993	Bijuouet	1928-1931	
Ile-de-France	Paris	Paris Ville	Théâtre des Champs-Élysées	13, 15 avenue Montaigne	11/12/1957	Hermant	1905	Système Coignet
Ile-de-France	Paris	Paris IXe	Casino de Paris	16, rue de Clichy	07/11/1990	Perret (frères)	1913	
Ile-de-France	Paris	Paris Xe	Cinéma L'Eldorado	4 bd de Strasbourg ; 11, rue du Faubourg Saint-Martin				
Ile-de-France	Paris	Paris Xe	Cinéma Le Louxor	170, boulevard Magenta ; boulevard de la Chapelle	05/10/1981	Dubreuil	1932	
Ile-de-France	Paris	Paris XIIe	Eglise du Saint-Esprit	186, avenue Daumesnil	05/10/1981	Ripey	1921	
Ile-de-France	Paris	Paris XIIe	Musée National des Arts Africains et Océaniens	293, avenue Daumesnil	17/08/1979	Tourmon P.	1928-1935	
Ile-de-France	Paris	Paris XIIe	Cité-refuge de l'Armée du Salut	12, rue Cantagrel	30/12/1987	Laprade	1928-1931	
Ile-de-France	Paris	Paris XIIIe	Maison Planeix	24bis-26 bis, boulevard Masséna	15/01/1975	Le Corbusier	1929	
Ile-de-France	Paris	Paris XIIIe	Mobilier National	1, rue Berbier de	16/08/1976	Le Corbusier ; Jeanneret P.	1924-1928	
Ile-de-France	Paris	Paris XIVe	Cité Universitaire. Pavillon du Brésil	7, boulevard Jourdan	20/12/1965	Perret	1935	
Ile-de-France	Paris	Paris XIVe	Cité Universitaire. Pavillon de la Suisse	7, boulevard Jourdan	04/11/1985	Le Corbusier ; Luci	1959	
Ile-de-France	Paris	Paris XIVe	Maison Guggenbuhl	2, rue Georges-Braque ; 16, rue Nansouty	16/12/1986	Le Corbusier	1931	
Ile-de-France	Paris	Paris XIVe	Villa Seurat, 1à 11	101, rue de la Tombe-Issoire	15/01/1975	Lurçat A.	1926	
Ile-de-France	Paris	Paris XVe	Eglise Saint-Christophe-de-Javel	28, rue de la Convention	15/01/1975	Perret	1926	Projet Lurçat
Ile-de-France	Paris	Paris XVe			15/01/1975	Besnard	1930	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Ile-de-France	Paris	Paris XVe	Immeuble	3, boulevard Victor ; rue Lecourbe	12/06/1986	Patout	1934-1935	
Ile-de-France	Paris	Paris XVe	Immeuble	5, square Vergennes	07/06/1993	Mallet-Stevens	1932	
Ile-de-France	Paris	Paris XVe	Laboratoire de la Marine	8, boulevard Victor	07/12/1965	Perret	1930	
Ile-de-France	Paris	Paris XVe	Lycée Camille Sée	11, rue Léon	12/01/1995	Le Coeur		
Ile-de-France	Paris	Paris XVe	Caserne des pompiers	8, rue Mesnil	22/01/1986	Mallet-Stevens	1936	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Collège Saint-louis-de-Gonzague	12, rue Franklin	13/10/1993	Viollet	1935	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Hôtel Guadet	95, boulevard Murat	15/04/1966	Guadet	1912-1924	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Hôtels particuliers	2, 4, 6, 7, 12, rue Mallet-Stevens ; 9, rue du Docteur Blanche	15/01/1975	Mallet-Stevens	1926-1928	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Immeuble	17, rue Franklin ; 1, rue Scheffer	28/04/1986	Hennequet M.	1928	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Immeuble	25, avenue de Versailles	13/02/1995	Ginzberg J.	1931	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Immeuble	25bis, rue Franklin	16/03/1966	Perret	1903	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Maison-atelier des sculpteurs Martel (Ancienne)	10, rue Mallet-Stevens	11/12/1990	Mallet-Stevens	1927-1928	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Maison Jeanneret	8, square du Docteur Blanche ; 55, rue du Docteur Blanche	19/10/1995	Le Corbusier	1923-1924	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Maison Laroche ou Fondation Le Corbusier	10, rue du Docteur Blanche	19/10/1995	Le Corbusier	1923	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Palais d'Iéna, ancien Musée des Travaux Publics, actuel Conseil économique	12, avenue d'Iéna ; place d'Iéna	05/07/1993	Perret	1937	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Palais de Chaillot	Place du Trocadéro	24/12/1980	Azéma ; Carlu ; Boileau	1937	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIe	Piscine Molitor	Boulevard d'Auteuil	27/03/1990	Pollet L.	1929	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIIIe	Eglise Saint-Jean-de-Montmartre	19, rue des Abesses	15/03/1966	Baudot (de) A.	1894-1904	Système Cottancin
Ile-de-France	Paris	Paris XVIIIe	Immeuble	13, rue des Amiraux ; 4, 6, rue Hermann Lachapelle	22/03/1991	Sauvage	1922	
Ile-de-France	Paris	Paris XVIIIe	Immeuble	7, rue Trétaigne	25/06/1986			

