

Le béton Perret et ses pathologies

Mickaël BELLAMY¹, Théo VINCESLAS², Sébastien CHERRUET², Tariq OUAHBI¹, Saïd TAIBI¹, Anne PANTET³

¹ Laboratoire Ondes et Milieux Complexe (LOMC) UMR-6294 CNRS, Université Le Havre Normandie, Normandie Université, 53 rue Prony, 76058 Le Havre, France.

² Laboratoire Architecture, Territoire, Environnement, ATE, UR 7464, École Nationale Supérieure d'Architecture de Normandie, 27, rue Lucien Fromage, 76160 Darnétal, France.

³ Normandie Université, Centre de Recherches Interdisciplinaires Habitat- Bâtiment- Béton (CRIHBB) de l'Université du HAVRE

RESUME :

Nous pensons connaître le béton et ses pathologies. Nous n'avons pourtant qu'un peu plus d'un siècle de retour d'expériences sur sa durabilité, et moins d'un demi-siècle sur sa réparabilité. Comparé aux millénaires du bois et de la pierre, le béton reste un champ à explorer, surtout lorsqu'il s'agit de le préserver.

Pour contribuer à cette exploration, nous devons nous appuyer sur le remarquable héritage d'Auguste Perret. Du début du XX^{ème} siècle aux reconstructions d'après guerres, le béton pensé, fabriqué et mis en œuvre par l'architecte constructeur se distingue à plusieurs égards :

- 1) Il est majoritairement laissé apparent, parti pris architectural fort, et donc particulièrement exposé à son environnement ;
- 2) Ses composants sont souvent sourcés localement, à proximité du site de la construction ;
- 3) Il peut être coulé en place ou préfabriqué, jouer un rôle structurel ou non ;
- 4) Il a surtout permis d'ériger des édifices dont la valeur patrimoniale est reconnue et préservée, nous offrant ainsi des études et des diagnostics aussi nombreux que minutieux.

Cette communication propose donc de dresser un état de l'art des pathologies du « béton Perret », l'un des échantillons les plus riches et représentatifs du siècle dernier, pour explorer la durabilité de ce matériau incontournable de la construction moderne.

Mots-clefs : Béton ; Perret ; pathologies ; durabilité ; patrimoine

I. INTRODUCTION

Afin de mener cette exploration du béton d'Auguste Perret et de ses pathologies, nous dresserons d'abord un inventaire des pathologies connues du béton armé. Nous identifierons ensuite les particularités du béton Perret et les pathologies recensées au travers de projets de recherches et des diagnostics réalisés sur les bâtiments signés par l'architecte entrepreneur. Nous poursuivrons par un comparatif des caractéristiques de bétons Perret avec d'autres bétons de la même époque, et un « béton de ciment normalisé » équivalent d'aujourd'hui. Nous serons alors en mesure de dresser un état de l'art des pathologies du béton Perret, utile à leur compréhension et à leurs réparations à venir.

II. LES PATHOLOGIES CONNUES DU BETON ARME

Le béton armé est un mélange de liant (ciment naturel ou artificiel), de granulats de différentes granulométries (fins tels que le sable, à gros pour les graviers), d'eau, d'armatures et d'adjuvants éventuels. Les désordres se manifestent à l'échelle de chaque composant.

Les cahiers et guides techniques de l'ancien ministère de l'Équipement [1] et du Cercle des Partenaire du Patrimoine (CPP) [2] nous permettent d'établir un tableau détaillé des pathologies connues du béton armé par ordre chronologique d'apparition ou croissant de gravité. Voir ANNEXE Tableau A1.

Les pathologies courantes du béton armé sont :

1. Corrosion du béton par les sulfates (réactions sulfatiques gonflantes ou ettringites) ;
2. Carbonatation par l'attaque des espèces dioxyde de carbone (CO_2) : provoque la baisse du PH dans le béton et la corrosion des armatures par expansion, particulièrement en zone urbaine et industrielle forte ;
3. Attaque par les espèces chlorures (Cl^-) : provoque la corrosion des armatures par piqûre, en zones exposées aux sels marins et sels de déverglaçage ;
4. Corrosion des armatures ;
5. Gonflements internes ;
6. Fissuration ;
7. Eclatement de béton ;
8. Désintégration jusqu'à la rupture.

Ces pathologies sont pour la plupart reliées entre elles et provoquent une cinétique des désordres itérative : d'abord une phase d'incubation (diffusion des espèces agressives), qui conduit au début de la corrosion des armatures, à la fissuration voire l'éclatement du béton, qui augmente la propagation des espèces agressives, et donc la corrosion des armatures, et ainsi de suite jusqu'à la ruine de l'ouvrage, comme le montre le modèle proposé par T. Chaussadent dans l'ouvrage « Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé » [3] présenté en Figure 1.

