

Durabilité des réparations par patch : retour d'expérience sur un corpus de monuments historiques français

Projet international PEPS : **Performance Evaluation of Patch Repairs on Historic Concrete Structures**

Jean Ducasse-Lapeyrusse
Élisabeth Marie-Victoire
Myriam Bouichou



Introduction et contexte

- **Principale pathologie des bétons : la corrosion des armatures**

- ➔ Formation de « rouille » *i.e.* d'oxydes de fer
- ➔ Produits de corrosion expansifs (4 à 6 x volume acier)
- ➔ Fissurations, éclats, épaufrures...

- **Technique de réparation la plus courante** ➔ Le ragréage (« patch »)

Principe de la réparation par « patch »

- Purge du béton altéré, dégagement des armatures corrodées (sur toute leur circonférence)
- Décapage des armatures (si nécessaire remplacement et/ou traitement)
- Application du matériau de réparation (bonne compaction, cure, finition...)

- **Retour d'expérience sur cette technique de réparation**

- ➔ Selon les résultats du projet européen CONREPNET (2007)

Basé sur enquêtes par questionnaires de structures conventionnelles en béton.

Dans près de la moitié des cas, les réparations par patch aboutissent à un échec, parfois dans des délais très courts et avec un maximum de durabilité évalué à 10 ans.

- **Enjeux sur le patrimoine béton**

- **Enjeux de conservation** : préserver le matériau d'origine, lisibilité et compatibilité esthétique de la réparation.
- **Enjeux économiques et environnementaux** : limiter les interventions couteuses, l'emploi de nouveaux matériaux et produits.



Corrosion dans une réparation par patch

Introduction et contexte

➤ Refaire à l'identique ?

- L'analyse le permet, en pratique parfois déconseillé.
- Matériaux d'origine ?
 - ➔ Ciments actuels différents (composition, granulométrie...),
 - ➔ Armatures différentes (Hennebique vs HA...)...
 - ➔ Altération du substrat (Contamination par les sulfates, sels...)
- Problème de retrait, d'adhérence...
- Durabilité du matériau d'origine suffisante ?
- Durabilité et compatibilité ≠ identique.



Système d'armature Cottencin, église Saint-Jean de Montmartre, 1894
Médiathèque du patrimoine et de la photographie



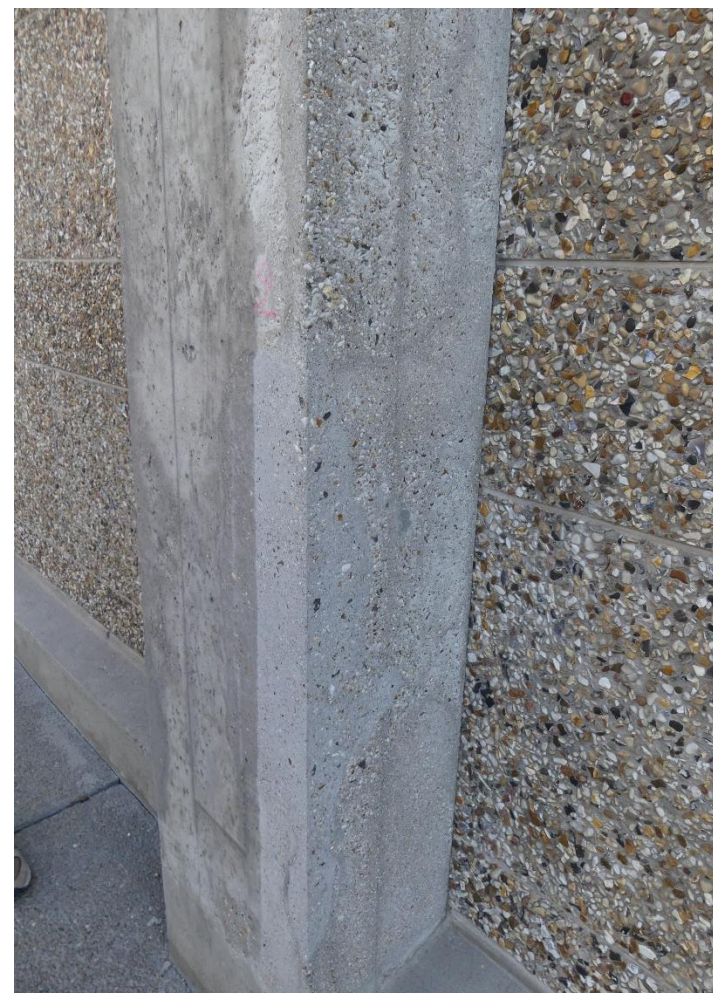
Armatures Hennebique,
Pont Camille de Hogues 2006

Introduction et contexte

Le projet PEPS :

Performance evaluation of patch repairs on historic concrete structures (PEPS)

Évaluation performancielle des réparations par patch dans les monuments historiques en béton



Introduction et contexte

- **Acteurs du projet**

- *Getty Conservation Institute* (USA),
- *Historic Buildings and Monuments Commission for England* (UK),
- *Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques* (France).

- **Objectifs**

- **Identifier les critères de durabilité** sur le type de réparation le plus répandu : le « patch repair » (ragréage), dans le contexte des **monuments historiques**.
- Identifier les **spécificités** et les **différences de pratiques** entre la France, l'Angleterre, et les États-Unis.
- Proposer un **guide** de bonnes pratiques commun aux trois pays, relatif aux monuments historiques.