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Ile-de-France	Yvelines	Aubergenville	Eglise Sainte-Thérèse-d'Elisabethville	Place de Louvain	25/07/1977	Tournon P.		
Ile-de-France	Yvelines	Bazoches-sur-Guyonne	Maison de Louis Carré	1, chemin du Saint-Sacrement	23/02/1993	Alto A.		
Ile-de-France	Yvelines	Mézy-sur-Seine	Château de Mézy dit Le Gibet		21/12/1984	Mallet-Stevens	1924-1934	
Ile-de-France	Yvelines	Poissy	Villa Savoye	Parc de Villiers ; avenue Blanche-de-Castille	16/12/1965	Le Corbusier		
Ile-de-France	Yvelines	Trappes	Cité ouvrière	6 à 60 et 5 à 27, avenue Marceau	30/12/1992			
Ile-de-France	Yvelines	Versailles	Maison Cassandre	11, rue Albert Joly	14/11/1994			
Ile-de-France	Yvelines	Versailles	Villa Bomser	12, rue René Aubert	18/07/1986			
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Atelier de Dora Gordin	21, rue du Belvédère	15/01/1975	Perret	1929	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Atelier Lipchitz	9, allée des Pins	15/01/1975	Le Corbusier	1924	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Immeuble	24, rue Nungesser-et-Coli ; 23, rue de la Tourelle	31/01/1972 31/10/1990	Le Corbusier	1933	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Mairie	26, avenue André-Morizet	15/01/1975	Garnier T.		
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Maison	2, rue Salomon-Reinach ; 18bis, avenue Robert Schuman	15/01/1975	Faure-Dujamic	1928-1930	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Maison Collinet	8, rue Denfert-Rochereau	28/12/1984	Mallet-Stevens		
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Maison Cook	6, rue Denfert-Rochereau	17/02/1972	Le Corbusier	1926	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Maison cubiste du peintre Alfred Lombard	2, rue Gambetta ; 1bis, rue Jean-Baptiste-Clément	15/01/1975	Patout	1928	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Boulogne-Billancourt	Maison Mietschaninoff	7, allée des Pins	15/01/1975	Le Corbusier	1924	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Bourg-la-Reine	Villa Hennebique	1, avenue du Lycée ; 22, avenue Victor Hugo	22/03/1972	Hennebique		
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Clamart	Bibliothèque d'enfants	14, cité de la Plaine ; rue de Champagne	17/06/1993	Atelier Montrouge	de	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Clichy	Entrepôts du Printemps	69, boulevard du Général-Leclerc	06/02/1991	Pagnot	1908	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Garches	Propriété de Nubar Bey	75, rue du Dix-Neuf- Janvier	08/10/1976	Perret		Maison et jardin en terrasse
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Meudon	Maison André Block	Rue des Capucins 81bis, rue de Longchamp	14/11/1983	Bloch	1949	
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Neuilly-sur-Seine	Maison Jaoul		29/06/1966	Le Corbusier		
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Sèvres	Ecole Nationale de Céramique (Ancienne)	6, Grande-Rue	03/06/1991	Roux ; Spitz		
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Suresnes	Lycée Paul Langevin	2, rue Maurice-Payret- Dortail	13/10/1993 12/04/1996	Payret ; Dortail		
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Vauclerc	Villa Stein	17, rue du Professeur- Gauchet	12/05/1975	Le Corbusier		
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Ville-d'Avray	Villa Augier Prouvost	17, rue Balzac	15/01/1975	Mallet-Stevens		
Ile-de-France	Hauts-de-Seine	Ville-d'Avray	Villa Hefferlin	33, rue de Marnes	01/08/1974	Lurçat A.		
Ile-de-France	Seine-Saint- Denis	Blanc-Mesnil	Groupe HBM 212	212, avenue du Huit- Mai-1945	21/02/1996	Dorel G.	1933-1936	
Ile-de-France	Seine-Saint- Denis	Dugny	Aérogare du Bourget	Avenue du Huit-Mai- 1946	30/06/1994	Labro G.	1937	
Ile-de-France	Seine-Saint- Denis	Epinay-sur- Seine	Eglise Notre-Dame-des- Missions	102, avenue Joffre	14/06/1994	Tourmon P.	1931-1937	
Ile-de-France	Seine-Saint- Denis	Raincy (Le)	Eglise Notre-Dame		29/06/1966	Perret	1920-1924	
Ile-de-France	Val-de-Mame	Arcueil	Chapelle	52, avenue Laplace	02/07/1993	Perret	1927-1929	
Ile-de-France	Val-de-Mame	Maisons-Alfort	Ancienne usine de la Suze	11-25, avenue du Général Leclerc	04/08/1993	Férard P.	1934-1935	
Ile-de-France	Val-de-Mame	Maisons-Alfort	Eglise Sainte-Agnès	9, avenue du Général- Leclerc ; rue Nordling	21/12/1984	Bridaud Laujadière ;	1933	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Ile-de-France	Val-de-Mame	Maisons-Alfort	Groupe scolaire Condorcet	4, rue de Vénus	19/07/1994	Dubreuil ;	1930-1934	
Ile-de-France	Val-de-Mame	Villejuif	Groupe scolaire Karl Marx	6, avenue Karl Marx	18/09/1995	Lurçat A.	1933	
Ile-de-France	Val-de-Mame	Villejuif	Stade Karl Marx	Avenue Karl Marx	09/03/1993	Lurçat A.	1933	
Ile-de-France	Val-de-Mame	Vincennes	Eglise Saint-Louis-de- Vincennes	16, rue Faÿs	27/12/1994	Droz ; Marast	1912-1924	
Ile-de-France	Val-d'Oise	Montmagny	Chapelle Sainte-Thérèse	242, rue d'Epinay	09/08/1993	Perret	1927	
Languedoc- Roussillon	Hérault	Agde	Villa de Laurens		16/04/1996	Esprit	1896-1900	Salon de musique et certaines parties de la villa. Edifice en partie en béton.
Languedoc- Roussillon	Pyrénées- Orientales	Cerbère	Hôtel du Belvédère (Ancien)		09/04/1987	Batlle	1919-1925	
Limousin	Corrèze	Tulle	Théâtre de l'Eden		28/03/1977	Baudot (de) A.	1898 (à partir de)	Ossature en béton armé
Limousin	Haute-Vienne	Limoges	Pavillon frigorifique dit "Pavillon du Verdurier"	15, rue du Collège	15/01/1975	Gonthier R.	1919-1920	Ossature en béton armé ; parement céramique
Limousin	Haute-Vienne	Limoges	Gare des Bénédictins		15/01/1975	Gonthier R.	1924-1929	Ossature en béton armé ; parement pierre ; charpente métallique.
Lorraine	Meurthe-et- Moselle	Briey	Cité radieuse	Briey-en-Forêt	26/11/1993	Le Corbusier	Fin des années 50	L'ensemble
Lorraine	Meurthe-et- Moselle	Nancy	SNCI. Salle des coffres.	4, place André- Magenot	04/05/1994	Hornecker J.	Années 1900	Ossature
Lorraine	Meurthe-et- Moselle	Nancy	Maison de Jean Prouvé	6, rue Augustin- Haquard	31/12/1987	Prouvé J.	Années 50	Ossature
Lorraine	Meurthe-et- Moselle	Nancy	Banque Renaud (Ancienne)	9, rue Chanzy ; 58, rue Saint-Jean	04/05/1994	André E. Charbonnier P.	Années 1900	Ossature
Lorraine	Meurthe-et- Moselle	Nancy	Maison Biet	22, rue de la Commanderie	15/01/1975	Biet G.	Années 1900	Plancher
Lorraine	Meurthe-et- Moselle	Nancy	Maison Jacques	41, avenue Foch ; 37, rue Jeanne-d'Arc	28/12/1979	Charbonnier P.	Années 1900	Plancher
Lorraine	Moselle	Nancy	Villa Majorelle	1, rue Louis-Majorelle	15/01/1975	Sauvage H.	Années 1900	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Lorraine	Meurthe-et-Moselle	Nancy	Hôtel Excelsior	1, rue Mazagran ; rue Henri Poincaré	22/06/1976	Weissenburger ; Mienville A.	Années 1900	Ossature
Lorraine	Meurthe-et-Moselle	Neuves-Maisons	Val de Fer. Ancien Bâtiment des accumulateurs à minéral.		12/11/1992	Zublin (Ingénieur constructeur à Strasbourg)	Années 20	Ossature
Lorraine	Meurthe-et-Moselle	Saint-Nicolas-du-Port	Brasserie	60-62, rue Charles-Courtois	10/05/1988	César F.	Années 30	Ossature
Lorraine	Meuse	Damloup ; Vaux-devant-Damloup	Fort de Vaux		25/11/1970		Années 1900	Cuirassement
Lorraine	Meuse	Douaumont	Fort de Douaumont		25/11/1970		Années 1900	Cuirassement
Lorraine	Meuse	Douaumont	Tranchée des Battonnettes		06/05/1922		v. 1920	
Lorraine	Meuse	Fleury-devant-Douaumont	Ossuaire de Douaumont		02/05/1996	Azéma L.	Années 20	Ossature
Lorraine	Meuse	Moirey-Flabas-Crépion	Poste de Commandement du Colonel Driant	Bois des Caures ; forêt domaniale de Verdun	20/07/1931		1914-1915	Fotification de campagne française
Lorraine	Meuse	Varennnes-en-Argonne	Abris dits "du Prince Ruprecht de Bavière"		29/06/1922		1914-1915	Fotification de campagne allemande
Lorraine	Meuse	Verdun	Monument à la Victoire	Place de la Libération	30/10/1989	Chesnay Berthemy	Années 20	Ossature
Lorraine	Moselle	Aumetz	Mine de fer "de Bassompierre". Bâtiment de la machine d'extraction.		04/04/1995	Société des Mines de Knutange	Années 60	Béton armé apparent
Lorraine	Moselle	Boust	Eglise Saint-Maximin		28/06/1994	Pingusson G.-H.	Années 50-60	Béton armé apparent
Lorraine	Moselle	Delme	Synagogue	31, rue Poincaré	08/10/1984		Après 1945	Coupoie
Lorraine	Moselle	Freyding-Merlebach	Chevalement du puits sud du carreau Cuvelette		22/10/1992	Compagnie des Mines de Lens	1930	Poutrelles béton armé
Lorraine	Moselle	Metz	Eglise Sainte-Thérèse-de-l'Enfant-Jésus		22/10/1991	Expert H.	Fin des années 30 ; 1948-1954	Béton armé apparent
Lorraine	Moselle	Metz	Palais du Gouverneur, à la Citadelle		15/01/1975	Schönhals	Années 1900	Ossature
Lorraine	Moselle	Metz	Hôtel des Postes	Rue Gambetta	15/01/1975	Kröger J.	Années	Ossature