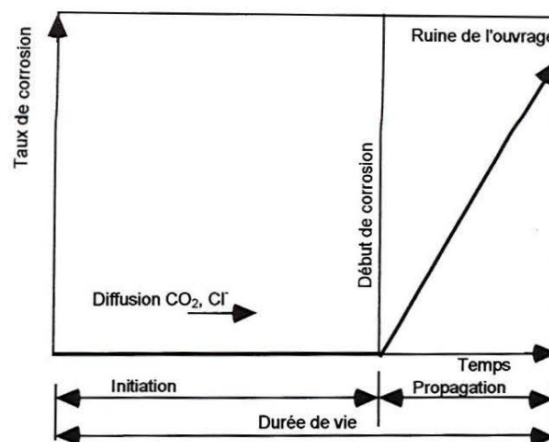


FIGURE 1. Modèle conceptuel de la corrosion des aciers dans le béton

F. Botton, architecte-maître d'œuvre pour le projet de restauration de la Tour Perret de Grenoble, met en avant le caractère exponentiel de l'évolution des désordres dans le béton, comparé à la cinétique des désordres observée dans la pierre, lors de sa conférence « Ordre et désordres du béton » [6]. Lors de la conférence-débat « Restauration de la Tour Perret » [7], il attribue à juste titre la majorité de ses pathologies au *couple infernal* entre l'acier et du béton.

Les facteurs aggravant de ses pathologies sont :

- L'exposition des bétons (localisation, atmosphère, polluants, gradients d'humidité et de température) ;
- La composition du béton (type de ciment, dosage en ciment, teneur en eau, teneur en sulfate, teneur en chlorure, porosité, territorialité des granulats, adjuvants) ;
- Au taux d'armatures (nombre, diamètres, position) ;
- A l'épaisseur de protection des armatures : l'enrobage.

Un processus difficile à prévenir, surveiller, enrayer et réparer durablement.

Mais qu'en est-il pour le béton Perret ? Est-il soumis aux mêmes pathologies ? Dans quelles mesures ? Et leurs origines sont-elles différentes ? Pour envisager ce comparatif, dressons d'abord les particularités du béton Perret.

III. LES PARTICULARITES DU BETON PERRET

A. Un béton apparent

Le parti pris architectural fort d'Auguste Perret est de laisser le béton nu, d'apparence brute mais travaillée et colorée [21]. Pour ce rendu d'aspect architectural Auguste Perret a recours à des ciments soigneusement sélectionnés et une grande diversité de granulats. Cette particularité expose directement le béton aux pollutions urbaines ou industrielles critiques pour la carbonatation, et aux sels ou à l'atmosphère marine critiques pour les attaques par les chlorures.

Si l'on devait le comparer le béton Perret à un béton respectant les normes actuelles, le béton devrait respecter les critères minimums de performance pour les classes d'exposition de la norme EN 206 [4.1] [4.2] suivantes :

- XC4 - Béton exposé à l'air et à l'humidité - Alternance d'humidité et de séchage
- XF1 - Surface de béton verticale exposée à la pluie et au gel - Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage

Nous utiliserons ce « béton de ciment normalisé » à titre comparatif dans les chapitres suivants.

B. Des composants de béton sourcés localement

Pour des raisons économiques évidentes et des contraintes de temps (moyens d'acheminement de l'époque ou urgence des reconstructions d'après guerres), les matériaux entrant dans la composition des bétons étaient autant que possibles sourcés localement.

Ce fût particulièrement le cas pour les granulats, exemple :

- Géologie des Alpes dans la composition des bétons de la Tour de Grenoble ;
- Argiles pour l'Eglise du Raincy.

Pour le ciment, il fallait s'accommoder des implantations et du savoir-faire des cimentiers de l'époque. Cela dépendait de sa composition plus ou moins naturelle. Il est notamment relaté dans la littérature et les conférences :

- Le ciment de Massy ;
- Les chaux et ciments de Bourgogne ;
- Le ciment artificiel « Super Flambeau » de Marseille.

Ces matériaux pouvaient avoir l'inconvénient d'être riches en argiles ou en sulfates, favorisant le développement de pathologies, ou rendant incompatibles l'utilisation de certains matériaux de réparation.

C. Un béton coulé en place ou préfabriqué, structurel ou de remplissage

Lors de la Conférence L'église du Raincy / la Tour de Grenoble [5], C. Avenier mettait en avant le classicisme et rationalisme à la Perret : lignes fines et droites sans ornement, coupes et profils propres à bâtir en béton armé, mise en œuvre économe adaptée à l'art du coffrage, coffrages simples, remployés et réadaptés, structure primaire (poteaux-poutres), ossature secondaire et remplissage, remplissage en claustras ou panneaux d'aspect décoratif (motifs écailles pour la Tour de Grenoble par exemple).

Auguste Perret était également entrepreneur avec ses Frères (l'entreprise Perret Frères). Ils ont développé un réel savoir-faire dans le béton et sa mise en œuvre. La conception architecturale était combinée à des modes constructifs et des modèles simples et réutilisables. Le béton pouvait être coulé en place (parfois même pisé avec une faible teneur en eau comme il a été constaté à l'Eglise Saint Joseph), ou préfabriqué. La préfabrication (foraine en général) des poteaux, des poutres et des panneaux s'est fortement développée notamment lors des reconstructions d'après guerres où le temps était compté.

