

Bienvenue au Workshop #3

*Session 3 : Diagnostic
et Retour d'Expérience
sur ouvrages*

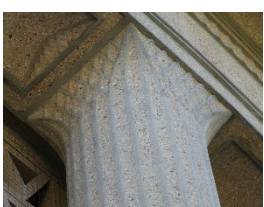
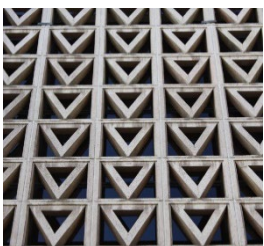
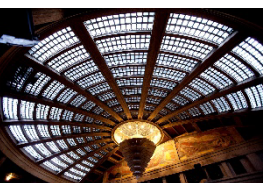
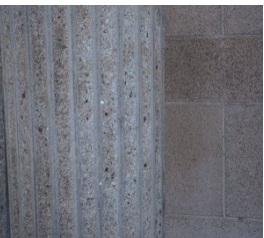
22 Mai 2026

**Œuvre iconique d'Auguste Perret à
Paris : le palais de l'éna**

***Un remarquable exemple de durabilité
de la construction et de la restauration***

Elisabeth Marie-Victoire, Myriam Bouichou et Jean Ducasse-Lapeyrousse





Construction

GIS DECADES - 3^e workshop

E. Marie-Victoire

Construction en 4 étapes

- Etape 1** : de **1937 à 1938**, musée des travaux publics conçu et construit par Perret.
- Etape 2** : de **1939-1947**, retard dans la construction de la rotonde du fait de la 2nde GM. Aile conçue et construite par Perret.
- Etape 3** : de **1960 et 1962**, 3e aile conçue par Paul Vimond (étudiant de Perret).
- Etape 4** : 4e aile (design de Perret jamais achevée)
→ Design et construction par Gilles Bouchez en **1995**.