- **Méthode**

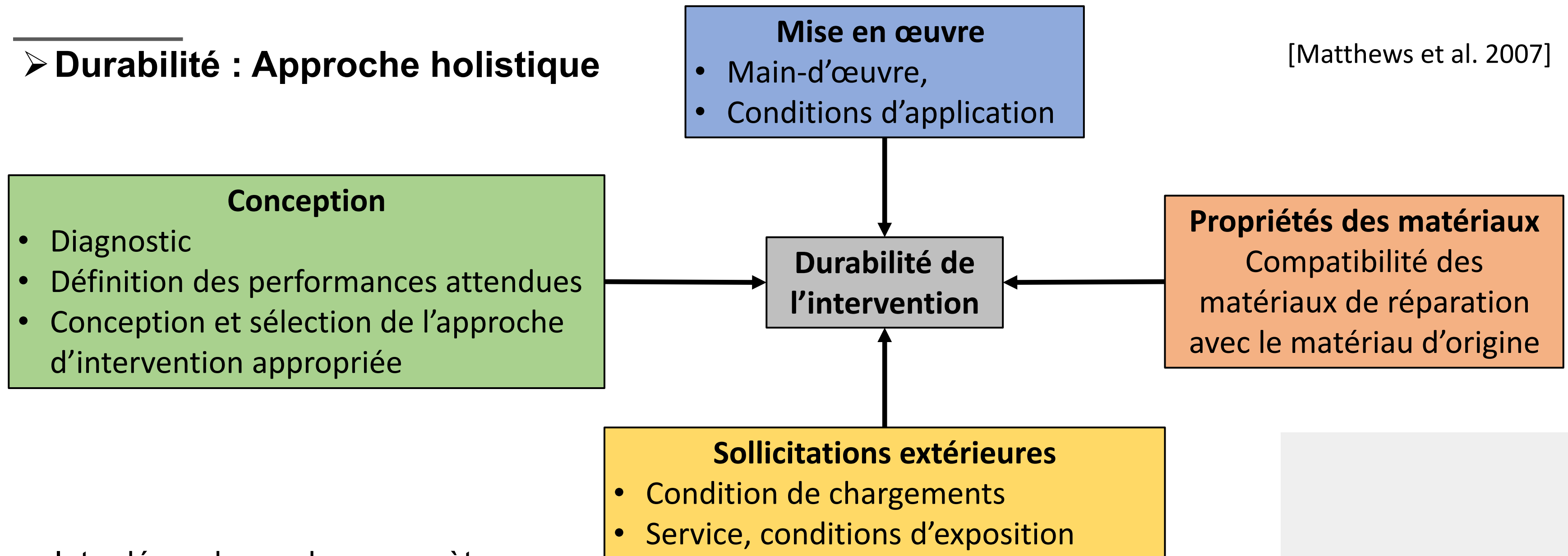
- **Retour d'expérience** de « *patch repairs* » sur différents monuments historiques dans les trois pays
 - ➔ **Évaluation et diagnostic des réparations par « patch »**
- Établir une **bibliographie** et des **protocoles communs**
 - ➔ **Essais *in situ*** (destructifs et non destructifs) et **analyses en laboratoire** sur prélèvements



Méthodologie : approche générale

➤ Durabilité : Approche holistique

[Matthews et al. 2007]



- Interdépendance des paramètres
- Besoin de considérer l'ensemble ➔ Approche holistique [Vaysburd et al. 2006]
- Synergies entre les différents intervenants pour chaque phase : maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, gestionnaires, consultants, ingénieurs, fournisseurs, utilisateurs...

Méthodologie : spécificités du patrimoine

- Les structures patrimoniales en béton nécessitent la **même approche holistique** : Considérations de durabilité similaires à celles des structures en béton contemporaines, avec des préoccupations supplémentaires.
- Spécificité des bétons historiques :
 - Techniques et matériaux expérimentaux, parfois avec de faibles performances à long terme.
 - Les propriétés du béton historique ne sont pas toujours similaires à celles des matériaux contemporains → des difficultés pour atteindre la compatibilité.
 - Respect de la déontologie de conservation/restauration adoptée internationalement par des organisations telles que l'ICOMOS (chartes de Venise, de Nara, document Madrid/New Delhi...).
 - Importance des études historiques et de la documentation :
 - Comprendre le lieu, le contexte et la valeur culturelle du monument.
 - Recueil d'informations supplémentaires sur la composition, les caractéristiques du béton, la façon dont il a été fabriqué...
 - Conservation de l'authenticité en minimisant la perte du matériel original.
 - Minimiser les risques futurs en adoptant la compatibilité, la réversibilité ou la retraitabilité des interventions.

Méthodologie : protocole d'évaluation

Essai / méthode

Norme ou référence rattachée

Observations visuelles, documentation photographique, sondages non destructifs

ACI 201.1R-08 ; Concrete Society Technical Report...

Essai de pulvérisation d'eau (test d'hydrophobicité)

Colorimétrie

EN 15886:2010

Absorption initiale d'eau par éponge de contact

Dureté de surface par scléromètre / rebound hammer

EN 12504-2:2012

Test de dureté

Test de Mohs

Mesure de l'enrobage et localisation des armatures

BS 1881-204:1988

Résistivité électrique (Wenner à quatre pointes)

RILEM TC 154-EMC

Adhérence de réparation / essai d'arrachement pull-off

EN 1542:1999

Cartographie de potentiel

RILEM TC 154-EMC ASTM C876-15,

Résistance de polarisation linéaire / LPR

RILEM TC 154-EMC

Sondages destructifs et prélèvement d'échantillons / carottages

Profondeur de carbonatation à la phénolphthaléine

EN 14630:2006

Angle de contact statique

EN 15802:2009

Absorption capillaire

EN 15801:2009

Masse volumique et porosité accessible à l'eau

NF P 18-459:2010,

Vitesse de propagation des ultrasons

EN 12504-4:2021

Diffraction des rayons X

Microscopie optique et électronique MEB-EDS

Analyse pétrographique sur lames minces

Dosage des chlorures « totaux » et « libres »

EN 14629:2007 ; méthode AFREM

Dosage des sulfates, alcalins

Composition du matériau

Méthode « Calcul Minéraux LCPC » (sous-traité)