Les constructions trop hâtives sont toutefois une piste d'exploration de l'origine de certains désordres en lien avec la qualité de mise en œuvre.

Les éléments structuraux (poteaux, poutres, balcons) étaient composés de ciments artificiels alors que les éléments de remplissage étaient plutôt composés de liants naturels.

Les deux types d'éléments souffrent d'un faible enrobage, de l'ordre de 20 mm. Ils sont donc particulièrement sujets au phénomène de corrosion des armatures et d'éclatement des bétons.

Les éléments de remplissages comportaient moins d'armatures et donc, malgré le faible enrobage, présentent un meilleur état de conservation.

La conception ossature-remplissage implique des jonctions qui sont le lieu de pathologies sous-jacentes à très long terme en cas de mauvais entretien.

D. L'approche particulière des pathologies sur des ouvrages protégés au titre des Monuments Historiques

Du projet de recherche REDMONEST [8] est né un inventaire du patrimoine architectural en béton [9]. Parmi la liste des édifices, pas moins de 25 sont attribués à l'auteur Auguste Perret, classés et/ou inscrits au titre des Monuments Historiques.

De nombreux ouvrages ont souffert de réparations trop hâtives et peu qualitatives, par manque de connaissances, de temps ou de moyens financiers. Le Laboratoire de Recherche des

Monuments Historiques (LRMH) a donc développé de nombreux de sujets de recherche pour maîtriser la situation.

La protection au titre des Monuments Historiques [10] implique des dispositions particulières pour leur conservation afin que toutes les interventions d'entretien, de réparation, de restauration ou de modification puissent être effectuées en maintenant l'intérêt culturel qui a justifié leur protection.

Les programmes de réparation, hors entretien courant, nécessitent l'autorisation délivrée par le préfet de région. Ces travaux ne peuvent pas avoir pour effet de modifier le caractère ou leur apparence de manière inacceptable. Ils s'exécutent sous le contrôle scientifique et technique (CST) des services de l'État chargés des monuments historiques qui s'exerce dès le début des études documentaires et techniques préparatoires puis tout au long des travaux jusqu'à leur achèvement. La maîtrise d'œuvre de ces travaux doit être confiée à des catégories de professionnels spécialisés.

Plus concrètement, le but est de :

- Préserver l'authenticité (nature des matériaux, proportions, esthétique...);
- Minimiser les pertes de matières originelles irréversibles ;
- Assurer autant que possible la réversibilité des réparations et autres travaux.

Les défis à relever par les protecteurs, chercheurs, ingénieurs, diagnostiqueurs et réparateurs sont donc les suivants :

- Surveiller les ouvrages de la manière la plus préventive et la moins intrusive possible pour minimiser les pertes de matières. Il existe de nombreuses méthodes de surveillance mais pas toujours satisfaisantes vis-à-vis des contraintes techniques et météorologiques (électrification des capteurs, changements des conditions d'humidité et de température...). De ce constat naît de nouvelles technologies de monitoring comme le projet des « Lames orphelines » porté par le LRMH et Bouygues TP [11], aujourd'hui breveté, pour surveiller les ouvrages sans capteurs internes ;
- Ausculter et diagnostiquer de la manière la plus adaptée et délicate possible pour minimiser les pertes de matières et définir un programme de réparations le plus compatible avec la préservation de l'authenticité de l'œuvre et la réversibilité des travaux ;
- Restaurer sans modifier la proportion, l'aspect et l'authenticité de l'œuvre. L'enrobage ne pourra pas être augmenté. Par conséquent, les armatures devront être repoussées (problématique de perte de matière), ou protégées physiquement par un matériau de réparation performant (problématique de durabilité et de compatibilité d'aspect), ou protégées électro-chimiquement (protection cathodique par exemple).

L'approche particulière des pathologies sur des ouvrages protégés au titre des Monuments Historiques pousse la recherche et l'innovation.

Nous pouvons à présent corréler l'état des connaissances sur les pathologies du béton armé et les particularités du béton Perret pour en dresser un état de l'art de ses pathologies.





IV. ETAT DE L'ART SUR LES PATHOLOGIES DES OUVRAGES PERRET

De nombreux programmes de recherche internationale ont été lancés sur le diagnostic, le monitoring et la durabilité des restaurations (APOS, CANOPEE, Perfdub, PEPS, ACROBAT). Les conférences et colloques sur les œuvres de béton Perret sont également nombreuses.

Des références [5], [6], [7], [11], [13], [14], [18], [19] et [20], nous avons pu dresser ci-dessous un tableau des pathologies diagnostiquées sur des ouvrages Perret (Tableau 1).