→ **Inscription MH en 1965.**

→ **Classement MH des éléments Perret en 1993.**



© Google Earth

Janvier 1937- début 1938

Aile Léna : Musée des travaux publics

Juin 1938 - 1941

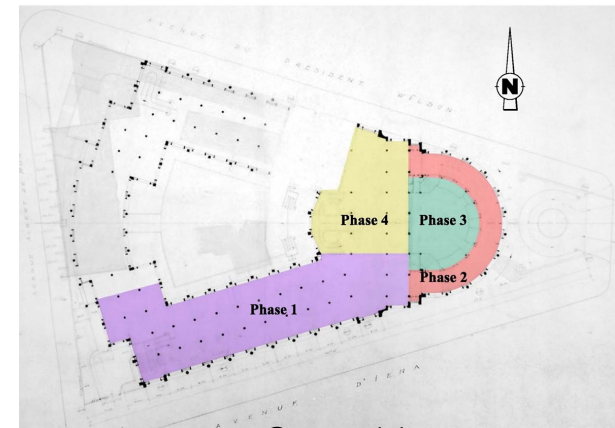
Salle de Conférences

Mai-Juin 1938

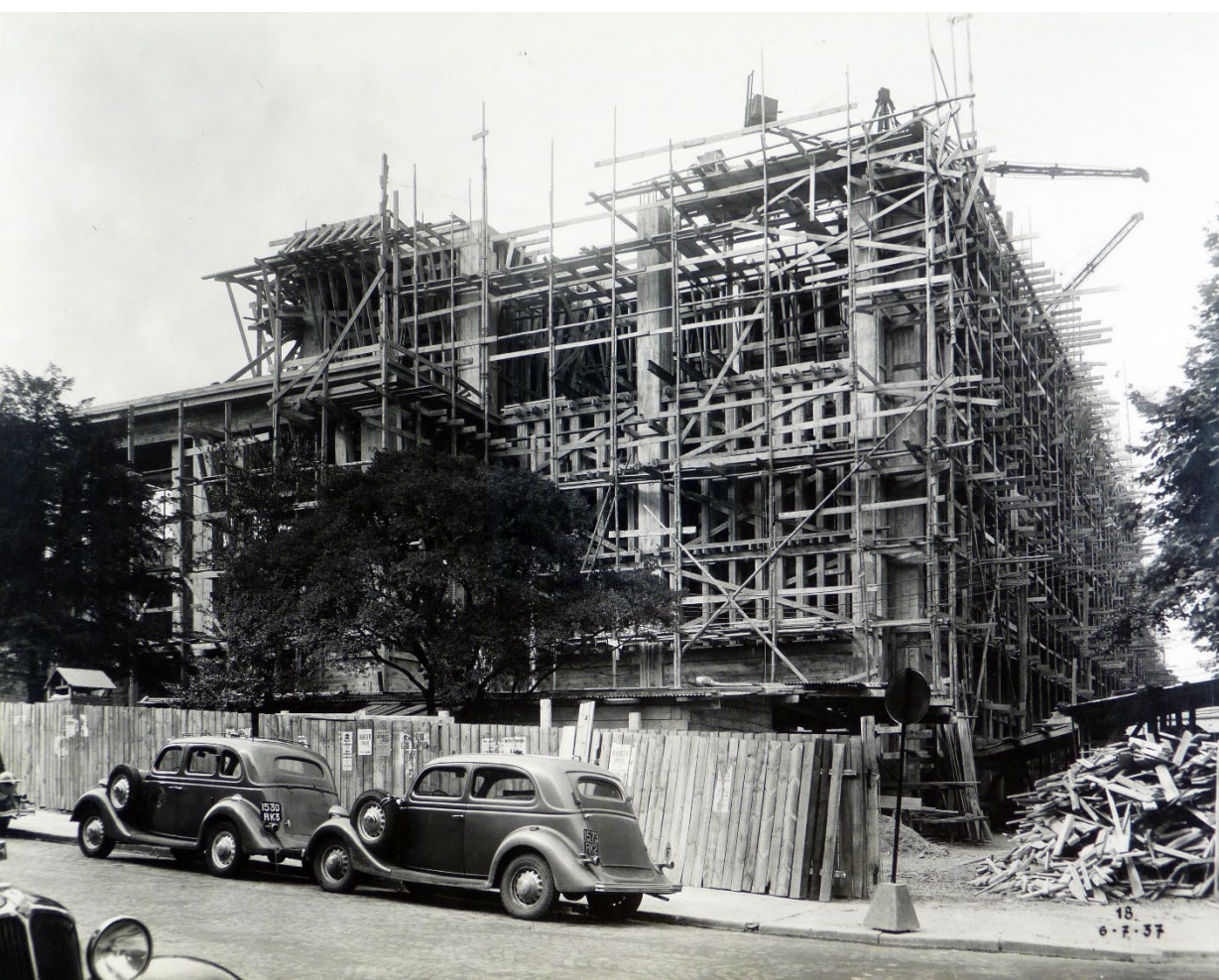
Portique circulaire

1942-1947

Salle des pas perdus



© Arnaud de Saint-Jouan



© CESE

© CESE



Janvier 1937- début 1938

Aile Iéna : Musée des travaux publics

Juin 1938 - 1941

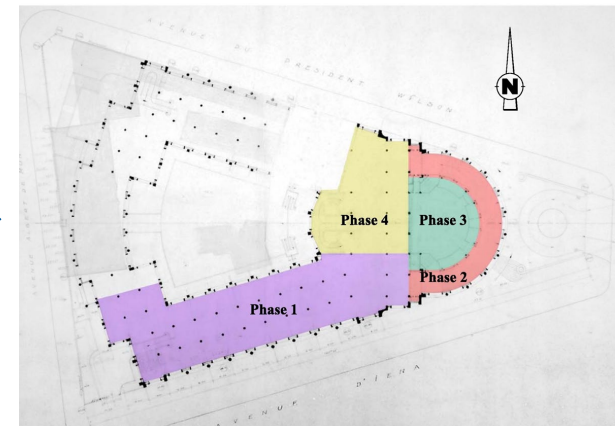
Salle de Conférences

Mai-Juin 1938

Portique circulaire

1942-1947

Salle des pas perdus



© Arnaud de Saint-Jouan



© CESE

© CESE



Janvier 1937- début 1938

Aile Iéna : Musée des travaux publics

Juin 1938 - 1941

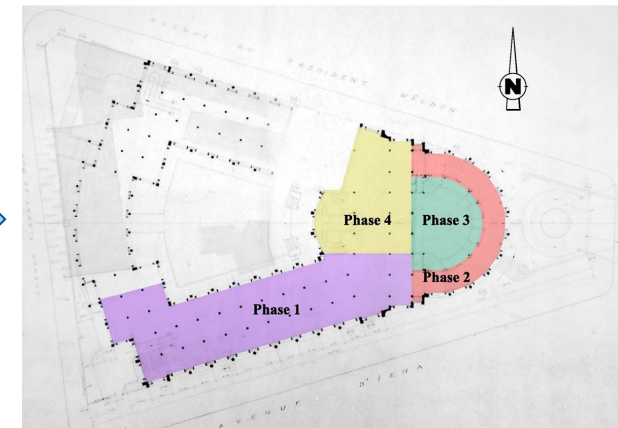
Salle de Conférences

Mai-Juin 1938

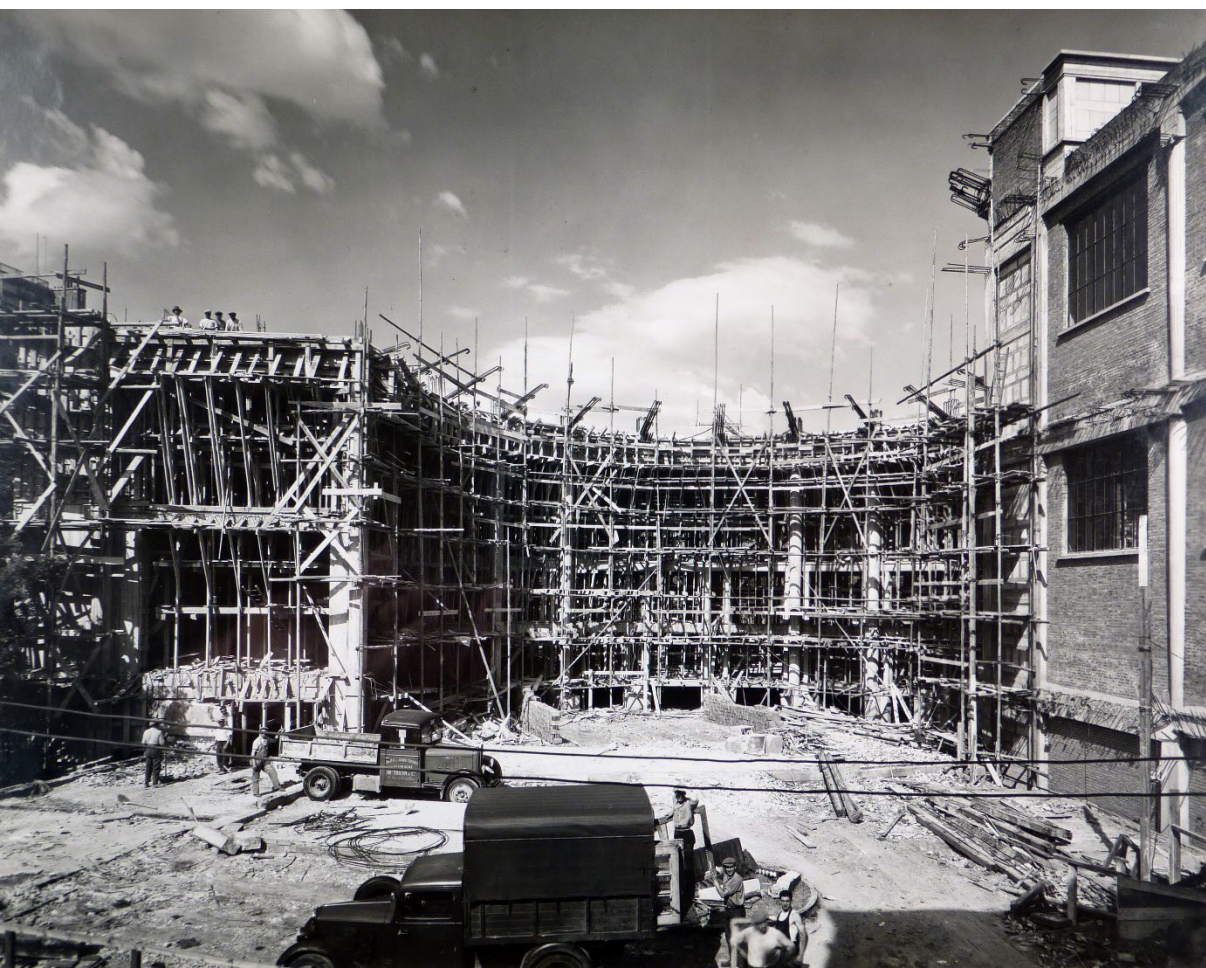
Portique circulaire

1942-1947

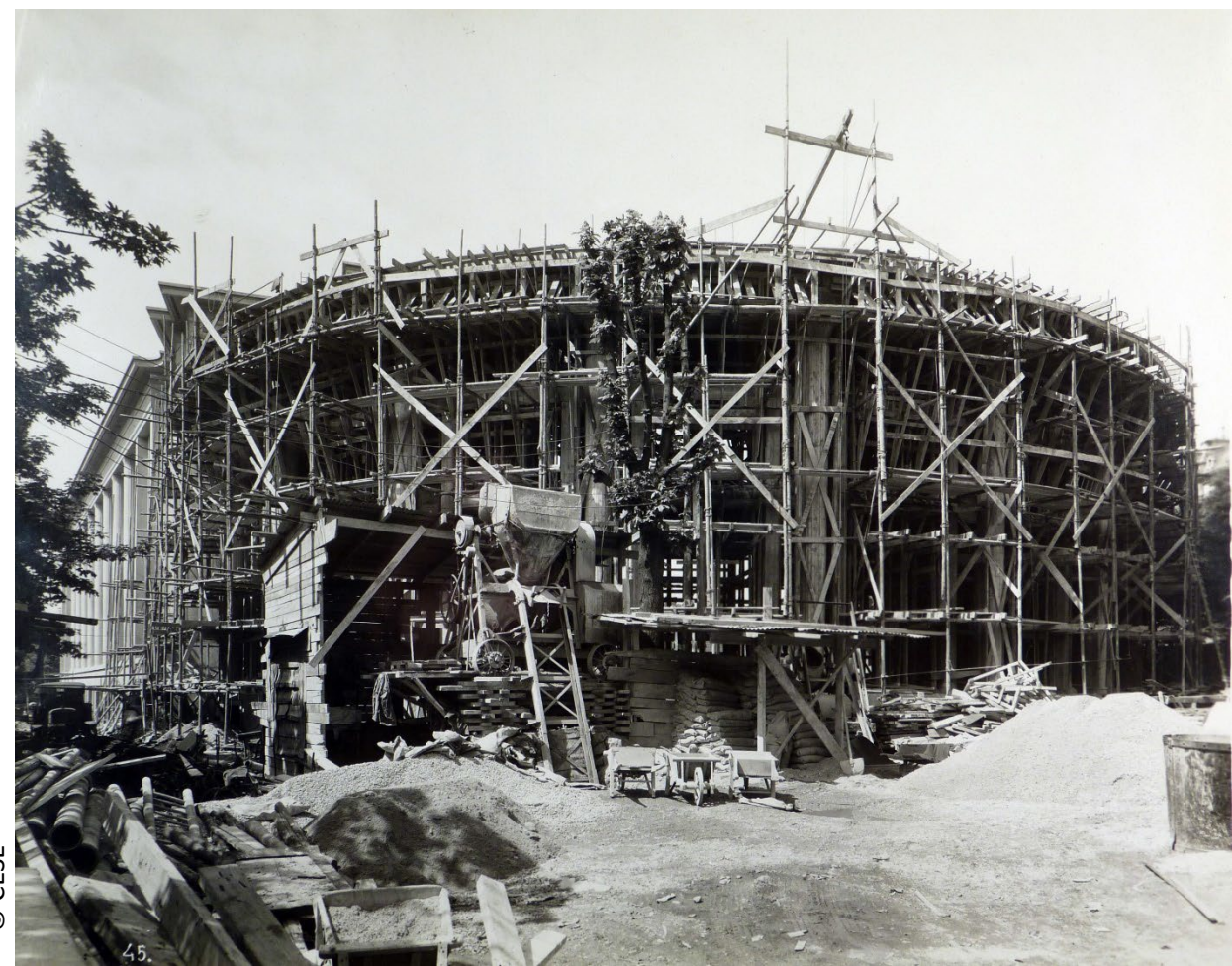
Salle des pas perdus



© Arnaud de Saint-Jouan



© CESE



© CESE

Janvier 1937- début 1938

Aile Iéna : Musée des travaux publics

Juin 1938 - 1941

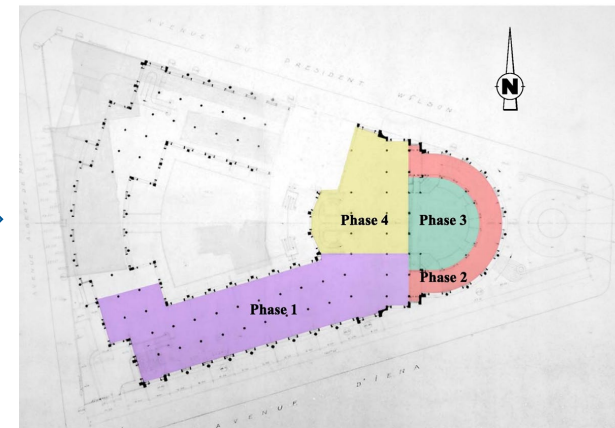
Salle de Conférences

Mai-Juin 1938

Portique circulaire

1942-1947