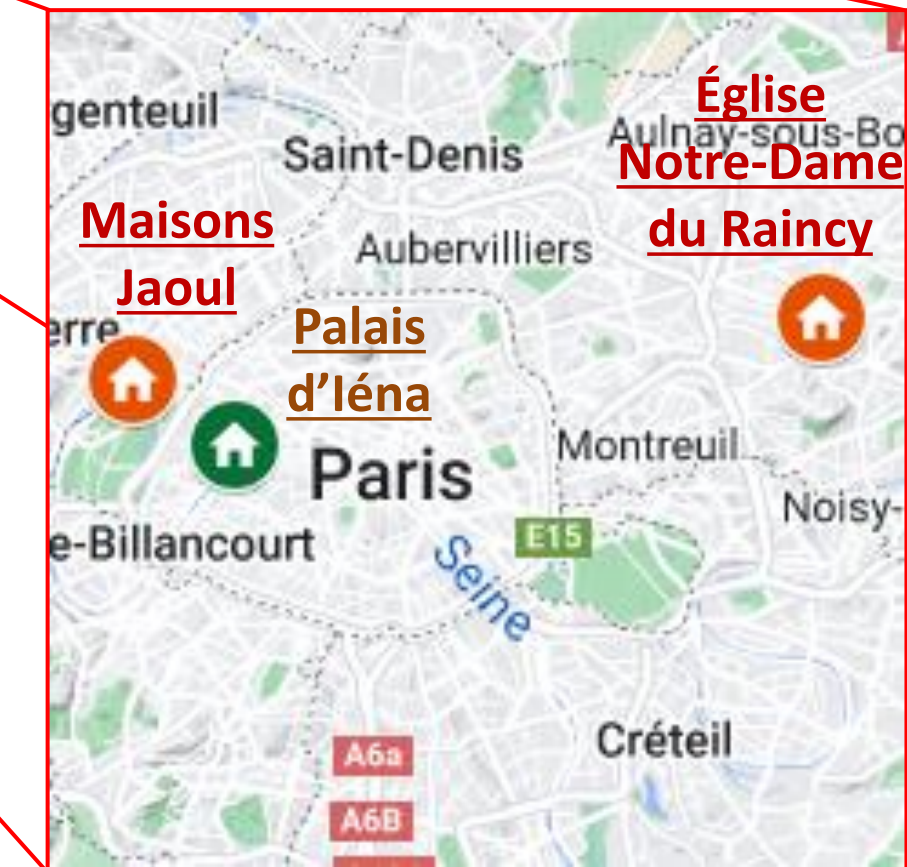
Adaptation des protocoles du génie civil au patrimoine :

- Échantillons plus petits, parfois plus anciens ou altérés (reconstitution du matériau d'origine délicate)
- Réduction du nombre de prélèvements,
- Optimisation des essais par prélèvements...

Les sites français du projet : localisation

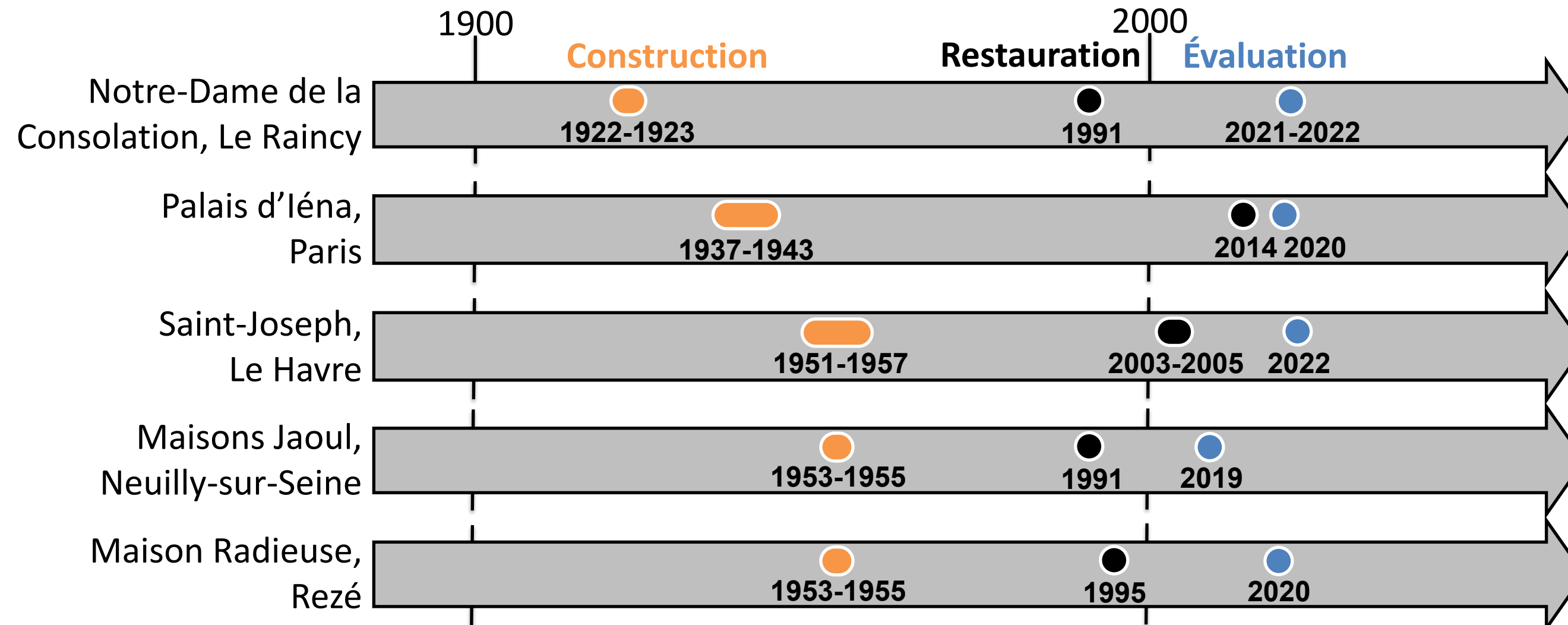


- Église Notre-Dame de la Consolation - Le Raincy
- Palais d'Iéna - Paris
- Église Saint-Joseph - Le Havre
- Maisons Jaoul - Neuilly-sur-Seine
- Maison Radieuse (Unité d'habitation) - Rezé



Chronologies

- Église Notre-Dame de la Consolation - Le Raincy ; Architecte : Auguste Perret
- Palais d'Iéna – Paris ; Architecte : Auguste Perret
- Église Saint-Joseph - Le Havre ; Architecte : Auguste Perret
- Maisons Jaoul - Neuilly-sur-Seine ; Architecte : Le Corbusier
- Maison Radieuse - Rezé ; Architecte : Le Corbusier



Campagnes de restauration évaluées

➤ Église Notre-Dame de la Consolation

- 1991 : Restauration du clocher par Jacques Lavedan (ACMH).
Cause principale de détérioration
→ *Corrosion des armatures liée à la carbonatation du béton*

➤ Palais d'Iéna

- 2014-2016 : Restauration des façades par Arnaud de Saint Jouan (ACMH).
Cause principale de détérioration
→ *Corrosion des armatures liée à la carbonatation du béton*

➤ Église Saint-Joseph du Havre

- 2003-2005 : Restauration des façades par François Mirc (Architecte du patrimoine).
Cause principale de détérioration
→ *Corrosion des armatures liée à la carbonatation du béton et à la contamination par les chlorures*