TABLEAU 1. Pathologies diagnostiquées sur des ouvrages Perret

Ouvrages Perret diagnostiqués	Eglise Notre-Dame de La Consolation, Le Raincy (93)	Eglise Saint-Joseph, Le Havre	Palais d'Iéna, Paris	Tour de Grenoble (84 m)
Références	[5], [13], [14]	[14], [18], [19]	[11], [14], [20]	[5], [6], [7]
Années de construction	1922-1923	1951-1957	1937-1943	1924
Années de restaurations	1960, 1989-1995, 1996	2003-2005	2014-2016	2023-2025
Photo de l'ouvrage				
Mode constructif	Structure autoportante en béton armé Piliers en béton armé Remplissage en claustras préfabriqués et peu ferrailés	Socle en béton armé Piliers en béton armé Remplissage en béton bouchardé	Colonnes en béton armé Eléments de façades en béton armé Corniches en béton armé	Fondations par pieux Structure béton armé Ossature béton armé Remplissages panneaux écaillés
Composants du béton	Composition des bétons à base de liants trop riches en chaux et agrégats trop argileux	Sables silico-calcaire d'origine alluvionnaire (siliceux 67% et calcaire 14 à 18%) Ciment très siliceux	Structure : gravillons de Seine Colonnes : silex Remplissage : porphyre vert ou marbre rose Claustras : pierre d'Euville, gré rouge des Vosges	Pieux en ciment de Massy Ossature en gros granulats locaux (géologie résumé des Alpes) et ciment artificiel « Super Flambeau » de Marseille Béton de granulats fins et ciment naturel pour les remplissages
Pathologies diagnostiquées	Eclatements de béton Décompositions plus ou moins profonde Nids de cailloux au raccord entre les coffrages	Eclatements de béton sur les piliers, les poutres et le clocher Décompositions plus ou moins profonde Ecaillage des poteaux de décoration	Eclatements de béton Décompositions plus ou moins profonde notamment des corniches et éléments de façades, claustrats Nids de cailloux	Eclatements de béton Rupture des armatures transversales

Ouvrages Perret diagnostiqués	Eglise Notre-Dame de La Consolation, Le Raincy (93)	Eglise Saint-Joseph, Le Havre	Palais d'Iéna, Paris	Tour de Grenoble (84 m)
Photos de pathologies	 Nid de cailloux	 Eclatement de béton des arrêtes	 Eclatement de béton des corniches	 Eclatement de béton des arrêtes
Causes	<p>Liants trop riches en chaux et agrégats trop argileux</p> <p>Position des armatures</p> <p>Défaut d'enrobage</p> <p>Carbonatation</p> <p>Corrosion des armatures</p> <p>Contamination aux sulfates qui agissent sur les argiles et les chaux notamment dans les claustras</p> <p>Mise en œuvre trop hâtive avec béton trop liquide coulé en place</p> <p>Béton d'origine poreux</p> <p>Béton de réparation moins poreux</p> <p>Dégradation des réparations au droit de l'interface</p>	<p>Défaut d'enrobage</p> <p>Carbonatation</p> <p>Contamination aux sulfates</p> <p>Contamination par les chlorures</p> <p>Corrosion des armatures</p>	<p>Carbonatation</p> <p>Corrosion des armatures</p> <p>Pollution sulfatée</p> <p>Contamination chlorure exogène</p>	<p>Défaut d'enrobage (5 à 95 mm). Souvent < 20 mm</p> <p>Pollution sulfatée (souvent > 4%, jusqu'à 15%)</p> <p>Carbonatation (23 à 150 mm)</p> <p>Corrosion des armatures</p> <p>Dilatation différentielle entre l'acier et le béton sur les arrêtes fortement exposées aux changements d'humidité et de température (ensoleillement)</p>

Cet état de l'art confirme la sensibilité du béton Perret aux pathologies connues du béton armé. Il montre également la grande variété de liants et de granulats utilisés.

Il met aussi en évidence des pathologies moins connues ou moins visibles :

- Dilatation différentielle entre les armatures et le béton :

A faible température, la dilatation des deux matériaux est du même ordre de grandeur (armatures : $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; béton : $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Mais à température plus importante (fort ensoleillement), le phénomène n'est pas négligeable, comme le montre la Figure 2. Ce phénomène est aggravé par : des alternances brusques de températures et d'humidité, un faible enrobage, des ouvrages monolithiques de grande longueur, la dégradation des armatures de confinement (cadres transversaux qui maintiennent les armatures longitudinales).