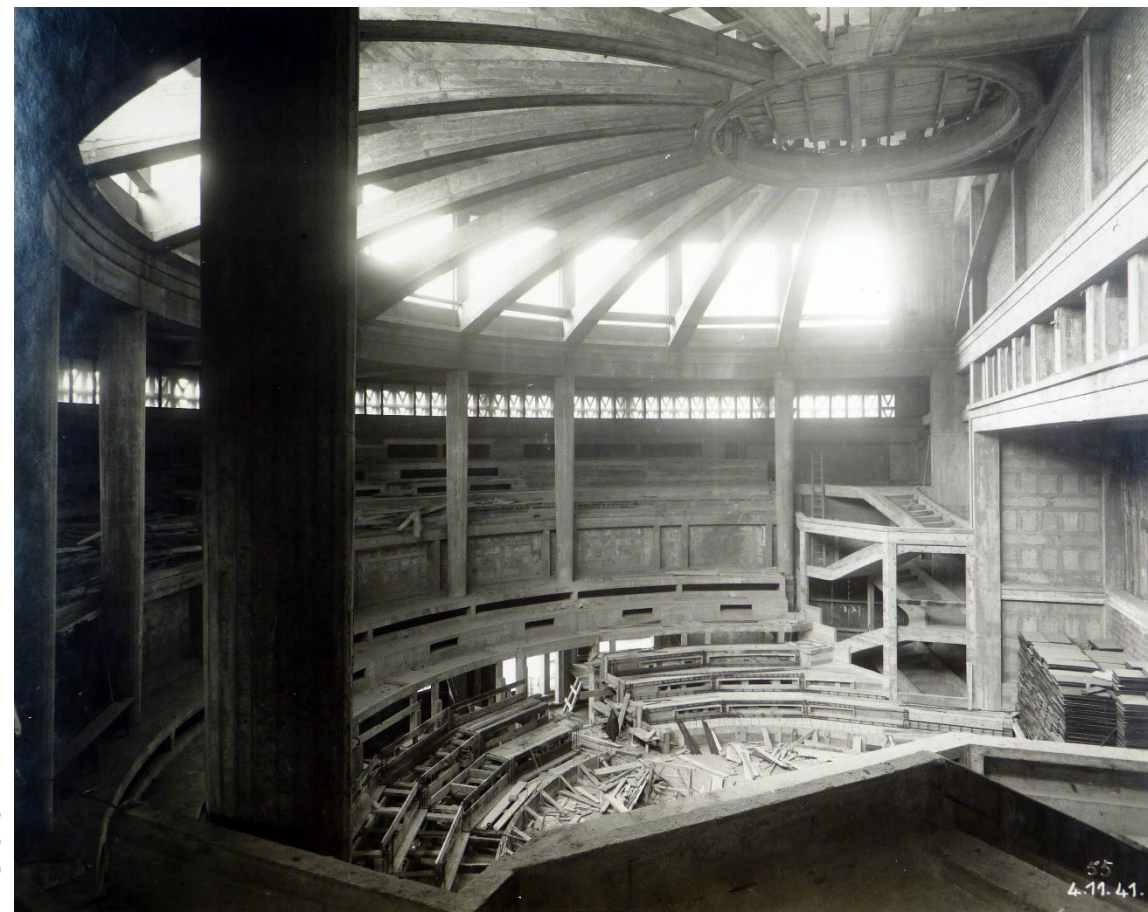
Salle des pas perdus



© Arnaud de Saint-Jouan



© CESE



© CESE

Janvier 1937- début 1938

Aile Léna : Musée des travaux
publics

Juin 1938 - 1941

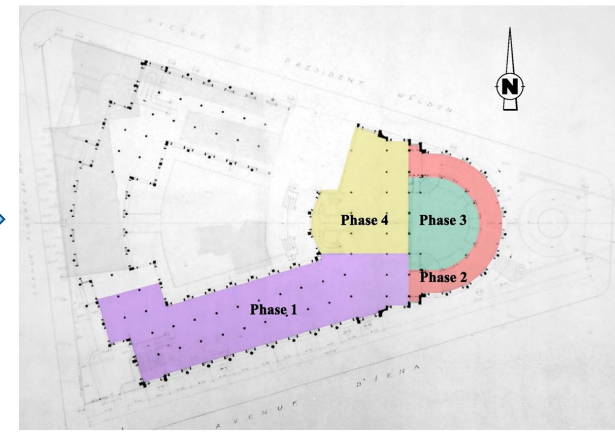
Salle de
Conférences

Mai-Juin 1938

Portique circulaire

1942-1947

Salle des pas
perdus



© Arnaud de Saint-Jouan



© CESE



© CESE

Principe constructif

Une double structure

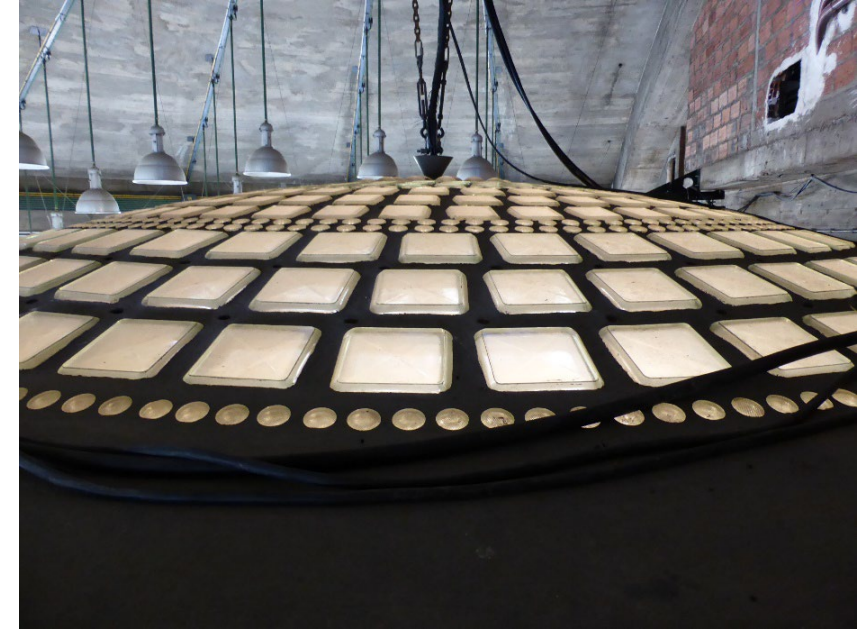
- ➔ En façade sur rue une première ossature portant l'architrave supportant la toiture : colonnes de treize mètres de hauteur coulées d'un seul jet et avec 24 facettes et des chapiteaux en pyramide renversée.
- ➔ En intérieur, une seconde structure portant les planchers intermédiaires, abritant une salle hypostyle (18m de largeur, 60m de longueur), un hémicycle (233 sièges) et un escalier monumental à double révolution.
- ➔ Les deux sont disjointes et peuvent se dilater librement.



Principe constructif

Une double structure

➔ Sur le même principe, double ossature pour la rotonde



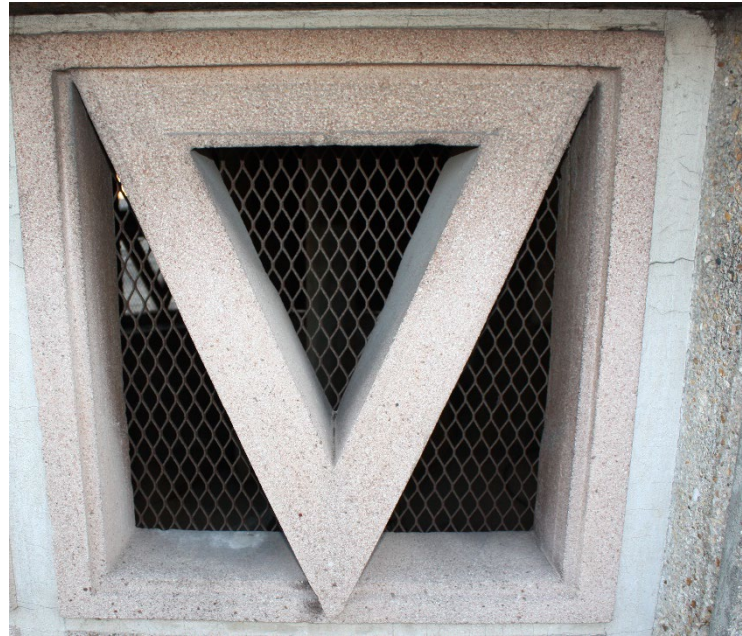
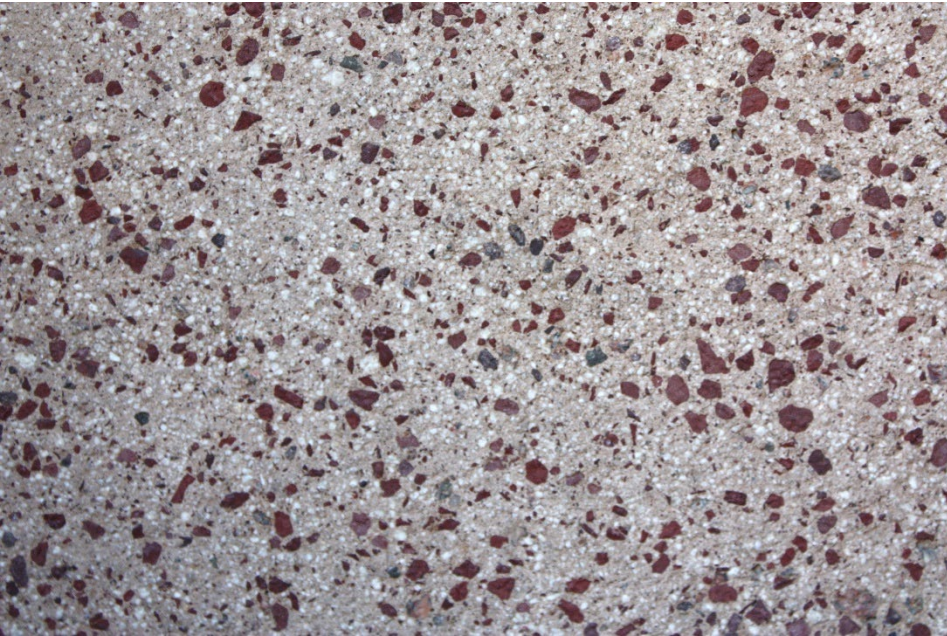
© CESE



Matériaux et finitions

Une richesse de couleurs, de textures et de décors