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Lorraine	Moselle	Metz	Gare des Chemins de fer	Place du Général-de-Gaulle	15/01/1975	Kröger J.	Années 1900	Ossature
Lorraine	Moselle	Uckange	Site industriel sidérurgique. Sous-station électrique. Bâtiment des soufflantes.		31/07/1995	Société Nord et Lorraine	Années 20	Béton armé apparent
Lorraine	Vosges	Portieux	Filature dite de Vincey (Ancienne)		22/10/1991	Potts, Son et Pickup (bureau d'études de Manchester)	Années 20	Ossature
Lorraine	Vosges	Saint-Dié	Manufacture Claude et Duval		10/05/1988	Le Corbusier	1948-1950	Béton armé apparent
Lorraine	Vosges	Thaon-les-Vosges	Ensemble bâti dit "La Rotonde"	Lieu-dit "Usine Gillet-Thaon"	19/12/1986	Desciers M. ; Hébrard A.	1913 ; années 20	Ossature ; béton armé apparent
Lorraine	Vosges	Vittel	Gare SNCF	Place de la Mame	22/11/1990	Bumaut (Ingénieur des)	Années 20	Ossature
Lorraine	Vosges	Vittel	Parc thermal. Exèdre à musique.	Lieu-dit "Le Parc"	22/11/1990	César F.	Années 30	Béton armé apparent
Lorraine	Vosges	Vittel	Casino	Station thermale, lieu-dit "Le Parc"	22/11/1990	Bluysen A.	1929-1930	Béton armé apparent
Lorraine	Vosges	Vittel	Hôtel Vittel-Palace	Station thermale, lieu-dit "Le Parc"	22/11/1990	César F.	Années 30	Entrée
Lorraine	Vosges	Vittel	Grand Hôtel	Station thermale, lieu-dit "Le Parc"	22/11/1990	Walwein G.	1912-1920	Ossature
Lorraine	Vosges	Vittel	Hôtel Ermitage	Station thermale, lieu-dit "L'Ermitage"	22/11/1990	César F.	1929	Ossature
Lorraine	Vosges	Vittel	Pavillon de la Grande Source	Station thermale, lieu-dit "Le Parc"	22/11/1990	Bluysen A.	Années 30	Béton armé apparent
Lorraine	Vosges	Vittel	Piscine couverte	Station thermale, lieu-dit "Le Parc"	22/11/1990	César F.	Années 30	Béton armé apparent
Lorraine	Vosges	Vittel	Institut d'éducation physique	Station thermale		César F.	1926	Ossature
Lorraine	Vosges	Vittel	Pavillon des balances	Station thermale	22/11/1990	César F.	1935	Béton armé apparent
Midi-Pyrénées	Haute-Garonne	Loubens-Lauragais	Château. Dépendances	ZH n°20	10/04/1991	Gounon-Loubens (de) J.	1843	
Midi-Pyrénées	Haute-Garonne	Toulouse	Piscine municipale Nakache	Allées Gabriel Bienés	21/09/1993	Montariol J.	1931-1934	
Midi-Pyrénées	Haute-Garonne	Toulouse	Bibliothèque municipale	1bis, rue du Périgord	07/12/1994	Montariol J.	1932-1935	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Midi-Pyrénées	Haute-Garonne	Toulouse	Hôtel de Ville (Le Capitole)	Place du Capitole	27/02/1995	Pujol P.	1892-1898	Salles d'apparat
Midi-Pyrénées	Lot	Souillac	Viaduc de la Borrèze	AK 85	28/08/1984		Fin XIXe	
Midi-Pyrénées	Hautes-Pyrénées	Lourdes	Basilique du Rosaire		21/09/1995	Hardy L.	1883-1889	
Midi-Pyrénées	Hautes-Pyrénées	Lourdes	Basilique Pie X		21/09/1995	Vago P.	1956-1958	
Midi-Pyrénées	Tam	Carmaux	Centrale électrique du Pré Grand	BK102,218, 219,220,248	14/06/1991	Société des Mines de	1913-1919	
Midi-Pyrénées	Tam	Saint-Juéry	Centrale hydroélectrique du Saut du Tam	Avenue Germain Tequi AK 83	05/07/1996		1897 ; 1903 1904 ; 1914 1918	
Midi-Pyrénées	Tam-et-Garonne	Bourret	Pont suspendu	RD 928, sur la Garonne	30/09/1994	Arnodin	1912-1914	Procédé Gisclard. Désaffecté
Nord-Pas-de-Calais	Nord	Croix	Villa Cavois		12/12/1990	Mallet-Stevens	1934	Structure béton ; parement brique.
Nord-Pas-de-Calais	Nord	Dunkerque	Quartier excentric 6 maisons	Rosendaël	20/12/1988	Reynaert	1927	Loitissement maisons art déco en béton armé
Nord-Pas-de-Calais	Nord	Dunkerque	Monument de la Fondation Rosendaël		08/08/1996	Ringot	1910	Sculpture en ronde-bosse
Nord-Pas-de-Calais	Nord	Hem	Chapelle Sainte-Thérèse		14/02/1995	Hermannbaur Manessier	1958	Vitraux béton verre
Nord-Pas-de-Calais	Nord	Valenciennes	Fosse du Temple		06/05/1992		1920	Béton armé
Nord-Pas-de-Calais	Pas-de-Calais	Eperlecques	Blockhaus		26/09/1985	Armée allemande	1943	Béton armé. Mur de l'Atlantique.
Nord-Pas-de-Calais	Pas-de-Calais	Hénin-Beaumont	Eglise Saint-Martin		08/08/1996	Boutterin M.	1932	Béton armé structure et enduits imitant la pierre.
Nord-Pas-de-Calais	Pas-de-Calais	Lens	Gare		28/12/1984	Cassan U.	1927	Béton armé structure et panneaux de remplissage
Nord-Pas-de-Calais	Pas-de-Calais	Loos-en-Gohelle	Tour d'extraction du puits 19		06/05/1992		1960	Panneaux béton

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Nord-Pas-de-Calais	Pas-de-Calais	Rocquigny	Eglise Notre-Dame		25/04/1996	Sourdeau	1931	Structure et clocher
Nord-Pas-de-Calais	Pas-de-Calais	Wissant	Typhonium		29/11/1985	Deville	1891	Terrasse en béton et enduit ciment
Basse-Normandie	Calvados	Asnelles	Batterie de défense de plage		10/11/1992	Armée allemande	1942-1944 1975 (plans de 1959)	Mur de l'Atlantique
Basse-Normandie	Calvados	Glanville	Maison Saier		06/07/1992	Breuer M.		Voile de béton
Basse-Normandie	Calvados	Longues-sur-Mer	Batterie de Longues			Armée allemande		Un poste de direction de tir et quatre casemates. Mur de l'Atlantique.
Basse-Normandie	Calvados	Ouistreham	Poste de direction de tir de Riva-Bella	103, rue du 6 Juin	13/06/1994	Armée allemande		Mur de l'Atlantique
Basse-Normandie	Manche	Equeurdreville-Hainneville	Rampe de lancement de V1 de Brécourt		23/02/1995	Armée allemande		Y compris les 8 anciens réservoirs souterrains et le réseau de galeries qui les accompagne. Mur de l'Atlantique.
Basse-Normandie	Manche	Cherbourg	Batterie du Roule		23/02/1995	Armée allemande		Y compris les galeries souterraines. Mur de l'Atlantique.
Basse-Normandie	Manche	Cherbourg	Gare maritime		27/12/1989	Levavasseur	1926-1933	
Basse-Normandie	Manche	Granville	Batterie du Roc		13/06/1994	Armée allemande		Mur de l'Atlantique
Basse-Normandie	Orne	Domfront	Eglise Saint-Julien		25/03/1993	Guilbert	Années 30	
Haute-Normandie	Eure	Saint-Pierre-du-Vauvray	Pont Freyssinet		15/01/1975	Freyssinet	1921-1923	
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Fontaine-La-Mallet	Batterie d'artillerie de Fèvrerot		21/08/1996	Armée allemande	1942-1944	Mur de l'Atlantique