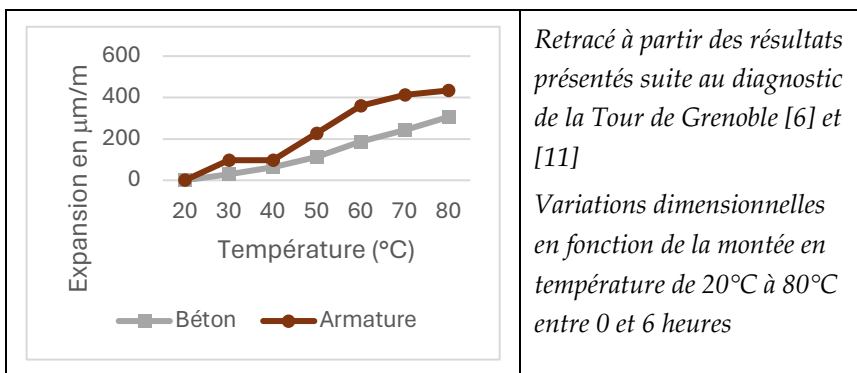


FIGURE 2. Courbe représentant les variations dimensionnelles des armatures et du béton

- Dégradations sous-jacentes et peu visibles à la jonction entre structures et remplissages : Exemple pour les îlots V36 – V41 au Havre :



Risque de pathologies à long termes entre poteaux et remplissage

FIGURE 3. Extrait d'un plan des archives municipales des îlots d'habitation V36 et V40 au Havre – Et photo de façades

Terminons cette exploration par des photos de pathologies sur l'îlot V40 en cours de restauration :



Poteau

Arrête de poteau

Encadrement de baie

Sous-face de balcons

FIGURE 4. Photos de l'îlot V40 au Havre en cours de restauration

Le centre-ville du Havre, classé patrimoine UNESCO est riche en enseignements sur les pathologies du béton Perret. Le CRIHBB (Centre de Recherches Interdisciplinaires Habitat- Bâtiment- Béton), créé en 2015, fait partie du plan de gestion [22] et permet d'alimenter la connaissance actuelle notamment sur le béton.

V. COMPARAISON DU BETON PERRET AVEC D'AUTRES BETONS

Les articles découlant du projet PEPS « Performance evaluation of patch repairs on historic concrete structures » [13], les différents colloques et conférences sur le béton Perret [5], [11], [14], les cahiers techniques [19], et les articles [20] nous ont permis de dresser un tableau comparatif entre des bétons Perret et d'autres bétons anciens d'ouvrages patrimoniaux (Tableau 2).

Nous avons pris parti de le comparer en dernière colonne avec un « béton de ciment normalisé » correspondant à la classe d'exposition des ouvrages Perret : XC4 / XF1, en référence aux normes EN 206 [4], FD P18-480 [15] et EN 1992-1-1 [16].

TABLEAU 2. Comparaison du béton Perret avec d'autres bétons

Ouvrages en béton	Eglise du Raincy (Perret)	Palais de Iéna - Paris (Perret)	Eglise Saint Joseph – Le Havre (Perret)	Maisons Jaoul (A et B) - Neuilly-sur-Seine (Le Corbusier)	Unité d'habitation Rezé - Nantes (Le Corbusier)	Béton de ciment normalisé XC4 / XF1
Références	[5], [13], [14]	[11], [14], [20]	[19]	[13]	[13]	[4], [15], [16]
Année de construction	1922-1923	1937-1943	1951-1957	1953-1955	1953-1955	
Dosage en ciment (kg/m ³)	410		280 à 315	Maison A : 390 Maison B : 285	320	≥ 300
Module d'élasticité dynamique (GPa)	24,9	27	25		41,9	Pour une classe de résistance minimale C30/37* : 33
Porosité accessible à l'eau (%)	19,9	18,3	16,4	Maison A : 17,8 Maison B : 16,2	12,4	14,6**
Teneur en chlorure totale (% par rapport à la masse de ciment)	< 0,22 % (constant dans l'épaisseur)	0,6 %	0,46 %	< 0,07 % (constant dans l'épaisseur)	0,35 % (de 30 à 40 mm)	< 0,40 (classe de teneur en chlorure Cl 0,40)
Teneur en sulfate (% par rapport à la masse de ciment)	Surface (0-20 mm) : 6% Profondeur : < 2%	3 à 11%	4,1 à 5,3%	Surface (0-15 mm) : 4,43% (maison A), 3,29% (maison B) Profondeur : < 3,26 % (maison A), < 4,3% (maison B)	Surface (0-10 mm) : 3,89 % Profondeur : < 3,19 %	< 2%
Enrobage (mm)	De 14 à 62 mm	De 26 à 52 mm	De 19 à 70 mm	De 25 à 55 mm (maison A) De 20 à 40 mm (maison B)	De 10 à 65 mm	Classe S4 (50 ans) : 40 mm Classe S6 (100 ans) : 50 mm
Profondeur de carbonatation (mm)	Moyenne : 43 mm De 25 à 55 mm	Moyenne : 18 mm	Moyenne : 26 mm De 13 à 50 mm	Moyenne : 25 mm (maison A), 20 mm (maison B) De 10 à 35 mm (maison A), 5 à 30 mm (maison B)	Moyenne : 35 mm De 25 à 60 mm	

* La norme EN206 CN autorise une classe de résistance C25/30 sous certaines conditions

** FD P18-480 (octobre 2022) Béton Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle - D.3 Exemple 3 : Utilisation de liant ternaire (CEM II/B-L + laitier) en classe d'exposition XC4/XF1