- Teintes rose à ocre pour les parpaings de remplissage et les claustras, gris pour les bétons de structure.
- Sélection des granulats en fonction de leur couleur et de leur texture : porphyre vert, marbre rose, grès des Vosges ou pierre de Bourgogne pour les remplissages; granulats de Seine pour la structure primaire, silex pour les colonnes.

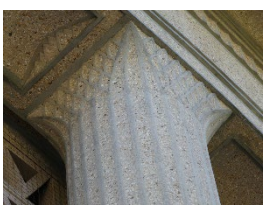
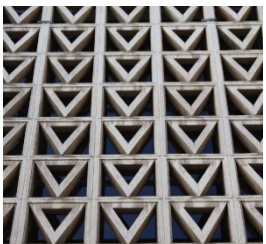
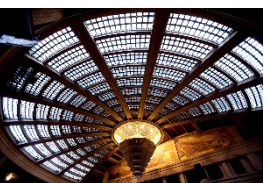
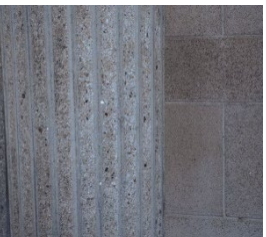


Matériaux et finitions

Une richesse de couleurs, de textures et de décors

- Finitions lisses, layées bouchardées pour les bétons de structure
- Colonnes tronconiques et cannelées
- Décors végétaux des chapiteaux





Diagnostic préalable à la restauration (éléments Perret) *2012-2014*

GIS DECADES - 3^e workshop

E. Marie-Victoire

Restaurations antérieures

- 2000 : Nettoyage des façades ⇒ Projection d'abrasifs fins en voie sèche (cabine)
- 2009 : Purge, passivation des armatures et réparations au mortier gris

Altérations visibles

Aile Iéna (1937-1938)

- Qualité initiale du béton assez bonne
- Quelques nids de cailloux et fuites de laitance.
- Quelques fissures et épaufrures (façade sur jardin), salissures noires.