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Fontaine-La-Mallet	Batterie d'artillerie des Monts Trotins			Armée allemande	1942-1944	Mur de l'Atlantique
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Gonfreville-l'Orcher	Encuvement sur abri pour canon de 50 mm antichar			Armée allemande	1942-1944	Mur de l'Atlantique
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Grand-Quevilly	Maison jumelée de contremaître			Perret A.	1922	
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Havre (Le)	Eglise Saint-Joseph	8, bd François ler	11/10/1965	Perret A.	1955	
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Mont-Cauvaire	Chapelle du collège de Normandie		15/01/1975	Chirol P.	1930	Baies
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Octeville-sur-Mer	Abri type RC 634 avec cloche blindée		03/06/1994	Armée allemande	1942-1944	Mur de l'Atlantique
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Octeville-sur-Mer	Batterie d'artillerie d'Ecqueville		27/11/1996	Armée allemande	1942-1944	Mur de l'Atlantique
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Octeville-sur-Mer	Point fort de Dondeneville dit "la ferme Hamel"		23/12/1996	Armée allemande	1942-1944	Mur de l'Atlantique
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Rouen	Eglise Saint-Nicaise	17, rue Saint-Nicaise	23/12/1981	Chirol P.	1934-1937	Nef et clocher
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Rouen	Gare		15/01/1975	Dervaux	1912-1925	
Haute-Normandie	Seine-Maritime	Varengueville-sur-Mer	Maison "Le Bois des Moutiers"		15/01/1975	Lutyens	1898	
Pays de la Loire	Loire-Atlantique	Rezé	Maison Radieuse		16/09/1965	Le Corbusier	1955	Façades et couvertures
Pays de la Loire	Loire-Atlantique	Fontenay-le-Comte	Tour Rivailland	Rue Rapin	08/10/1984		1881	Béton armé
Pays de la Loire	Vendée	Luçon	Château d'eau	Avenue du Président Wilson	10/02/1992	Bardin	1912	Système béton armé ; brevet Hennebique
Pays de la Loire	Vendée	Luçon	Ancienne usine d'électricité attenante au château d'eau	Avenue du Président Wilson	31/07/1991	Bardin	1912	Système béton armé ; brevet Hennebique
Picardie	Aisne	Martigny-Courpière	Eglise Saint-Martin		26/01/1994	Müller	1928-1932	Béton armé (en particulier la flèche) et pierre de taille

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Picardie	Aisne	Vendhuile	Eglise Saint-Martin		04/11/1994			
Picardie	Somme	Amiens	Tour Perret		Class. en cours 29/10/1975	Droz J. Perret A.	1927-1928 1949-1953	
Picardie	Somme	Lamotte-Warfusée	Eglise Saint-Pierre		04/11/1994	Teisseire G.	1928-1931	
Picardie	Somme	Moreuil	Eglise Saint-Waast		04/11/1994	Duval C. ; Gonse E.	1928-1932	Clocher-porche béton armé, ciment et brique
Picardie	Somme	Roye	Eglise Saint-Pierre		18/07/1994	Duval C. ; Gonse E.	1928-1932	Béton ; béton armé ; brique
Poitou-Charente	Charente-Maritime	Royan	Eglise Notre-Dame		10/02/1988	Gillet	1953-1958	
Poitou-Charente	Charente-Maritime	Saint-Georges-d'Oléron	Villa Blockhaus		11/12/1992	Fournier (propriétaire)	1950	Mur de l'Atlantique
Poitou-Charente	Charente-Maritime	Saint-Jean-d'Angély	Cinéma L'Eden		05/12/1984	Guillon	1931	Façade principale et salle de bar
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Alpes-Maritimes	Antibes	Maison André Bloc	31, avenue Aimée Bourreau	16/11/1989	Parent C.	1961	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Alpes-Maritimes	Cannes	Villa Romée	5, esplanade du Golfe	25/03/1994	Pingusson G.H. ; Furiet P.	1928	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Alpes-Maritimes	Menton	Villa Tempe a Paia	187, route de Castellar	22/01/1990	Gray E.	1932-1934	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Alpes-Maritimes	Nice	Eglise Sainte-Jeanne-d'Arc	Avenue Saint-Lambert	12/06/1992	Droz J.	1934	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Alpes-Maritimes	Nice	Immeuble Gloria Mansions	123-125, rue de France	14/12/1989	Hovnanian (frères)	1932-1934	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Alpes-Maritimes	Nice	Palais de la Méditerranée	13-15-17, promenade des Anglais - rue du Congrès	18/08/1989	Delmas (frères)	1929	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Alpes-Maritimes	Roquebrune-Cap-Martin	Site corbuséen du Cap-Martin	Promenade Le Corbusier	25/03/1994	Le Corbusier	1957	Unités de camping
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Alpes-Maritimes	Roquebrune-Cap-Martin	Villa E 1027	Promenade Le Corbusier	29/10/1975	Gray E.	1926-1929	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône	Aix-en-Provence	Casino municipal	2, avenue Napoléon Bonaparte	16/01/1995	Barreau R.	1923	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône	Jouques	Usine hydroélectrique	RN 96	21/07/1989	Crozet J.	1959	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône	Marseille XVe	Eglise Saint-Louis	22, avenue du Rove	14/12/1989	Sourdeau J.L.	1935	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône	Marseille Ile	Quai du Port	42-66, quai du Port	16/12/1993	Pouillon F.	1952	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône	Marseille Ville	Unité d'habitation de Le Corbusier	280, bd Michelet	26/06/1986	Le Corbusier	1952	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône	Marseille Ville	Unité d'habitation de Le Corbusier. Appartement n°50	280, bd Michelet	12/10/1995	Le Corbusier	1952	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Var	Grimaud	Club-house du golf de Beauvallon	Boulevard des Collines, domaine de Beauvallon	22/12/1993	Chareau P. ; Bijouët B.	1927	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Var	Grimaud	Villa Seynave	Boulevard des Collines, domaine de Beauvallon	16/12/1993	Prouvé J. ; Hutchinson N.	1961	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Var	Grimaud	Villa Vent d'Aval	Boulevard des Collines, domaine de Beauvallon	16/12/1993	Chareau P.	1928	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Var	Hyères	Villa Noailles	Saint-Bernard, montée de Noailles	29/10/1975 ; 09/12/1987	Mallet-Stevens R.	1924	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Var	Le Pradet	Villa L'Artaude	Chemin de l'Artaude	10/11/1987	Le Corbusier	1930-1931	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Var	Saint-Tropez	Ancien groupe touristique Latitude 43	Avenue du Général Leclerc	08/09/1992	Pingusson G.H.	1932	Immeuble, transformateur EDF, ...
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Vaucluse	Avignon	Centre paroissial Saint-Joseph-Travailleur	Avenue Etienne Martelage	22/12/1993	Gillet G.	1967-1969	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Vaucluse	Avignon	Lycée agricole de Cantarel	RN 7	16/11/1989	Bechman R. ; Biscop P. ; André C. ; Girard F.	1966-1969	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Vaucluse	Avignon	Rotonde SNCF	Avenue Pierre Sépard	28/12/1984	Laffaille B.	1946	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Vaucluse	Bollène	Usine-barrage André Blondel	Quartie L'Usine	04/06/1992	Sardnal T.	1952	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Vaucluse	Crestet	Fondation Stahly	Chemin de la Vernière, Le Haut du Crestet	06/06/1988	Stahly B.	1966-1970	
Rhône-Alpes	Ain	Miribel	Carillon du Mas Rillier		26/11/1993	Mortamet	1946	Béton armé
Rhône-Alpes	Ain	Oyonnax	Usine électrique de la Vapeur		24/10/1988	Chanard	1904-1905	Béton. Béton armé
Rhône-Alpes	Drôme	Hauterives	Palais idéal du Facteur Cheval		23/09/1969	Cheval F.	1880-1912	Certaines parties en ciment armé
Rhône-Alpes	Isère	Saint-Martin-le-Vinoux	La Casamaure		19/03/1992		Vers 1853	Ciment moulé
Rhône-Alpes	Isère	Grenoble	Tour Perret		15/01/1975	Perret A.	1924	Béton armé
Rhône-Alpes	Isère	Grenoble	Garage hélicoïdal	Rue Bressieux	31/07/1989	Fumet ; Noiray	1928-1929	Ciment armé
Rhône-Alpes	Isère	Livet-et-Gavet	Usine hydro-électrique des Vernes		02/09/1994	Société Keller et Leleux (maître d'ouvrage)	1917-1918	Certaines parties, dont un escalier monumental, en ciment armé
Rhône-Alpes	Loire	Saint-Etienne	Immeuble	2, avenue de la Libération		Noulin-Lespès P.	1905-1907	Béton armé et béton moulé