A partir des diagnostics du chapitre IV et du tableau comparatif ci-dessus, nous pouvons remarquer que :

- Le dosage en ciment des bétons Perret peut être plus important que les autres bétons ou un « béton de ciment normalisé » équivalent ;
- Le module d'élasticité des bétons Perret est plus faible ;
- Les bétons Perret sont plus poreux. Cette caractéristique est liée au type de ciment utilisé, au dosage en ciment et à la teneur en eau ;
- La pollution sulfatée des bétons Perret est proportionnellement plus importante ;
- Les enrobages des bétons Perret sont faibles, souvent inférieurs à 20 mm, et très inférieurs aux minimas actuels (40 à 50 mm) pour les classes d'exposition correspondant aux ouvrages concernés ;
- La profondeur de carbonatation des bétons Perret est, par conséquent, plus importante.

Il manquerait à cette étude comparative la corrélation entre situation géographique, exposition à l'environnement et aux polluants, et l'âge du béton (directement lié à la profondeur de carbonatation). Ces facteurs pourraient être ajoutés lors d'une prochaine phase exploratoire sur les pathologies du béton Perret, avec un échantillon élargi parmi les 25 bâtiments en béton classés ou inscrits au titre des Monuments Historiques réalisés par Auguste Perret.

VI. CONCLUSIONS

Les pathologies du béton Perret sont analogues aux pathologies connues des bétons de la même époque et des bétons d'aujourd'hui :

- Carbonatation ;
- Contamination aux ions chlorures ;
- Contamination aux sulfates ;
- Corrosion des armatures ;
- Eclatements de béton.

Ces pathologies sont accentuées par :

- Un béton riche en ciment et poreux, avec des granulats variés (pour la couleur et le rendu d'aspect) potentiellement réactifs aux attaques chimiques ;
- Des ouvrages bruts et travaillés ou de faibles épaisseurs (balcons, corniches, encadrement de fenêtres, claustras) ;
- Un pourcentage d'armatures important ;
- Un béton laissé brute avec un faible enrobage (souvent de l'ordre de 20 mm) ;
- Une mise en œuvre parfois trop hâtive.

Certaines pathologies sont moins connues ou moins relatées dans la littérature, notamment :

- Dilatation différentielle entre les armatures et le béton, notamment pour les ouvrages élancés, avec un faible enrobage et exposés à des forts gradients de température et d'humidité ;

- Pathologies sous-jacentes et peu visibles à la jonction entre les éléments de structure et les remplissages, en particulier en cas de manque de surveillance localisée ou de mauvais entretien des joints d'étanchéité.

Pour autant, d'après Arnaud de Saint-Jouan et Nicolas Horiot lors de leur intervention au colloque international de 2024 en hommage à Auguste Perret [14] sur les îlots V40 et V41 du Havre : « *le malade se porte bien* ». Et d'après Elisabeth Marie-Victoire lors de son intervention "Inventaire, pathologies et diagnostic" au Colloque "Patrimoine en béton : Enjeux et innovations" en 2020 [11] : « *Les bétons centenaires sont relativement en bon état* ».

Enfin, les pathologies du béton Perret protégé au titre des Monuments Historiques nous lancent les défis suivants, pour que le couple acier-béton reste uni par les liens sacrés du patrimoine, ou pour les remarier :

- Les surveiller et les diagnostiquer de manière adaptée et délicate pour éviter les pertes de matières originelles irréversibles ;
- Les réparer durablement, dans le respect de l'œuvre, en préservant son authenticité, ses proportions (contrainte du maintien des enrobages faibles) et la performance esthétique.

REFERENCES

[1] Défauts apparents des ouvrages d'art en béton (1975). Ministère de l'équipement service d'études techniques des routes et autoroutes laboratoire central des ponts et chaussées

[2] Cahier technique 1 (CT1) – Les altérations visibles du béton – Définitions et aide au diagnostic (CT1) (1996) *Les Cahiers Techniques (CT) du Cercle des Partenaires du Patrimoine (CPP)*

[3] T. Chaussadent (septembre 1999). Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé. *Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LCPC)*

[4] Norme NF EN 206+A2 (mars 2021) Béton - Spécification, performances, production et conformité et Complément national à la norme NF EN 206+A2 (novembre 2022)

[5] Conférence *L'église du Raincy / la tour de Grenoble*, avec C. Avenier & B. Mouton (15 février 2014)

[6] Conférence "*Ordre et désordres du béton*" (Tour Perret - Grenoble) avec F. Botton architecte-maître d'œuvre pour le projet de restauration de la tour Perret de Grenoble (6 février 2020)

[7] Webinar Conférence-débat du 12 octobre 2021 Restauration de la Tour Perret : essais aux limites, avec F. Botton

[8] Projet de recherche REDMONEST : Monitoring dynamic network for existing structures of concrete cultural heritage. Auteur(s) : MARIE-VICTOIRE, (É.) | BOUICHOU, (M.) | Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento | Centre Scientifique et Technique de la Construction | Université de Liège | Cercle des partenaires du patrimoine