Travées 19.S 20.S 21.S

PARIS - 16ème arrondissement
PALAIS D'IÉNA - CESE

Avenue d'Iéna : élévations et plan
Echelle 1/100 - Planche A3

Repérage des désordres

A. de Saint-Jouan
Architecte en chef des monuments historiques
Nicolas Horiot collaborateur
Février 2014

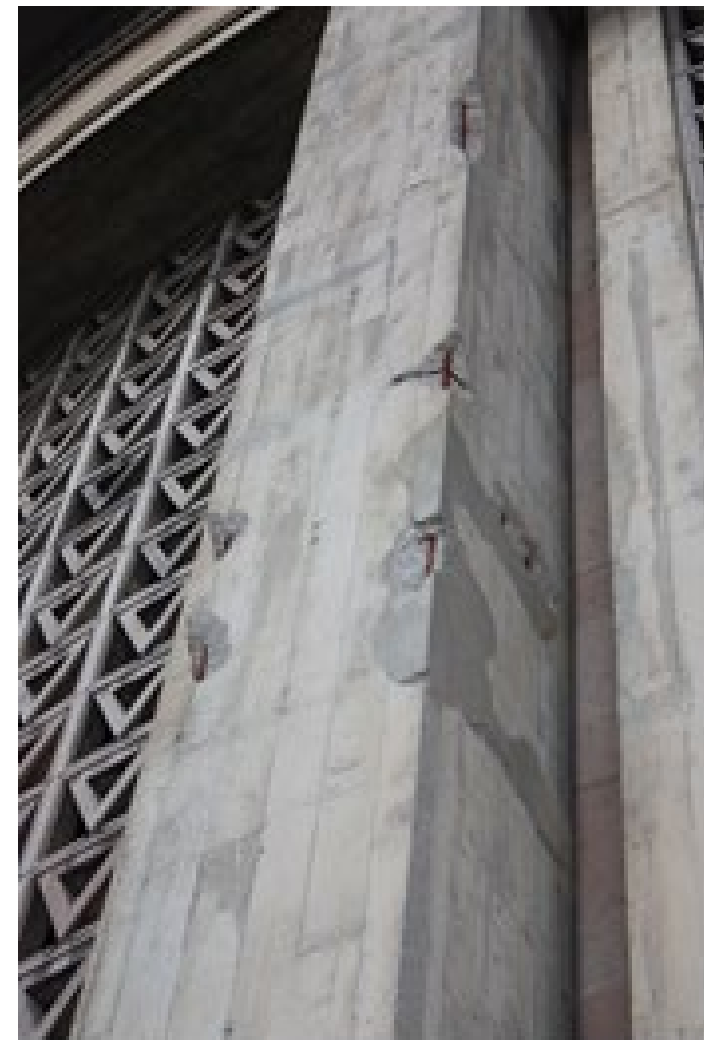
- 1 : reprise des sondages et tests 2013-2014
- 2 : ragréage ancien encore en place
- ▨ 3 : altération superficielle - acier invisible
- ∧ 4 : altération superficielle
acier de couture apparent
- 5 : altération profonde
acier d'armature apparent
- ~ 6 : fissure
- | 7 : dégradation de liseret
- 8 : coulures
- 9 : graffitis
- ▶ Repérage élévation colonne ou pilier



Altérations visibles

Rotonde (1942-1947)

- Un peu plus de défauts et d'altérations
- Nids de cailloux et fuites de laitance
- Fissures et nombreuses épaufrures (façade sur jardin), salissures noires.



Bilan du diagnostic

2 qualités de bétons et d'armatures

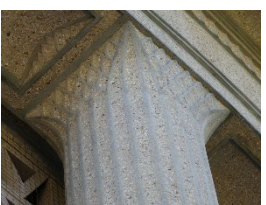
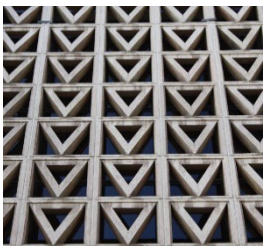
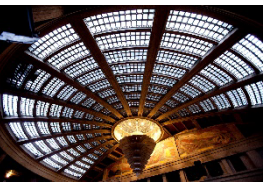
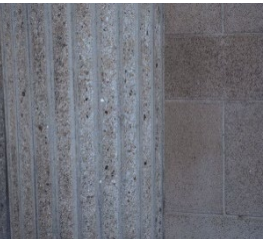
- **Aile Iéna, Portique circulaire et salle de conférence**
 - Béton assez homogène, $E/C = 0.6$, CEMII/B-S, teneur en liant 414 kg/m^3 , porosité moyenne 12.6%, résistance en compression moyenne 25 MPa,
 - Acier doux (contenant entre 0.08% et 0.16% de carbone)
- **Cour intérieure**
 - $E/C = 0.72$, CEMII/B-S, teneur en liant 483 kg/m^3 , porosité moyenne 18.1%, résistance en compression moyenne 19 MPa
 - Acier mi-doux (contenant 0.42% de carbone)

Bilan du diagnostic

- **Carbonatation limitée** (0 à 7cm, **2.5cm** en moyenne)
- Localement **faibles enrobages** (1 à 9cm, **3.5 cm** en moyenne), particulièrement sur les corniches et poutres
- Légère pollution exogène en chlorures (0.03 à 0.57 % vs ciment) et notable **pollution exogène en sulfates** (2 à 11% vs ciment)



- Globalement béton de bonne qualité
- Pollution urbaine (croûtes noires, sulfates et chlorures)
- Corrosion induite par la carbonatation du béton



Restauration des éléments Perret

2014-2016

- ACMH : Arnaud de Saint Jouan (ACMH).
- Entreprises : Pierrenoël en collaboration avec Freyssinet

Stratégie de conservation-restauration

Salissures noires → Essais comparatifs de techniques de nettoyage

1. **Projection de calcite** : 40-300 μ m, 2.5 bars, diamètre de buse = 8mm
2. **Eau chaude** : 120 bars, 95°C (350/700L/h)
3. **Projection d'Archifine n°7[©]** : 30-150 μ m, diamètre de buse = 8mm, 2.5 bars
4. **Latex + rinçage à l'eau**
5. **Compresse d'argile + rinçage à l'eau**
6. **Gel neutre + rinçage à l'eau**



Stratégie de conservation-restauration

Corrosion induite par la carbonatation → Mise au point du protocole

- Finition bouchardée similaire à l'original → Débat déontologique → Béton/Mortier de réparation
- Pollution sulfatée → Béton de réparation spécialement formulé avec liant résistant aux sulfates et granulats identiques à l'original
- Nombreux essais de mise au point formulation/finition