➤ Maisons Jaoul

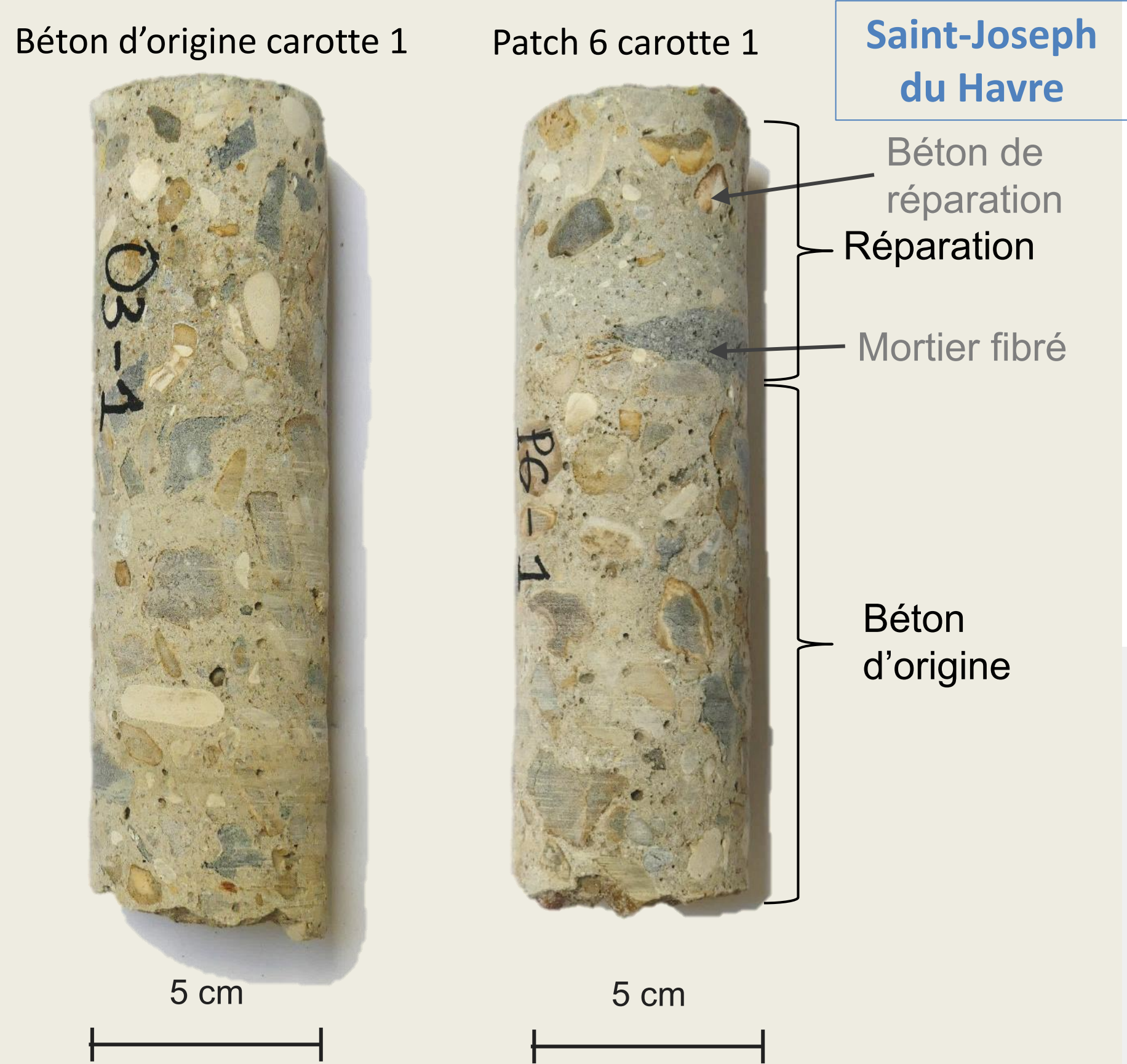
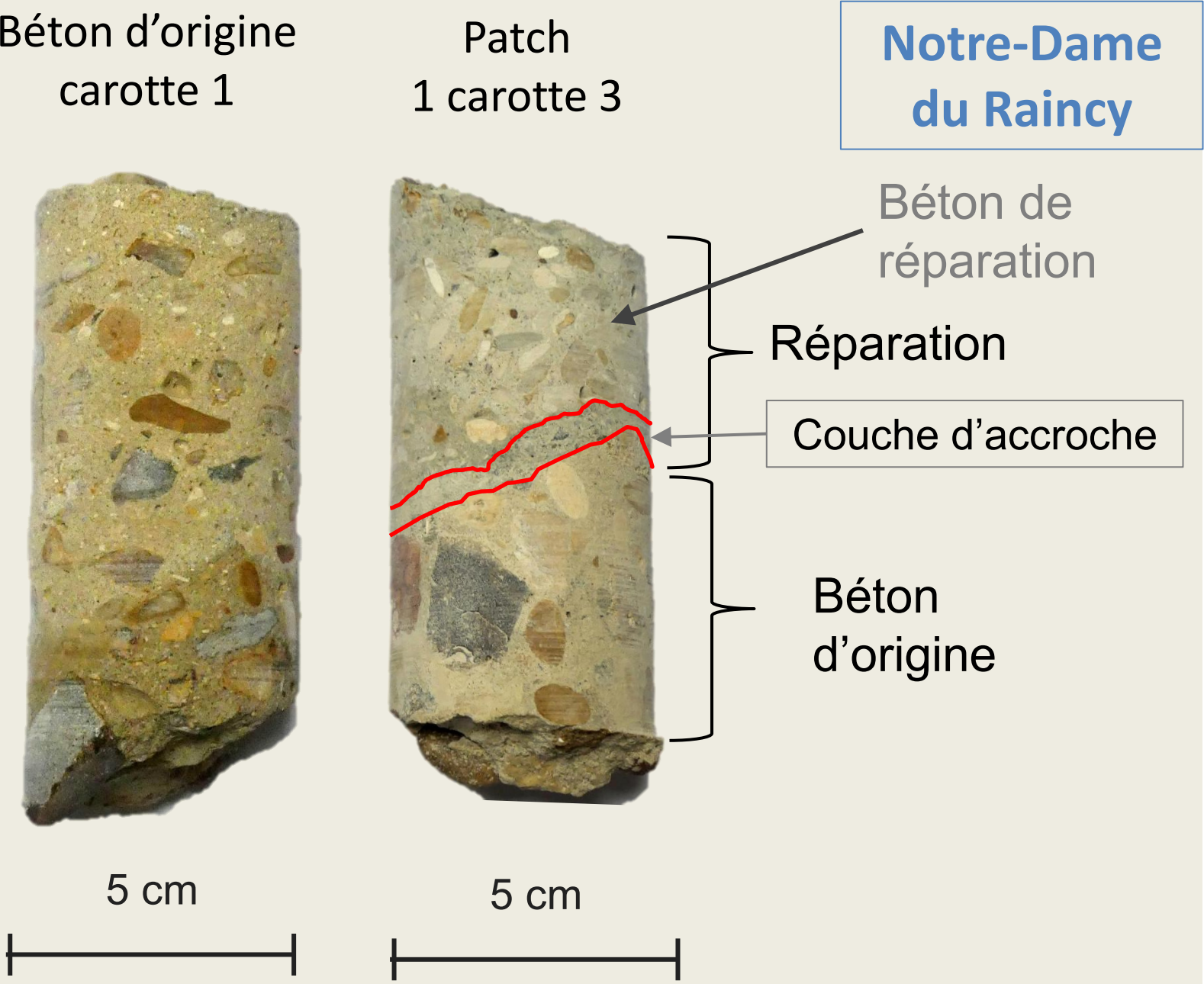
- 1991 : Restauration générale par Jacques Michel.
Cause principale de détérioration
→ *Corrosion des armatures liée à la carbonatation du béton*