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Rhône-Alpes	Loire	Saint-Etienne	Deux immeubles dits "chalets de Bizillon" ou "Maisons sans escaliers"	54-56, rue Daguerre	21/02/1989	Bossu A.	1933-1940	
Rhône-Alpes	Loire	Saint-Etienne	Hôtel particulier	7, rue de la	29/03/1989	Subit A.	1928-1930	
Rhône-Alpes	Loire	Firminy	Eglise Saint-Pierre	Richelandière	03/06/1996	Gouyon H.		
Rhône-Alpes	Loire	Firminy	Stade		08/10/1984	Le Corbusier	Années 60	Béton
Rhône-Alpes	Loire	Firminy	Maison de la Culture et des Jeunes		08/10/1984	Le Corbusier	1961-1965	Béton. Toiture suspendue en dalles "célium". Béton cellulaire autocloyé.
Rhône-Alpes	Loire	Firminy	Unité d'habitation et école		09/09/1993	Le Corbusier	1964-1967	Béton
Rhône-Alpes	Rhône	Dardilly	Emetteur radio		16/01/1990	Wogensky A.	1935	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Eveux-sur-l'Arbresle	Couvent de la Tourrette		11/12/1971	Deveraux G.	1956-1959	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1er	Ecole de tissage	43, cours du Général Giraud	19/11/1991	Le Corbusier	1930-1933	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Bourse du Travail		02/11/1989	Garnier T.	1929-1936	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Chapelle de l'Hôpital Edouard Herriot			Meysson C.	Années 20 ; achevé en 1930	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Monument aux Morts	Ile du Souvenir, dans le Parc de la Tête	31/07/1989	Garnier T.		Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Garage Citroën	35, rue de Marseille	04/11/1982			
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Stade de Gerland		18/05/1992	Ravazé J.	1930-1932	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Immeuble	2, rue de Saint-Cyr ; quai Jayr	04/10/1967	Garnier T.	1913-1919	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Villa		19/10/1991	Cateland E.	1910	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Villa	5, rue de la Mignonne	29/04/1991	Garnier T.	Années 20	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Lyon 1le	Villa	7, rue de la Mignonne	22/07/1991	Garnier T.	Années 20	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Villeurbanne	Villa Lafont	4, rue du Quatre-Septembre	29/04/1991		1921-1922	Béton armé
Rhône-Alpes	Rhône	Villeurbanne	Hôtel de Ville		29/04/1991	Giroud R.	1930-1934	

Région	Département	Commune	Edifice	Adresse	I.S.M.H. C.L.M.H.	Auteur	Date	Observations
Rhône-Alpes	Haute-Savoie	Araches	Grand Hôtel "Le Flaine" et immeuble Bételgeuse	Station de Flaine	29/04/1991	Breuer M.	1968-1969	Béton préfabriqué (procédé Baretz) ; béton armé
Rhône-Alpes	Haute-Savoie	Megève	Villa Le Même		12/07/1995	Le Même	1891 ; reconstruite en 1976	
Guadeloupe	Guadeloupe	Fort-de-France	Cathédrale Saint-Louis			Picq Henri	1930-1935	
Guadeloupe	Guadeloupe	Morne-à-l'Eau	Eglise			Ali Thur	1930-1935	
Guadeloupe	Guadeloupe	Pointe-Noire	Mairie			Ali Thur	1930-1935	

**Conseil de l'Europe
Comité des Ministres**

**Recommandation n° R (91) 13
du Comité des ministres aux États membres
relative à la protection du patrimoine architectural du vingtième siècle**

(adoptée par le Comité des ministres le 9 septembre 1991, lors de la 461^e réunion des Délégués des ministres⁽¹⁾)

Le Comité des ministres, en vertu de l'article 15.b du statut du Conseil de l'Europe,

considérant que le but du Conseil de l'Europe est de réaliser une union plus étroite entre ses membres ;

vu la Convention culturelle européenne, signée à Paris le 19 décembre 1954, et notamment son article 1^{er} ;

vu la Convention pour la sauvegarde du patrimoine architectural de l'Europe, signée à Grenade le 3 octobre 1985, et en particulier son article 17 ;

vu la Résolution 813 (1983) de l'Assemblée parlementaire du Conseil de l'Europe relative à l'architecture contemporaine ;

vu la Résolution n° 2 de la deuxième Conférence européenne des ministres responsables du Patrimoine architectural, tenue à Grenade les 3 et 4 octobre 1985 ;

observant que l'architecture du vingtième siècle fait partie intégrante du patrimoine historique de l'Europe, et que la sauvegarde et la mise en valeur de ses éléments les plus significatifs répondent aux mêmes objectifs et aux mêmes principes que ceux de la conservation du patrimoine architectural dans son ensemble ;

constatant que cette catégorie de patrimoine s'avère, en raison de sa proximité dans l'Histoire, de l'abondance de ses témoignages et de son caractère hétérogène, moins reconnue de la part des autorités responsables et du public que d'autres composantes du patrimoine architectural ;

soulignant qu'une absence d'intérêt suffisant pour la conservation de ce patrimoine s'accompagnerait de pertes irréparables et priverait les générations futures de cet instant de la mémoire européenne,

recommande aux gouvernements des États membres de mettre en œuvre, dans le cadre de leur politique générale de conservation du patrimoine bâti et lorsque cela est nécessaire par la voie de mesures spécifiques, des stratégies d'identification, d'étude, de protection, de conservation, de restauration et de sensibilisation visant l'architecture du vingtième siècle, selon les principes figurant en annexe à la présente recommandation ;

charge le Secrétaire général de transmettre le texte de la présente recommandation aux États non membres parties à la Convention culturelle européenne et/ou à la Convention pour la sauvegarde du patrimoine architectural de l'Europe.

⁽¹⁾ Lors de l'adoption de cette recommandation, le Délégué de l'Allemagne, en application de l'article 10.2.c du règlement intérieur des réunions des Délégués des ministres, a réservé le droit de son gouvernement de s'y conformer ou non.

Principes relatifs à la sauvegarde et à la mise en valeur du patrimoine architectural du vingtième siècle

Identification du patrimoine du vingtième siècle

Promouvoir la connaissance et l'étude du patrimoine

L'architecture et l'urbanisme ont subi depuis la fin du dix-neuvième siècle des changements profonds dus à l'industrialisation, à l'introduction de nouveaux matériaux, à la mutation des modes de construction et aux nouvelles fonctions. Cette évolution s'est accélérée pour répondre aux besoins de la société contemporaine, simultanément aux progrès technologiques. La production architecturale abondante du vingtième siècle, hétérogène en raison d'aspects à la fois traditionalistes et modernistes, ne se voit reconnaître une valeur patrimoniale que dans les œuvres de quelques-uns de ses pionniers. Il s'avère donc nécessaire de susciter une meilleure connaissance et une meilleure compréhension de tout ce patrimoine, en mettant en évidence les qualités, la richesse et la diversité de ses composantes.

Les recherches à engager ou à poursuivre doivent se fonder sur l'ensemble des sources d'information – archives écrites, graphiques ou photographiques, publications contemporaines des œuvres et toutes autres traces permettant de mieux situer les créations – et sur une analyse approfondie des bâtiments.

Établir des répertoires systématiques

L'objectif est de réunir une documentation systématique sur la production architecturale du vingtième siècle, soit sous forme de répertoires nationaux couvrant toutes les époques, soit par l'élaboration de répertoires propres à l'architecture du vingtième siècle. Ces répertoires devraient être :

- en principe ouverts plutôt que sélectifs et susceptibles en permanence de mise à jour, de révision et d'élargissement, à la lumière de l'évolution des connaissances ;
- dressés sans préjugés quant aux questions de style, de type de bâtiment, de méthode ou de période de construction ;
- conçus, présentés et publiés de telle manière que leur contenu soit accessible au plus vaste public possible, aussi bien pour ce qui est du vocabulaire utilisé, des illustrations que des facilités de diffusion ;
- établis en tenant compte des pratiques d'inventaire des différents pays européens, en vue de faciliter la communication et la compréhension mutuelles en Europe de ces instruments d'information et d'analyse.