Stratégie de conservation-restauration

Corrosion induite par la carbonatation → Protocole final

- Nettoyage à l'eau chaude basse pression (85°, 2.5 bars), et ponctuellement projection d'abrasifs fins en voie sèche.
- Purge des zones épaufrées, dégagement derrière les aciers corrodés et de 5 à 10 cm de chaque côté des armatures.
- Nettoyage des aciers, remplacement si nécessaire.
- Application d'une première couche de pâte de ciment sur le substrat et autour des aciers.
- Coffrage placé à 2 cm en saillie de la surface en béton d'origine → Après 30 jours de prise, bouchardage pour atteindre le niveau de la surface d'origine, puis cure.
- Badigeon ocre sur certaines parties de la cour intérieure (données d'archives et analyses).
- Pas de traitement additionnel (ni hydrofuges, ni d'inhibiteur de corrosion)



Stratégie de conservation-restauration

Corrosion induite par la carbonatation → Protocole final



Stratégie de conservation-restauration

Corrosion induite par la carbonatation → Protocole final

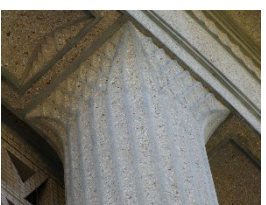
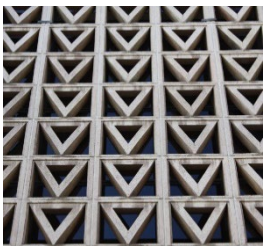
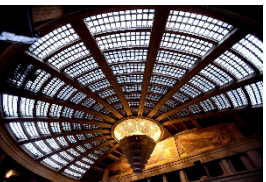
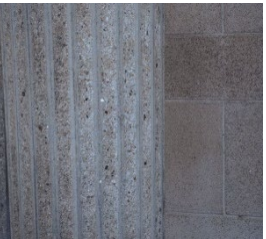


Stratégie de conservation-restauration

Corrosion induite par la carbonatation → Protocole final



→ Patine base ciment + ocres + latex



Durabilité de la restauration

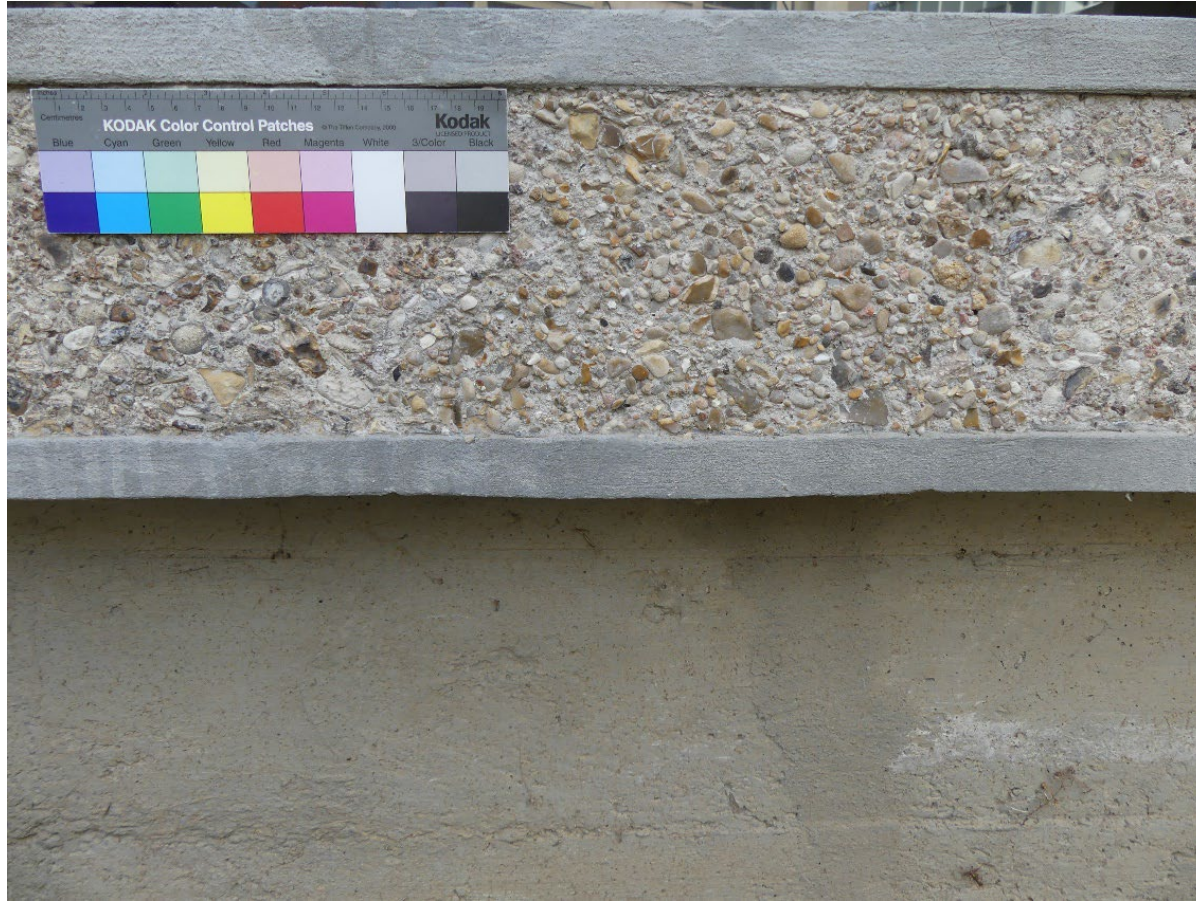
Evaluation PEPS en 2020

GIS DECADES - 3^e workshop

E. Marie-Victoire

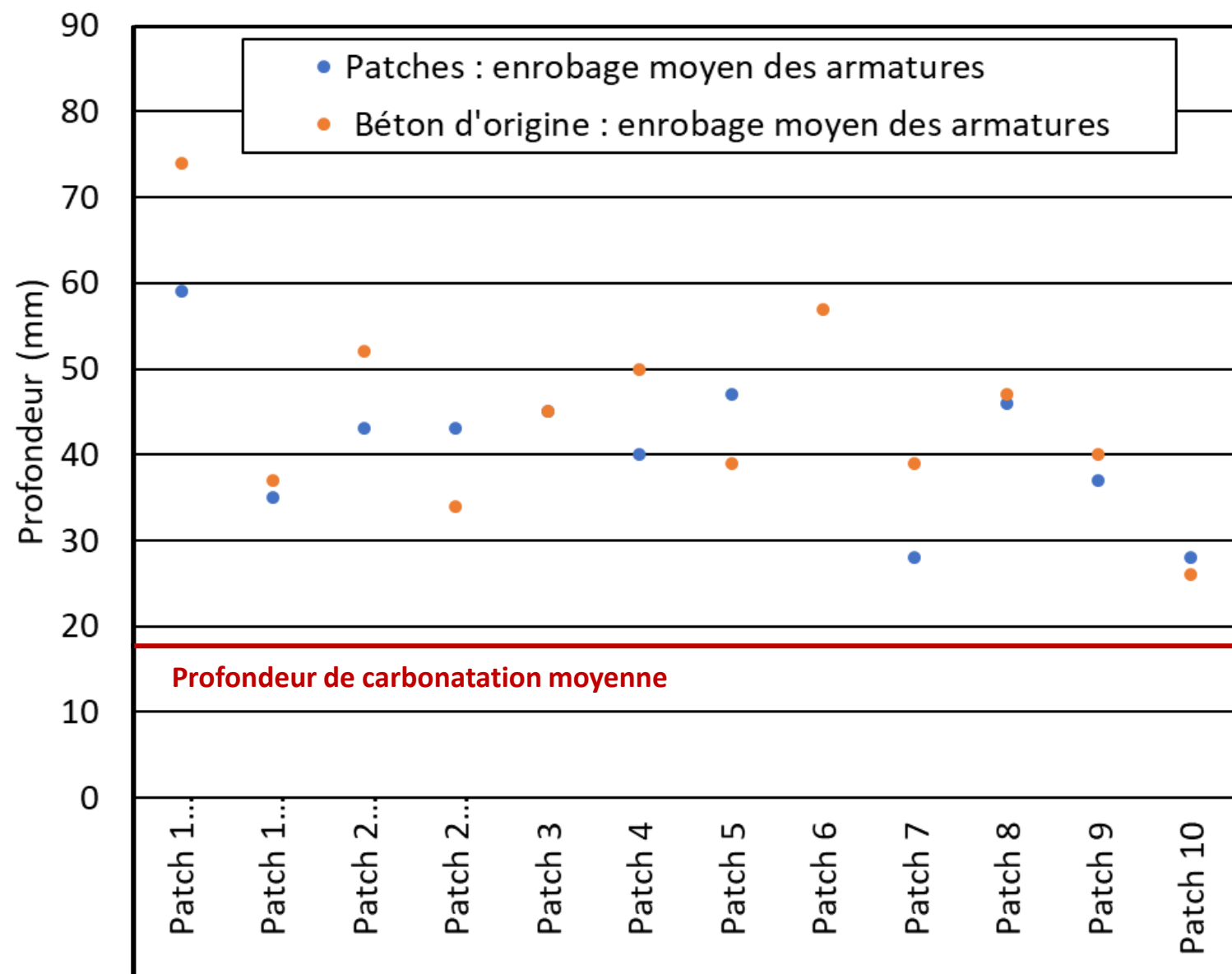
Evaluation de la durabilité des réparations (PEPS)