➤ Maison Radieuse de Rezé

- 1995-1997: voiles de béton, terrasse, claustras des loggias, brise-soleil, pilotis par une commission architecturale
Cause principale de détérioration
→ *Corrosion des armatures liée à la carbonatation du béton*

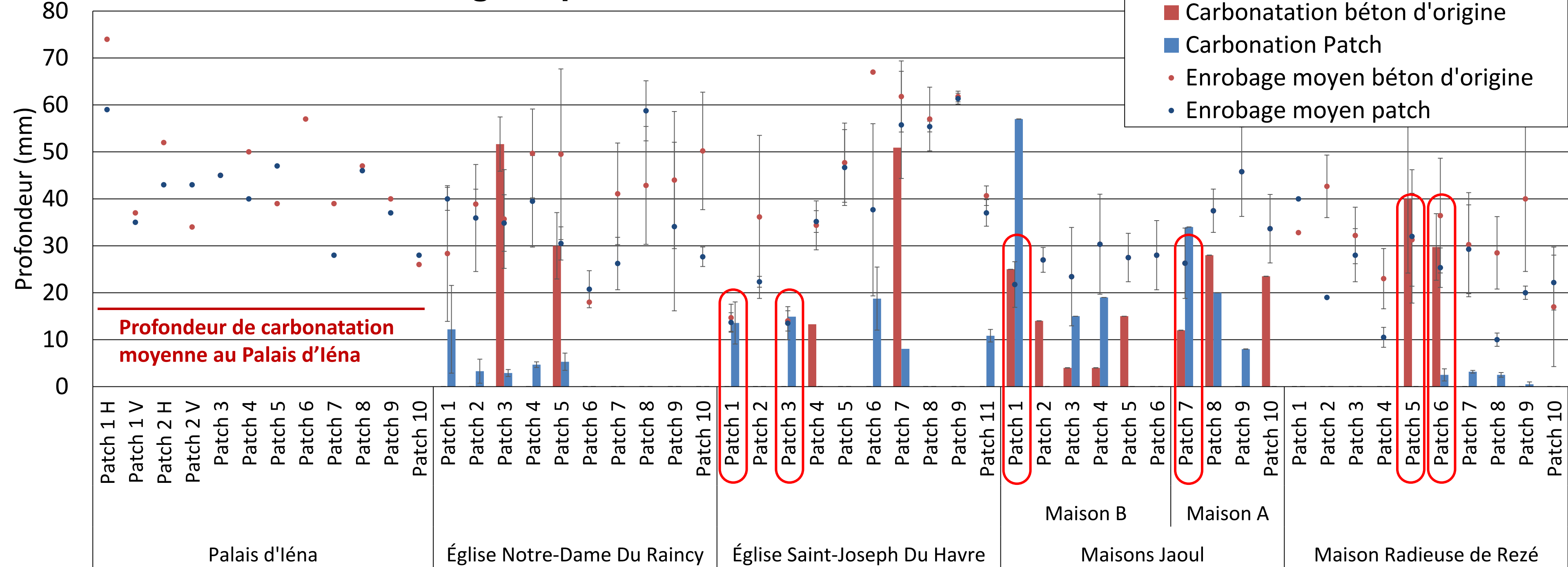
Résultats

➤ Prélèvements



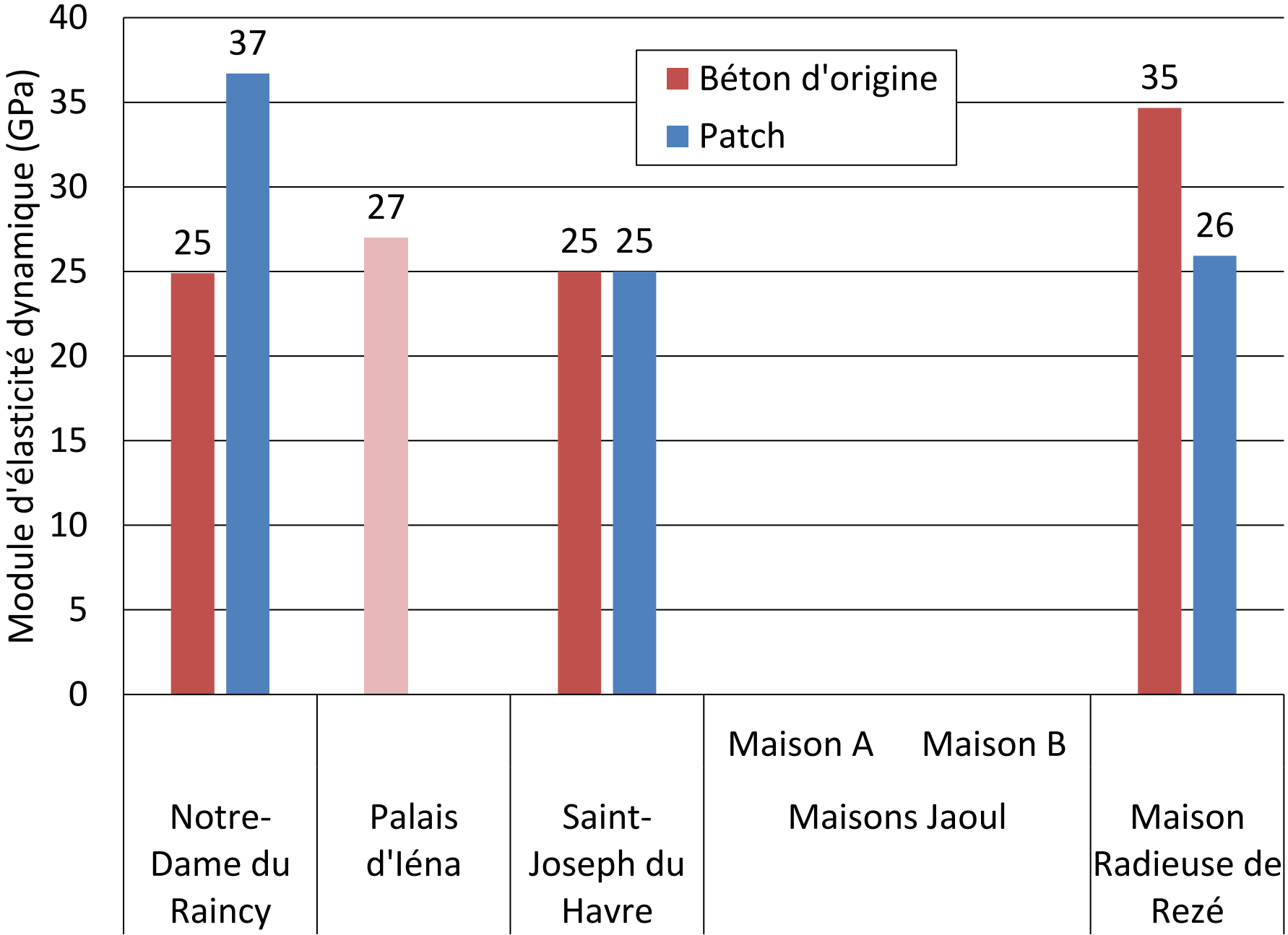
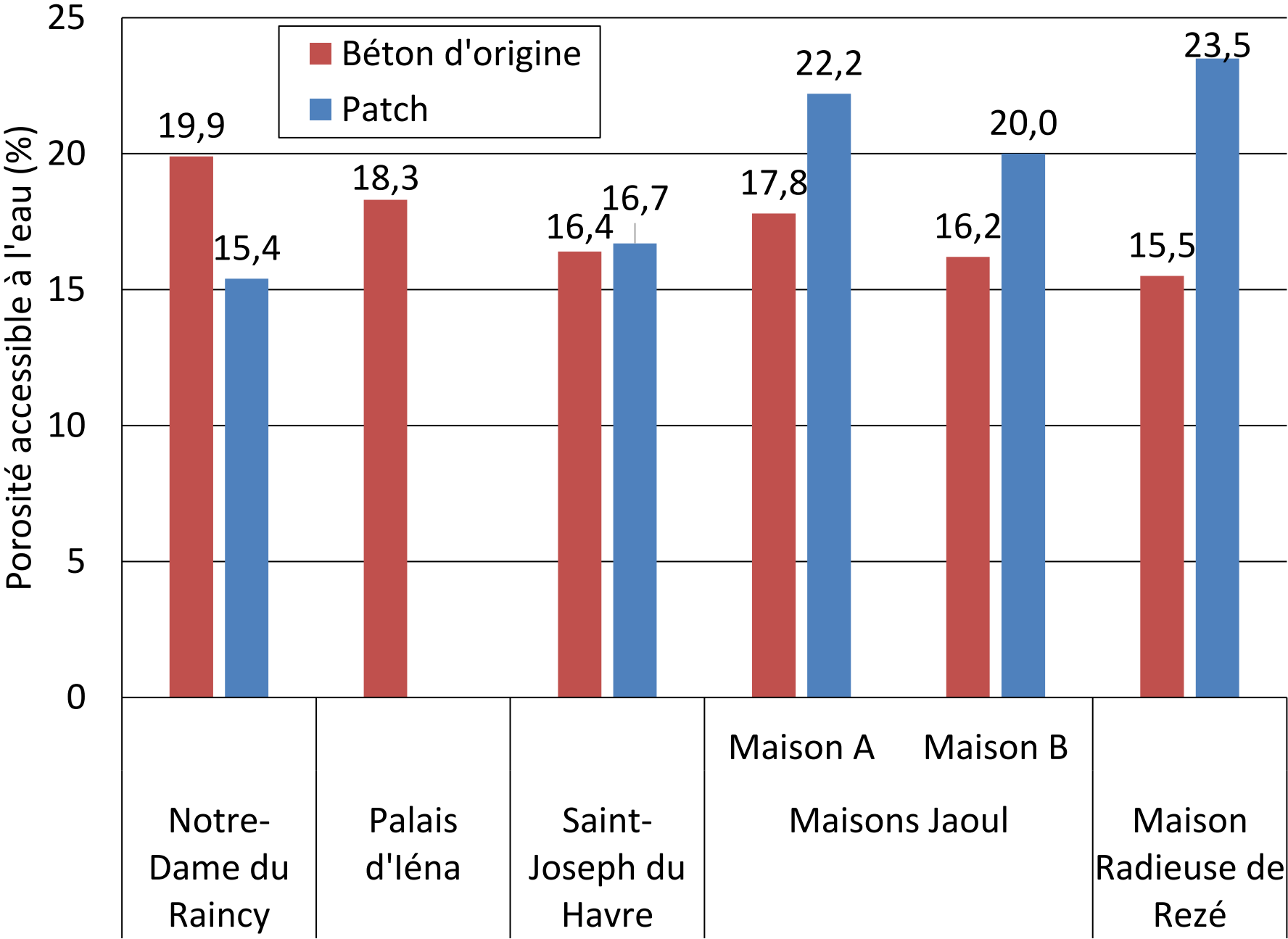
Résultats

➤ Profondeur d'enrobage et profondeur de carbonatation



Résultats

➤ Caractérisations des matériaux, exemples porosité et rigidité



Résultats : Synthèse

➤ Notre Dame du Raincy

Restauration de 1991

- **Performance technique** : plutôt bonne, mais des altérations constatées dans le béton d'origine adjacent aux réparations
- **Performance esthétique** : Réparations visibles, même pour un œil non averti.
- Une grande partie des réparations toujours en place après **30 ans**.