Protection des éléments les plus significatifs du patrimoine

Critères de sélection

Les autorités responsables de la protection devraient se doter de critères précis s'inspirant des considérations suivantes :

- l'opportunité de reconnaître la valeur des créations significatives dans l'ensemble des styles, types et méthodes de construction du vingtième siècle ;
- la nécessité de retenir pour la protection non seulement les œuvres des créateurs les plus renommés d'une période ou d'un type d'architecture, mais aussi des témoignages moins connus, significatifs de l'architecture et de l'histoire d'une période ;
- l'importance de prendre en compte parmi les facteurs de sélection d'une création non seulement ses données esthétiques, mais aussi son apport du point de vue de l'histoire des techniques et des évolutions politique, culturelle, économique et sociale ;
- l'indispensable ouverture de la protection à l'ensemble des composantes de l'environnement bâti, comportant non seulement les constructions indépendantes, mais aussi les structures produites en série, les lotissements, les grands ensembles et les villes nouvelles, les espaces et aménagements publics ;
- le besoin d'étendre la protection aux décors extérieurs et intérieurs ainsi qu'aux équipements et mobiliers conçus en même temps que l'architecture et donnant son sens à la création architecturale.

Mise en œuvre de la protection juridique des biens

Il revient aux autorités compétentes, selon les modalités propres à chaque pays :

1. de recourir à la législation existante en matière de conservation du patrimoine, d'urbanisme ou d'environnement, en vue de la protection du patrimoine bâti du vingtième siècle, afin :
 - de protéger les biens par leur inscription sur des listes de protection ou leur insertion dans des zones appropriées de protection ;
 - d'utiliser les procédures d'autorisation et de contrôle découlant de la protection ;
2. de compléter la législation existante par des mesures spécifiques, pour autant que cette législation ne permette pas ou ne permette qu'imparfaitement de protéger ce patrimoine récent.

Gestion et conservation du patrimoine

Utilisation du patrimoine

Les autorités nationales, régionales ou locales compétentes ont le devoir de favoriser l'usage le plus approprié du patrimoine protégé de cette période, qu'il s'agisse d'une utilisation à vocation culturelle ou muséologique, ou plus généralement d'une utilisation économique, commerciale ou à vocation d'habitat. La recherche de nouvelles affectations tenant compte des besoins de la vie contemporaine doit être encouragée pour éviter l'abandon des édifices, à condition que la nouvelle affectation ne remette pas en cause la signification architecturale ou historique ayant justifié la protection des biens.

Conservation physique

Les phénomènes de pollution atmosphérique et de vieillissement des matériaux révèlent un processus de dégradation et appellent des mesures d'entretien et de restauration d'un patrimoine pourtant encore récent. Il importe :

- de promouvoir des études scientifiques, théoriques et pratiques portant sur les méthodes de construction, d'entretien et de restauration des structures et des divers matériaux utilisés dans l'architecture du vingtième siècle et les arts décoratifs correspondants ;
- d'observer, dans la conception des programmes d'entretien et de restauration de ces structures, les mêmes principes fondamentaux que ceux pratiqués pour d'autres composantes du patrimoine architectural ;
- d'élaborer une documentation précise sur les interventions effectuées dans le cadre du processus de conservation ;
- de constituer à l'échelon national ou régional approprié des archives et des dossiers d'architecture permettant de préserver la mémoire des édifices et de permettre leur entretien dans l'avenir.

Formation de spécialistes

Il s'avère important d'encourager et d'améliorer la connaissance et l'utilisation des matériaux de construction appropriés, ainsi que les technologies pour la construction et la conservation. Cela nécessite une formation approfondie s'adressant aux entreprises du bâtiment qui interviennent matériellement sur les chantiers de restauration.

Le caractère particulier des techniques de l'architecture du vingtième siècle implique une spécialisation des professionnels appelés à en assurer l'étude et la conservation. Les autorités des États membres devraient faire en sorte qu'une formation particulière soit dispensée, soit dans le cadre de l'enseignement général de l'architecture, soit dans celui de formations spécialisées dans la restauration du patrimoine bâti.

La formation nécessaire devrait porter à la fois sur les méthodes d'étude, sur l'investigation de ce type de patrimoine et sur les techniques matérielles de l'entretien et

de la restauration. Un effort particulier devrait être fait en faveur des métiers artistiques de la restauration. Des moyens matériels suffisants devraient être consentis par les pouvoirs publics en faveur de la recherche et de la formation d'experts.

Sensibilisation des responsables et du public

Il appartient aux autorités des États membres de susciter un faisceau d'initiatives tendant à la prise de conscience de la valeur et des caractères distinctifs des diverses expressions de l'architecture du vingtième siècle, tant auprès des élus, des propriétaires et des usagers des bâtiments qu'auprès des professionnels, des médias et du grand public. Cette démarche passe par :

1. l'encouragement de programmes d'éducation à tous les niveaux en milieu scolaire ou extrascolaire, d'autant plus justifié que la plupart des établissements d'enseignement fonctionnent dans un environnement du vingtième siècle ; une telle ouverture sur un patrimoine proche des élèves devrait aller de pair avec une découverte du sens de l'architecture, de l'urbanisme et de l'environnement ;
2. l'emploi des médias sous leurs diverses formes, en vue de campagnes d'information, du soutien de publications spécialisées, de débats publics ou d'expériences pédagogiques au sens le plus large.

Perspectives d'une indispensable coopération européenne

Une coopération européenne s'impose en matière de patrimoine du vingtième siècle, en raison de la similitude et de la complexité des techniques constructives utilisées, du problème des critères de sélection et des méthodes concrètes d'entretien et de conservation.

A cette fin, les États membres sont appelés à :

1. susciter l'échange régulier d'experts, d'expertises et de savoir-faire entre formateurs, historiens, architectes, techniciens et autres professionnels concourant à la protection et à la conservation ;
2. développer une assistance technique mutuelle, notamment avec l'appui du mécanisme d'assistance technique fonctionnant auprès du Conseil de l'Europe ;
3. faciliter les progrès de la connaissance du patrimoine et la recherche en commun, sur le plan européen, de solutions quant aux critères de sélection et aux techniques de conservation physique ;
4. favoriser les politiques de sensibilisation au patrimoine du vingtième siècle par le lancement de publications et d'opérations médiatiques sous les auspices du Conseil de l'Europe ;
5. étudier la mise en place de projets multilatéraux de conservation, susceptibles d'être montés à l'échelon européen, pour des éléments particulièrement importants du patrimoine du vingtième siècle.