- Performances esthétiques
 - ➔ Très bonnes
 - ➔ Réparations difficiles à discerner



Evaluation de la durabilité des réparations (PEPS)

- **Profondeur de carbonatation** systématiquement inférieure aux enrobages moyens (béton d'origine et réparations)
- **Epaisseurs d'enrobage** jusqu'à 75mm dans le béton d'origine et jusqu'à 60mm dans les réparations



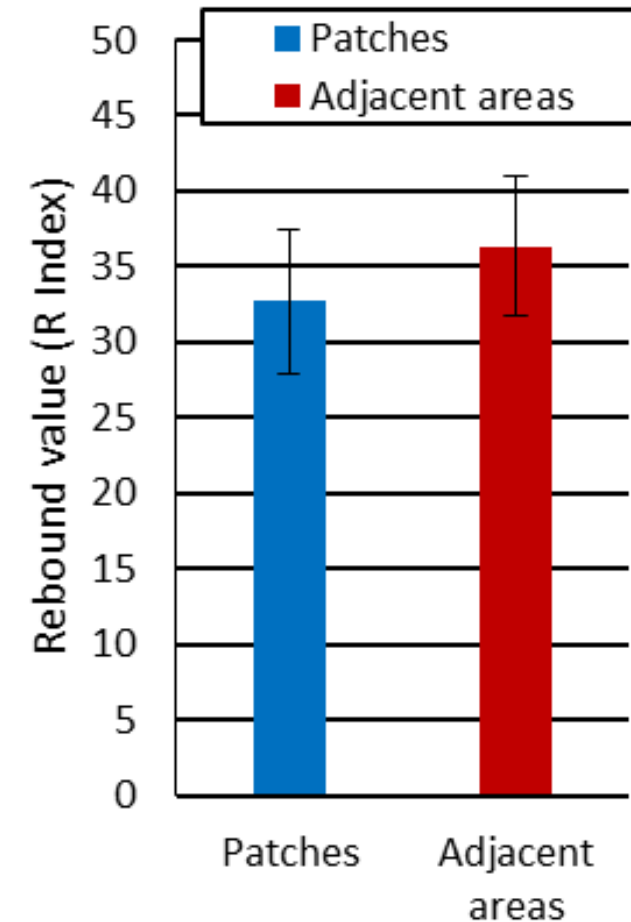
Evaluation de la durabilité des réparations (PEPS)

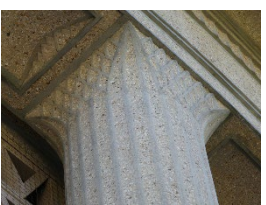
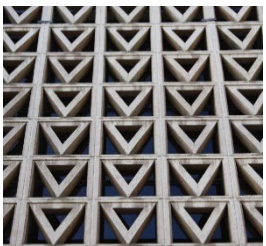
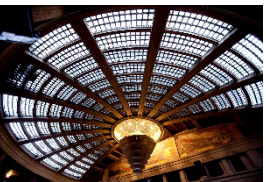
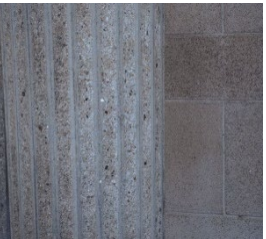
- **Performances techniques**

- ➔ Globalement très bonnes
- ➔ Très peu d'altérations visibles ⇒ Rares fines fissures et délaminations aux interfaces
- ➔ Performances mécaniques légèrement plus basses pour le béton de réparation



Au bilan, réparations en très bon état après 6 ans.





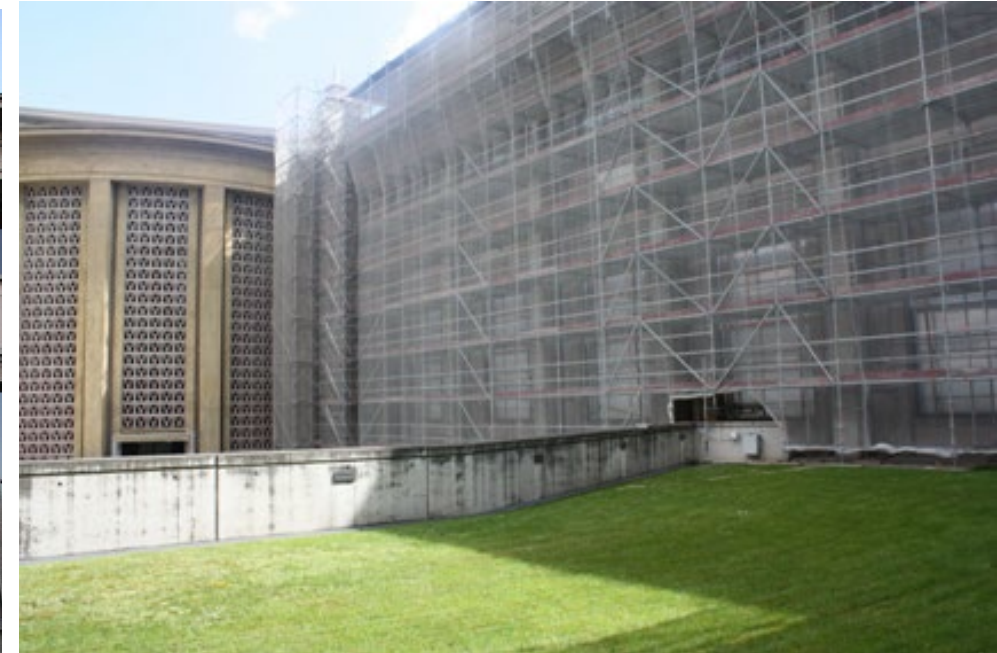
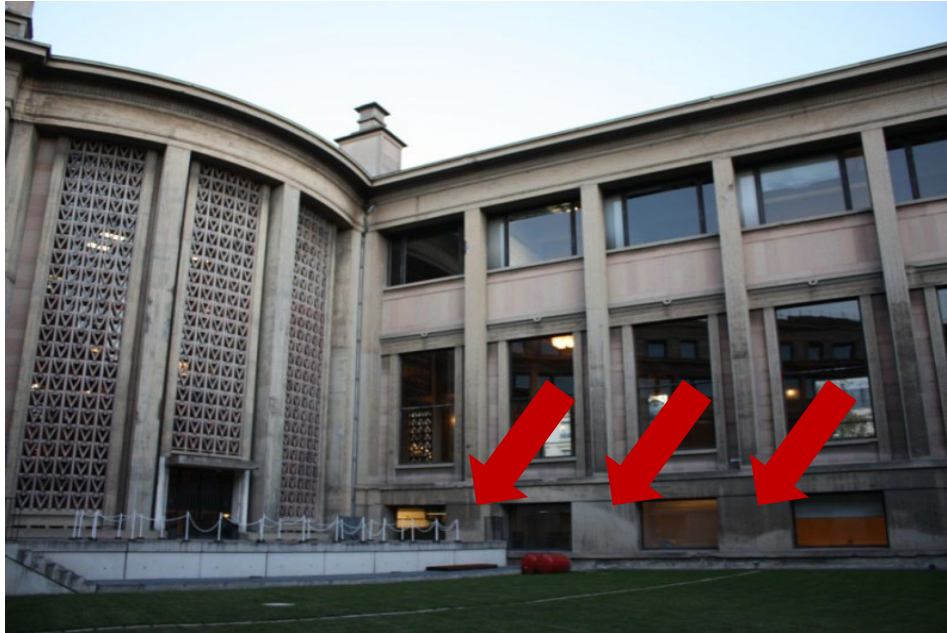
Evaluation de la durabilité de traitements hydrofuges