Résultats : Synthèse

➤ Maison Jaoul

Restauration de 1991

- **Performance technique** : mauvaise, décollements, fissures, reprise de la corrosion, épaufrures dans les réparations, 28% des réparations refaites. Mais le matériau d'origine était relativement épargné.
- **Performance esthétique** : bonne, réparation parfois difficilement visible.
- Réparations en grande partie reprises après **28 ans**.



Résultats : Synthèse

➤ Maison Radieuse de Rezé Restauration de 1995

- **Performance technique** : mauvaise, reprise de la corrosion, fissures, épaufrures dans les réparations et les zones adjacentes.
- **Performance esthétique** : très mauvaise, couleur et texture différentes.
- Réparations à reprendre, après **25 ans**.

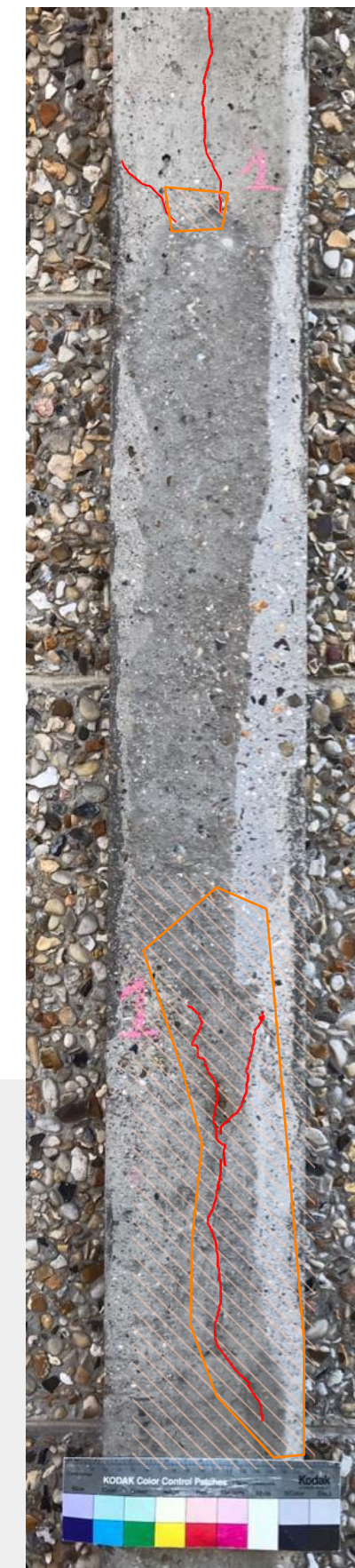
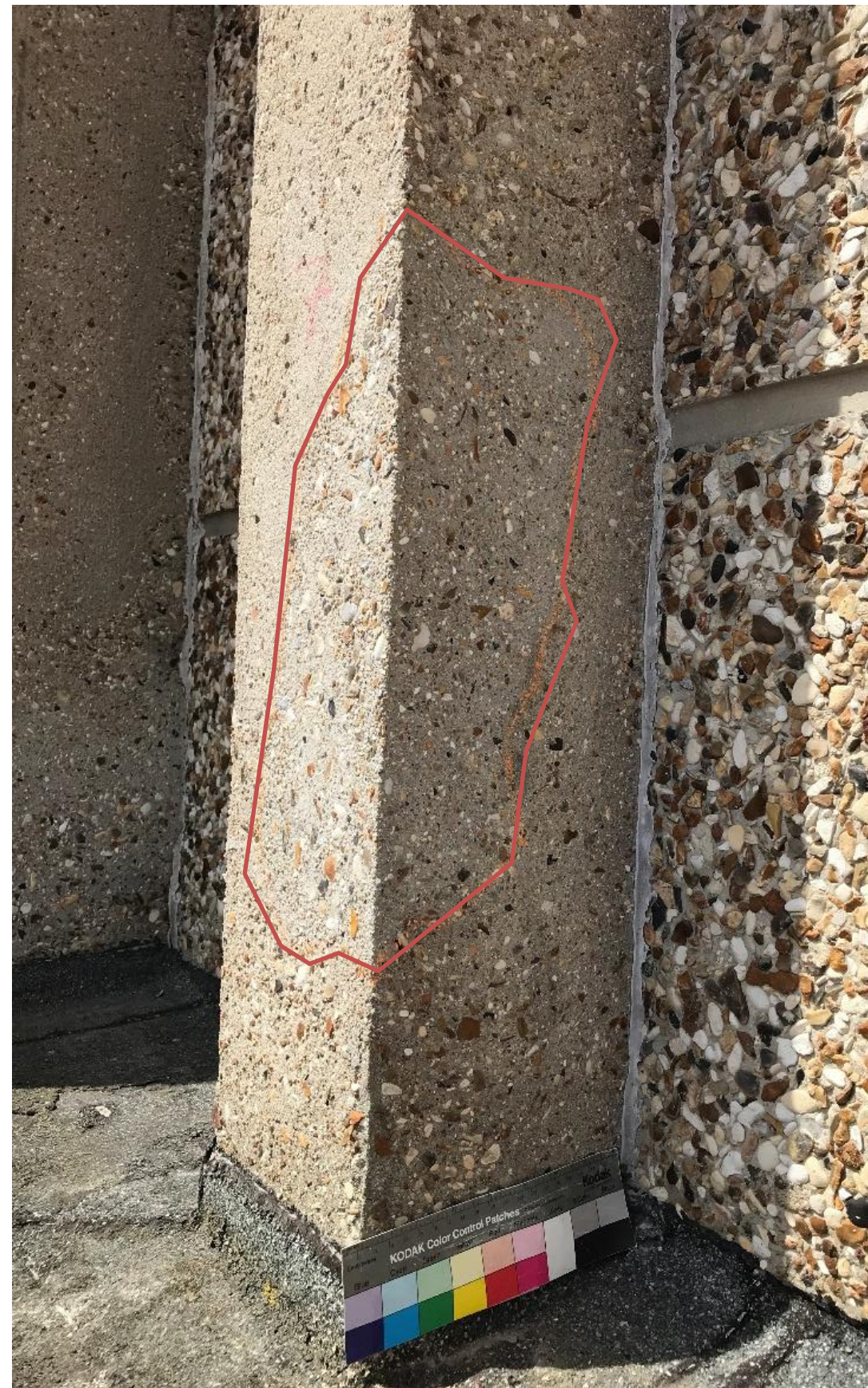


Résultats : Synthèse

➤ Saint-Joseph du Havre

Restauration de 2003-2005

- **Performance technique** : très bonne, à l'exception de quelques points avec un enrobage des armatures faible.
- **Performance esthétique** : très bonne, réparations difficiles à déceler.
- Réparations en très bon état après **20 ans**.