[9] Inventaire du patrimoine architectural en béton : <https://beton-concrete.eu/>

[10] Protection au titre des Monuments historiques - <https://www.culture.gouv.fr/Aides-demarches/protections-labels-et-appellations/protection-au-titre-des-monuments-historiques>

[11] Colloque "Patrimoine en béton : Enjeux et innovations" (21 octobre 2020) :

<https://www.lrmh.fr/default/pole-beton.aspx?lg=fr-FR>

Partie 2. "Auguste Perret et l'architecture en béton", Cédric Avenier

Partie 4. "Inventaire, pathologies et diagnostic", Elisabeth Marie-Victoire

Partie 5. "'Lames orphelines" - Une technologie innovante : Présentation du brevet", Christian Crémona

Partie 8. "La restauration du Palais d'Iéna", Arnaud de Saint-Jouan

[12] S. Wilkie, J. Ducasse-Lapeyrousse, A. P. Arato Gonçalves, E. Marie-Victoire, S. Macdonald, M. Bouichou, N. Lauder, D. Farrell, P. Gaudette & Ann Harrer (2022). Performance evaluation of patch repairs on historic concrete structures (PEPS) : a methodology for in situ and laboratory analyses. *Concrete Solutions 2022 – 8th International Conference on Concrete Repair, Durability & Technology*, 361, 04002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236104002>

[13] M. Bouichou, J. Ducasse-Lapeyrousse, E. Marie-Victoire & M. Rakarabo (2022) Performance evaluation of patch repairs on historic concrete structures (PEPS) : Preliminary results from a selection of French case studies. *Concrete Solutions 2022 – 8th International Conference on Concrete Repair, Durability & Technology*, 361, 04005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236104005>

[14] Colloque international 2024 « Auguste Perret 1874-1954 : un anniversaire » (28 et 29 novembre 2024) :

- Cédric Avenier, architecte, docteur en histoire de l'art : *Topologie d'un matériau brut : les bétons d'Auguste Perret*
- Arnaud de Saint-Jouan, architecte en chef des monuments historiques & Nicolas Horiot, architecte, président du cercle Guimard : *Réflexions autour de l'immeuble rue Raynouard à Paris et des îlots V40 et V41 au Havre*
- Pascal Denécheau, docteur en musicologie & Frédéric Hervé, défenseur du patrimoine havrais : *Enquête sur les persiennes des immeubles de la place de l'Hôtel de Ville du Havre*
- Jean Ducasse-Lapeyrousse, docteur en génie civil (LRMH) : *Retour d'expérience sur les réparations par patch d'édifices Perret*

[15] Norme FD P18-480 (octobre 2022) Béton Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle

[16] Norme NF EN 1992-1-1 (octobre 2005) Eurocode 2 - Calcul des structures en béton Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments Modifié par : Amendement A1 (février 2015)

[17] A. Pantet, I Valtier, R. Eleta-Defilippis, M. Chevé, V. Bonneau- Contremoulins (2018). Le Havre, la première ville architecturée en béton armé. *AJCE Vol 36 No 1 (2018): Special Issue - RUGC 2018 St Etienne* <https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.74>

[18] A. Pantet (2022). Présentation « Perret et la reconstruction du Havre » le 14 septembre 2022 - Rencontre ULHN CHEC CHEBAP

[19] Le cahier de la section française de l'Icomos. Béton et Patrimoine. Le Havre (1996). *Eglise Saint Joseph du Havre – Altérations et diagnostic*

[20] F. Goven, A. de Saint-Jouan, E. Marie Victoire, M. Bouichou (2018). Restauration des façades du Palais d'Iéna. *Monumental 2018 Le Patrimoine des années 1925 – 1935*

[21] Encyclopédie Perret. Collectif d'auteurs, Jean-Louis Cohen, Joseph Abram, Guy Lambert (2002)

[22] Le Havre - Plan de gestion UNESCO

ANNEXE

TABLEAU A1. Tableau détaillé des pathologies connues du béton armé

Par ordre chronologique d'apparition ou croissant de gravité

Désordres	Symptômes	Causes probables	Conséquences
Défauts géométriques	Variation en élévation du profil d'un élément de l'ouvrage Aspect irrégulier de la surface au point de vue forme Bullage : présence de bulles Ségrégation localisée Canaux de ressuage : petits canaux ouverts, essentiellement Traces de la texture du coffrage (planches) qui s'accompagne souvent de fuite de laitance Inclusions : fibre de bois, papier, adhésif Arrachements	Mauvaise réalisation ou mauvaise conception du coffrage, ou tassement du cintre, ou décoffrage prématuré variations localisées du profil Alignement de l'ouvrage défectueux à la construction Absence de vibration localisée, fuite de laitance	Principalement esthétiques Points d'entrée potentiels d'attaques chimiques
Différence de teinte	Cernes : franges claires et foncées Marbrure Ragréage Traces de rouille Auréoles ponctuelles ou linéaires	Variation de teinte à l'échelle du granulats Présence de cales Non élimination des fers de ligature en fond de coffrage ou utilisation de cartes métalliques Fuites de laitance	Principalement esthétiques Points d'entrée potentiels d'attaques chimiques
Poussiérage	Manque de compacité et d'homogénéité dans la masse du béton qui peut s'observer d'après l'aspect du parement	Défaut de qualité du béton	Suintements, efflorescences, stalactites Corrosion du béton, corrosion des aciers Gonflement Désintégration