Liste des participants

ABRAM Joseph, Professeur, École d'architecture de Nancy
ARCHAMBAULT Guy, Journaliste
ARLIN Patrick, Directeur, Vivian et Cie
ASCHER Françoise, Journaliste, *Décisions construction*
AURY Jean-Pierre, Plasticien, Conseil Béton architectonique, Atelier Aury
AUZOU Jean-Pierre, Architecte des bâtiments de France
BABADJIAN Claude, Architecte des bâtiments de France
BANDILY Philippe, Journaliste, *L'Humanité*
BAPTISTE Hervé, Architecte en chef des monuments historiques
BARNOUD Paul, Architecte des bâtiments de France
BAROT Sylvie, Conservateur des bibliothèques municipales, Ville du Havre
BATUT Pierre, Directeur général, SNC Sachet et Brulet
BAUCHET Bernard, Architecte
BEDARIDA Marc, Architecte, Critique, *Bulletin de l'Institut français d'architecture*
BELBOUAB Yasmina, section française de l'ICOMOS
BELIER Corine, Conservateur adjoint, Conservation régionale des monuments historiques, DRAC Ile-de-France
BENEVEN Christophe, Directeur, Normandie rénovation entreprise
BERTHAULT Maurice, Directeur général adjoint chargé du développement urbain, Ville du Havre
BERTRAND Catherine, Attaché de presse, Ville du Havre
BISCH Richard M., Expert près la cour d'appel d'Aix-en-Provence, Syndicat de co-propriétaires de l'Unité d'Habitation Le Corbusier, Marseille
BLONDEL Christine, Chef du service de programmation, Conservation régionale des monuments historiques Ile-de-France
BOISROBERT Max, Architecte des bâtiments de France
BOISSIERE Jacques, Architecte des bâtiments de France
BOSC François, Responsable développement, Chryso
BOTTON François, Architecte en chef des monuments historiques
BOUCHÉ Nancy, Secrétaire générale de la section française de l'ICOMOS
BOUINEAU Alain, Chef du service maçonneries-monuments historiques, CEBTP (Centre expérimental de recherche et d'études du bâtiment et des travaux publics)
BOULMER Catherine, Chercheur, Service de l'inventaire, Direction régionale des affaires culturelles, Ile-de-France
BOURCY J.-C., Directeur, Nortex S.A., Belgique
BOURGUIGNON Nicole, Architecte des bâtiments de France
BRENIER Ludivine, Étudiante ESTUA Angers
BRIZOT Marie-Pierre, Responsable du secteur restauration monuments historiques, Entreprise Leflaure
BROCARD Alain, Président, Chambre syndicale des architectes du Havre
CAILLAULT Pierre-Yves, Architecte des bâtiments de France
CAILLIAU Agnès, Architecte du patrimoine
CARRÉ Anne-Laure, Ingénieur d'études, Musée des arts et métiers
CHANTRE Philippe, Chef de la mission technique et économique, adjoint au chef du département des monuments et des jardins, Direction du patrimoine, Ministère de la Culture
CHATEL Jean-Yves, Directeur, Jaulard Entreprises
CHAUFFERT-YVART Bruno, Architecte des bâtiments de France
CLAIR Didier, Directeur d'agence, Entreprise Hory Marçais
COLEY Catherine, Chercheur, Archives modernes de l'architecture lorraine (AMAL)
COLLETTE Hervé, Ingénieur, Service urbanisme, Ville du Havre
CONTY Louise, Architecte
CORNEC Marcel, Ingénieur technico-commercial, Degussa France
COSTA Xavier, Directeur, Département d'architecture, Musée d'art contemporain de Barcelone

COURTEVILLE Jean-Pierre, Architecte, Service urbanisme, Ville du Havre
 COUSIN Roland, Architecte, Atelier du sablon, Bruxelles, Belgique
 COX-DUPERROY Françoise, Architecte, Ministère de la Région wallonne, Division du patrimoine
 CULOT Maurice, Responsable du développement Histoire et archives et des Archives d'architecture du XX^e s., Institut français d'architecture
 d'ABOVILLE Christine, Maire-adjoint, chargée de l'Urbanisme, Ville du Havre
 DAVID Bernard, Directeur des applications industrielles, Lafarge Ciments
 de JONGE Wessel, Architecte, DOCOMOMO International, Pays-Bas
 de PONTAUD Marie-Suzanne, Déléguée dans les fonctions d'Architecte en chef des monuments historiques, S.C.P.A. Lagneau
 de SAINT PULGENT Maryvonne, Directeur du patrimoine, Ministère de la Culture
 de VANNOISE Jacques, Architecte des bâtiments de France
 DECAZES Louis, Chargé de mission, section française de l'ICOMOS
 DECOTIGNIE Henri, Ingénieur, Professeur école d'architecture, Lille
 DELAPORTE Jean, Directeur commercial, Thomann-Hanry
 DELHUMEAU Gwenaël, Enseignant, École d'architecture de Bretagne
 DENANTE Sylvie, Recenseur-documentaliste, Conservation régionale des monuments historiques, Aix-en-Provence
 DEVEDJIAN Jocelyne, Journaliste
 DIETERLE Roland, Architecte, Allemagne
 DIETERLE Ruth, Architecte, Allemagne
 DINKEL René, Conservateur régional des monuments historiques, Chargé de mission, Direction du patrimoine
 DUDON Michel, Maître-assistant, École d'architecture de Nantes
 DUFOIX Jean-Pierre, Architecte en chef des monuments historiques
 DUQUESNE Stéphane, Architecte, Service des monuments et des sites, Ministère de la Région de Bruxelles-capitale, Belgique
 DUVIGNEAU Hans Jörg, Directeur général, GSW Gemeinnützige Siedlungs und Wohnungsbaugesellschaft, Berlin, Allemagne
 EGLOFF Dimitri, Chef de cabinet du Maire, Ville du Havre
 ELINCK Jean-Pierre, Chef de travaux, Université libre de Bruxelles, Belgique
 ERNOULT Chantal, Directeur de l'Office de tourisme du Havre
 ESPION Bernard, Chargé de cours, Université libre de Bruxelles, Belgique
 EVEN Celia, Directeur de l'urbanisme, Ville du Havre
 FALK Lydie, Responsable du bulletin de liaison, section française de l'ICOMOS
 FAYARET Chantal, Adjoint au Maire chargée de l'Environnement et de la Santé, Ville du Havre
 FAZILLEAU Jean-Yves, Ouvrier, SARL Les compagnons réunis
 FÉRAULT Marie-Agnès, Chargée de mission, Sous-direction des monuments historiques, Ministère de la Culture
 FRACHON-GIELAREK Nathalie, Journaliste, *Monumental*
 FRENAIS Jacques, Chargé de mission, Plan construction architecture, Ministère de l'Équipement
 GANION Philippe, Architecte des bâtiments de France
 GATIER Pierre-Antoine, Architecte en chef des monuments historiques
 GÉLARD Patrice, Sénateur de Seine-Maritime
 GODART Bruno, Division fonctionnement et durabilité des ouvrages d'art, LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées)
 GODDERIDGE Jean-Paul, Directeur du Service national des travaux
 GONDRAN François, Architecte des bâtiments de France
 GOUTAL Michel, Architecte en chef des monuments historiques
 GOVEN François, Conservateur régional des monuments historiques, Provence-Alpes-Côte d'Azur
 GRADIS Bernadette, Secrétaire générale, Jeunesse et patrimoine international
 GRANON François, Journaliste, *Télérama*
 GRECO Claudio, Professeur, Dipartimento ingegneria civile, Université Tor Vergata, Rome, Italie
 GRIMALDI Gilbert, Chef du groupe structures et ouvrages d'art, Laboratoire régional de l'Est parisien (LCPC)
 GROBOVSEK Jovo, Président d'ICOMOS Slovénie, Directeur adjoint, Direction du patrimoine, Slovénie
 GUILBAUD Éric, Vérificateur des bâtiments de France
 HALLEUX Pierre, Directeur de l'Institut des constructions civiles, Université libre de Bruxelles, Belgique
 HANNEBERT Jean-Louis, Architecte des bâtiments de France
 HARTMANN Véronique, Journaliste, *La pierre d'angle*
 HORNAIN Hugues, Directeur, LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux)
 INIZAN Christelle, Documentaliste recenseur, Conservation régionale des monuments historiques Ile-de-France
 IORI Tullia, Dipartimento ingegneria civile, Université Tor Vergata, Rome, Italie
 JANTZEN Michel, Architecte en chef et Inspecteur général des monuments historiques, Président de la section française de l'ICOMOS
 JAUGEY Pierre, Directeur recherche et développement, CALCIA
 JEANNEAU François, Architecte en chef des monuments historiques
 JOSSELIN Jean-François, Architecte, CAUE de la Manche
 JOUANNAIS Eve, Journaliste, BatônLine