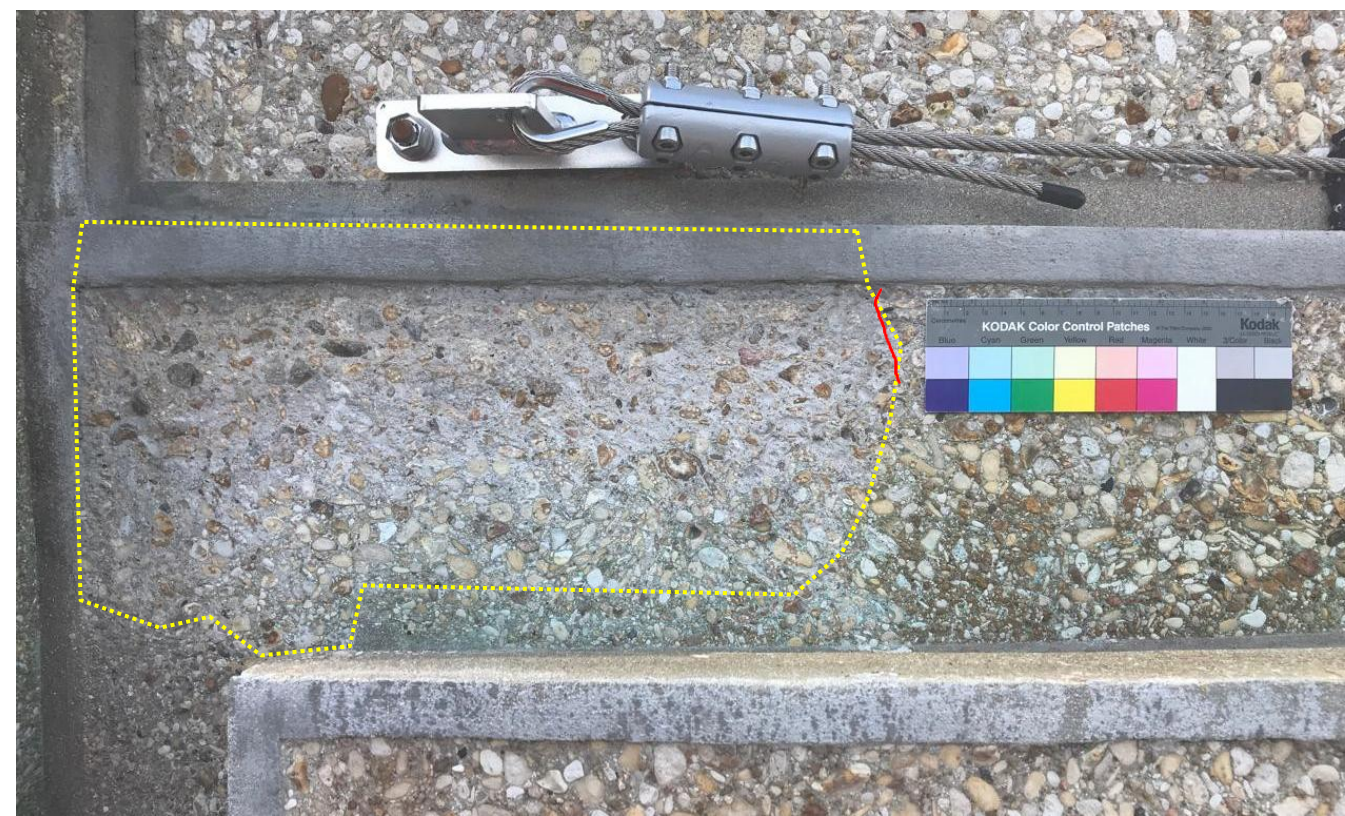


Résultats : Synthèse

➤ Palais d'Iéna

Restauration de 2014-2016

- **Performance technique** : très bonne, peu d'altérations visibles
- **Performance esthétique** : très bonne, difficiles à décerner.
- Réparations en très bon état après **6 ans**.



Conclusion du projet PEPS

– Importance du diagnostic et de l'étude préalable :

- Identifier la valeur culturelle du monument.
- Connaitre les matériaux et le système constructif.
- Comprendre les pathologies du monument dans son environnement.

– Approche de la restauration : l'art du compromis

- Respect des principes de conservation :
 - Préservation de l'authenticité.
 - Minimiser les pertes de la matière d'origine.
 - Réversibilité/re-traitabilité.
- Respect des règles de l'art pour une réparation du béton armé :
 - Purge, nettoyage, préparation du substrat.
 - Choix de matériaux de réparation compatibles.
 - Mise en œuvre.

– Importance du suivi de la qualité d'exécution.

– Réparations par patch conçues et réalisées dans les règles de l'art :

- Bonne durabilité au-delà des 10 ans (CONREPNET), supérieure à 20 ans (PEPS).
- Bonne compatibilité technique et esthétique.

– Amélioration constante des techniques, du savoir-faire et des connaissances.

Colloque : restitution du projet PEPS et au-delà

Colloque
11-12 janvier
2027
Paris



**Les bétons du patrimoine face à la
corrosion des armatures**



11 et 12 janvier 2027

**INHA 2 rue Vivienne,
Paris**

**Auditorium
Jacqueline Lichtenstein**

Colloque : restitution du projet PEPS et au-delà

Programme

- 11 janvier 2026
 - **Session 1 : La réparation par « *patch* »**
 - Réparations par « *patch* » : définitions et présentation du projet PEPS
 - Résultats du projet PEPS
 - Réparations par « *patch* » : point de vue des acteurs de la restauration/réparation en France
 - **Session 2 : Au-delà des réparations traditionnelles : la protection cathodique**
 - Introduction sur la technique
 - Cas d'étude de la PCCI sur monuments historiques
 - Retour d'expérience et apport des ouvrages d'art
 - **Session 3 : Table ronde - les défis du futur**
 - Évolution permanente des techniques,
 - Évolution des approches de conservation/restauration,
 - Nouvelles contraintes et exigences réglementaires,
 - Enjeux climatiques et sociétaux
- 12 janvier 2026 : Visites de sites



11 et 12 janvier 2027
INHA 2 rue Vivienne, Paris
Auditorium
Jacqueline Lichtenstein



Merci