Désordres	Symptômes	Causes probables	Conséquences
			Fissures
Porosité	Apparition de matériaux poreux à la surface du béton durci	Dosage en ciment Teneur en eau Mauvaise vibration du béton	Diminution de la résistance en surface du béton
Efflorescence	Tâches blanchâtres en surface du béton provenant de la carbonatation	Mauvaise protection ou étanchéité	Carbonatation Baisse du PH dans le béton Corrosion des armatures
Epaufrure	Fragment détaché de la masse du béton Le plus souvent le long des armatures	Action du climat Pression ou expansion à l'intérieur de la masse Gonflement par la rouille	Augmentation de la cinétique des désordres
Faiçonnage	Fissures fines de faible profondeur (<3 cm) sur la surface du béton ou d'un enduit dans des directions	Ecaillage du béton	Augmentation de la cinétique des désordres
Ecaillage	Fine couche de mortier durci, décollée de la surface, et laissant à nu les agrégats Perte de mortier en surface sans que les granulats soient exposés Perte de mortier autour des granulats	Perte de mortier autour des granulats Mauvaise vibration du béton	Acier dénudé Désintégration avec perte de granulats
Nid de cailloux	Gravillons apparents avec vide et absence de fines entre les granulats	Courant dans les zones de reprise de coulage	Porosité accrue favorisant la pénétration d'eau et les attaques chimiques
Acier non adhérent	Absence de liaison entre l'acier Epaufrure Désintégration	Huile de coffrage Mauvaise mise en œuvre des armatures de confinement (transversales) Dilatation différentielle entre l'acier et le béton	Perte de résistance
Corrosion du béton	Modification chimique du béton Gonflement Pelade Désagrégation des granulats Désagrégation du ciment	Action d'eau ou d'ambiance agressive Formation de sel de Candlot (réaction sulfatique gonflante ou ettringite)	Perte de résistance Corrosion des aciers
Corrosion des aciers	Désintégration des armatures par électrolyse ou attaque chimique	Insuffisance d'enrobage Mauvaise étanchéité Acier dénudé	Poussée / contraintes de traction interne Epaufitures Fissures Déformation Rupture
Fissures	Fissures courtes (< 60 cm) à longue Fissures orientées : longitudinales, diagonales, transversales	Surfaces soumises à une dessiccation excessive avant la fin de prise du béton Les fissures reproduisant le ferrailage peuvent provenir de la vibration des armatures Gel Attaque chimique	Pénétration accélérée de l'eau ou d'espèces agressives Corrosion des armatures Epaufitures Ecaillage Eclatements

Désordres	Symptômes	Causes probables	Conséquences
		Les autres causes dépendent de l'orientation des fissures et peuvent révéler un sous-dimensionnement (cisaillement, effort tranchant, compression ou traction excessive)	Désintégration Rupture
Aciers dénudés	Armatures apparentes	Disparition ou insuffisance d'enrobage Attaque du béton de type mécanique (chocs) Attaque du béton de type chimique Manque d'adhérence entre l'acier et le béton Corrosion des armatures	Déformation Rupture
Carbonatation	Apparition de traces blanches (voir efflorescence) Formation d'une peau sous l'effet de l'atmosphère ambiante Stalactites blanchâtres Corrosion des armatures par expansion	Exposition à la pollution urbaine ou industrielle Transformation par l'action du gaz carbonique (dioxyde de carbone CO ₂) de la chaux en carbonate	Baisse du PH dans le béton Corrosion des armatures Eclatements de béton Action combinée à l'attaque par les ions chlorures
Attaque par les ions chlorure	Corrosion des armatures par piqûre	Exposition aux sels marins ou de déverglaçage Attaque localisée des armatures	Corrosion des armatures par piqûre Eclatements de béton Action combinée à la carbonatation
Désintégration	Destruction avancée du béton Gonflement Fissuration excessive	Corrosion chimique du béton Gel Corrosion des armatures Effort mécanique excessif	Impropriété au service Rupture
Déformation	Toute déformation anormale du béton par rapport à sa forme d'origine Flèche permanente excessive Tassement Basculement	Sous-dimensionnement Défaut de mise en oeuvre Effort mécanique excessif Fatigue Corrosion des armatures Manque d'entretien	Impropriété au service Rupture
Cassure	Fissure très importante traversant de part en part le béton Souvent accompagnée d'épaufrures et/ou de déformations	Sous-dimensionnement Effort mécanique excessif Fatigue Corrosion des armatures Manque d'entretien	Impropriété au service Rupture