JOXE Denis, Programmateur, Art et actualités
 KEISSER Didier, Directeur, RENOFORS
 KELLER Richard, Conservateur territorial du patrimoine, Écomusée d'Alsace
 KIERDORF Alexander, Dr, Université de Dortmund, Section architecture, Allemagne
 LAFAYE Georges, Gérant, SARL Les compagnons réunis
 LAGNEAU Jean-François, Architecte en chef des monuments historiques
 LAHLOU Annal, Chargée de mission pour la communication, Direction du patrimoine, Ministère de la Culture
 LAHOUSSE René, Architecte, Chargé d'étude centre reconstruit, Service d'urbanisme, Ville du Havre
 LAURENT Françoise, section française de l'ICOMOS
 LAVENU Mathilde, Architecte des bâtiments de France
 LE BIHAN Jean-Pierre, Réalisateur, CRAB (Créations audiovisuelles Bretagne)
 LE RU Jean-René, Responsable du service Constructions publiques, Direction départementale de l'Équipement, Seine-Maritime
 LÉCAILLE Christian, Directeur général, Léon Noël S.A.
 LECOQ Tristan, Maire-adjoint, chargé de la Culture, Ville du Havre
 LEFEVRE Daniel, Architecte en chef des monuments historiques
 LEGO Judith, Ingénieur, Direction des affaires techniques, Fédération nationale du bâtiment
 LEJARRE Pascal, Architecte DPLG diplômé CESHMA
 LELIEVRE Brigitte, Architecte des bâtiments de France
 LEMOINE Bertrand, Rédacteur en chef, AMC *Le Moniteur Architecture*
 LESCROART Yves, Conservateur régional des monuments historiques de Haute-Normandie
 LONGUET Isabelle, Chargée de mission pour les affaires internationales, Direction du patrimoine, Ministère de la Culture
 LOQUIN Jacques, Chef ciment blanc et produits spéciaux, CALCIA
 LORIER, Éditorialiste, *Techniques & Architecture*
 LOUTREL Isabelle, Documentaliste, Conservation régionale des monuments historiques Ile-de-France
 LOUTREL Philippe, Ingénieur, RENOFORS
 LOYER François, Directeur de recherche au CNRS, CRHAAM Université Paris-Sorbonne
 LUIGI Gilbert, Journaliste, *Neuf (architecture)*, Bruxelles
 MACIAN Miguel, Architecte
 MADONI Catherine, Architecte des bâtiments de France
 MAHAUX Monique, Documentaliste, Conservation régionale des monuments historiques Ile-de-France
 MAILLARD Patrick, Adjoint du Conservateur régional des monuments historiques Ile-de-France
 MANCIULESCU Stefan, Architecte en chef des monuments historiques
 MARIE-VICTOIRE Elisabeth, Ingénieur, Cercle des partenaires du patrimoine, Laboratoire de recherche des monuments historiques
 MARINOS Alain, Architecte des bâtiments de France, Président de l'Association nationale des Architectes des bâtiments de France
 MARLIERE Francis, Architecte, Atelier du sablon, Bruxelles, Belgique
 MARTINET Gilles, Directeur technique, LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux)
 MARTY Paul-Louis, Directeur général, OPAC (Office public d'aménagement et de construction) du Val-de-Marne
 MAYER Jannie, Conservateur du patrimoine, Centre de recherches sur les monuments historiques
 MENARD Amélie, Attachée commerciale, M. Lefèvre S.A.
 MENARD Marc-Henry, Président directeur général, M. Lefèvre S.A.
 MESQUI Jean, Directeur général, Société des autoroutes Paris-Normandie
 MEYER Olivier, Archéologue départemental, Seine Saint-Denis
 MEZUREUX Nathalie, Architecte des Bâtiments de France
 MICHEL Dominique, Architecte urbaniste de l'État, Chargée de mission, Direction des musées de France
 MINIER Marie, Architecte des bâtiments de France
 MORTAMET Jean-Gabriel, Architecte en chef des monuments historiques
 MOUFLE Dominique, Architecte en chef des monuments historiques
 MOUTON Benjamin, Architecte en chef des monuments historiques
 MOUTON Yves, Chef du service de physico-chimie des matériaux, LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées)
 MULLER Pierre, Directeur, Laboratoire d'étude des matériaux
 MURIENNE Frédéric, Conservateur régional des monuments historiques
 MUSSO Jean-Michel, Architecte en chef et Inspecteur général des monuments historiques
 NICOL Christian, Directeur général de l'ANAH (Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat)
 OUDIN Philippe, Architecte en chef des monuments historiques
 PALLOT Éric, Architecte en chef des monuments historiques
 PALLOT-FROSSARD Isabelle, Directeur, Laboratoire de recherche des monuments historiques
 PATRY Jean-Alain, Architecte
 PAVY Etienne, Entreprise PAVY
 PAVY Vincent, Entreprise PAVY
 PAYEN Corine, Architecte des bâtiments de France
 PERIGNON Jean-Michel, Architecte des bâtiments de France

PERRAULT Jean, PDG, Ateliers Perrault Frères
 PETELAZ Dominique, Attaché technico-commercial, Société Vicat
 PEYGERÉ David, Conservateur patrimoine, Institut français d'architecture
 PIERROT Christian, Architecte des bâtiments de France
 PIQUOT Joël, Architecte en chef de la Ville du Havre
 PITRAS Françoise, Chargée de mission, section française de l'ICOMOS
 POITEVIN Paul, Ingénieur-conseil
 POLGE Michel, Directeur technique adjoint de l'ANAH (Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat)
 PONCELET Etienne, Architecte en chef et Inspecteur général des monuments historiques
 PONSOT Patrick, Architecte en chef des monuments historiques
 PONTOIZEAU Yvette, Secrétaire générale de rédaction, *Monumental*
 POULAIN Thierry, Architecte, S.C.P.A. Lagneau
 PRENTOUT Isabelle, Architecte, Service urbanisme, Ville du Havre
 PRESCHÉZ Philippe, Enseignant, Centre d'études supérieures pour l'histoire et la conservation des monuments anciens (CESHCMA)
 PUSATERI Patrick, Architecte des bâtiments de France
 QUÉNÉE Bernard, Ingénieur, Responsable département pathologie des ouvrages, LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux)
 RAHARINAIVO André, Chargé de mission, LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées)
 RANTY Valérie, Vérificateur des bâtiments de France
 REMOND Christine, Chargée de mission pour le mécénat, Direction du patrimoine, Ministère de la Culture
 RÉMY Serge, Chef de service, *L'Humanité*
 RIO Hubert, Architecte
 RUEL Bernard, Architecte du patrimoine, Cabinat Oudin
 RUFENACHT Antoine, Maire du Havre, ancien ministre
 SALLÉ Alix, Journaliste, *La pierre d'angle*
 SAVOUREY Catherine, Urbaniste, ADUC (Agence de développement et d'urbanisme du Chinonais)
 SCHMIDT Hartwig, Prof. Dr.-Ing., Karlsruhe, Allemagne
 SCHMIDT Jean-Pierre, Architecte des bâtiments de France
 SCHMÜCKLE-MOLLARD Christiane, Architecte en chef des monuments historiques
 SIMONNET Cyrille, Enseignant, École d'architecture de Grenoble
 SIZAIRE J., Nortex S.A., Belgique
 SMITH Paul, Chercheur, Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France
 STAHLY Bruno, Inspecteur général des monuments historiques, Conseil général des ponts et chaussées
 TAILLEFERT Geneviève, Restaurateur d'œuvres d'art
 TANGHE Astrid, Attachée, Service monuments et sites, Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l'aménagement du territoire, du logement et du patrimoine, Belgique
 TEMENIDES Michael, Directeur général, CIMBéton
 TEXIER Annick, Ingénieur, Laboratoire de recherche des monuments historiques
 TOULIER Bernard, Conservateur en chef du patrimoine, Direction du patrimoine, Ministère de la Culture
 TOURNANT Jacques, Architecte
 TOURNOU Marthe, section française de l'ICOMOS
 URLICH Petr, Maître de conférences, Faculté d'architecture CVUT (Université technique), Prague, République tchèque
 VALLET Christophe, Directeur adjoint du patrimoine, Ministère de la Culture
 VALLIERE Stéphane, Directeur, CREFOP, Châlons-en-Champagne
 VELTER Nathalie, Directeur des affaires culturelles, Ville du Havre
 VERPOEST Luc, Professeur, Centre R. Lemaire pour la conservation, Université catholique de Louvain, Belgique
 WALHAIN Sophie, Architecte des bâtiments de France
 WEETS Olivier, Architecte des bâtiments de France

Achievé d'imprimer par Le Clavier
 Janvier 1999
 Dépôt légal n° 878