Projet JPI-CH Redmonest

GIS DECADES - 3^e workshop

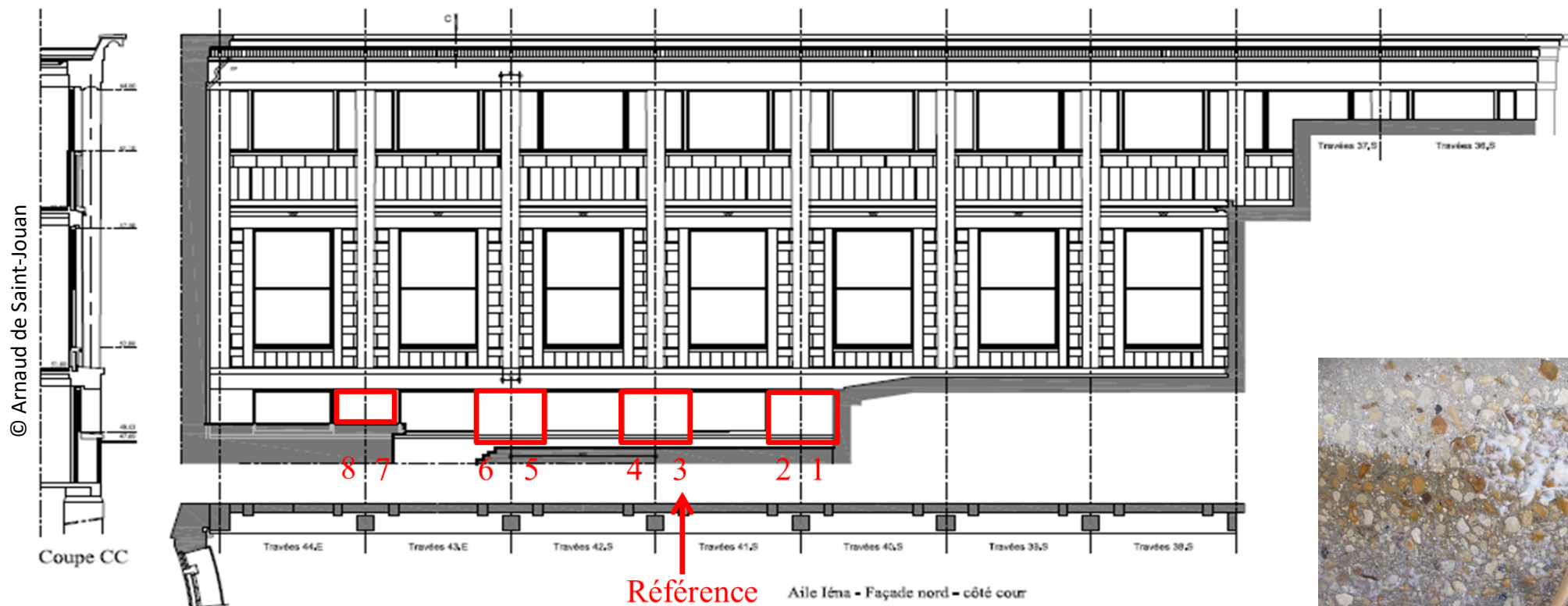
E. Marie-Victoire

8 zones d'essais



- Produits testés : 6 hydrofuges, 1 mixte hydrofuge/inhibiteur de corrosion

8 zones d'essais



- **7 produits** appliqués au pinceau
- 1 zone de référence
- Tests **avant** et **après** application des produits

Produits testés

| ZONE | 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------|---------|---------|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| Name | P1 | P2 | P3 | P4 | P6 | P7 | P8 |
| TYPE | Cream | liquid | liquid | cream | liquid | cream | liquid |
| AGENT | silanes | silanes | amino silanes | siloxane ++ silanes - | silane ++ siloxanes - | silane ++ siloxanes - | siloxanes |
| PHASE | aqueous | aqueous | aqueous | aqueous++ solvant - | ethanol | aqueous ++ solvant - | white spirit |
| MAT ACT | 40% | 20% | 99,9% | 25% | 99% | 80% | < 10% |
| SURFACE (m²) | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 2,0 | 2,0 |
| QUANTITY (g) | 355 | 582 | 1620 | 490 | 476 | 412 | 626 |
| LAYERS | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 |

Protocole d'évaluation → CND

➤ Propriétés de transfert



CSM



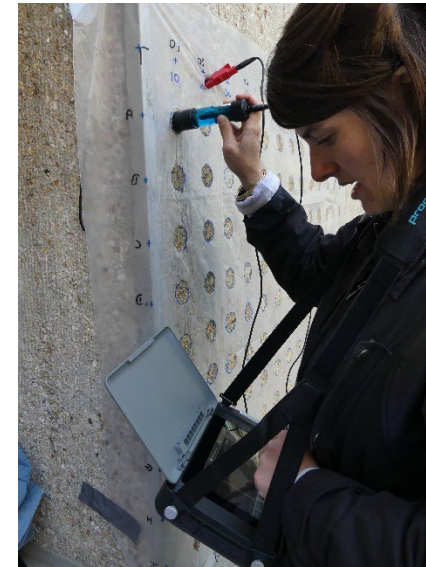
Pipettes de Karsten



SUSI-R

➤ Corrosion

- Mesures de résistivité
- Cartographies de potentiel
- Vitesse de corrosion



Cartographies de potentiel



Résistance de polarisation (*Gecor10*)

CND → Résultats 4 ans après application

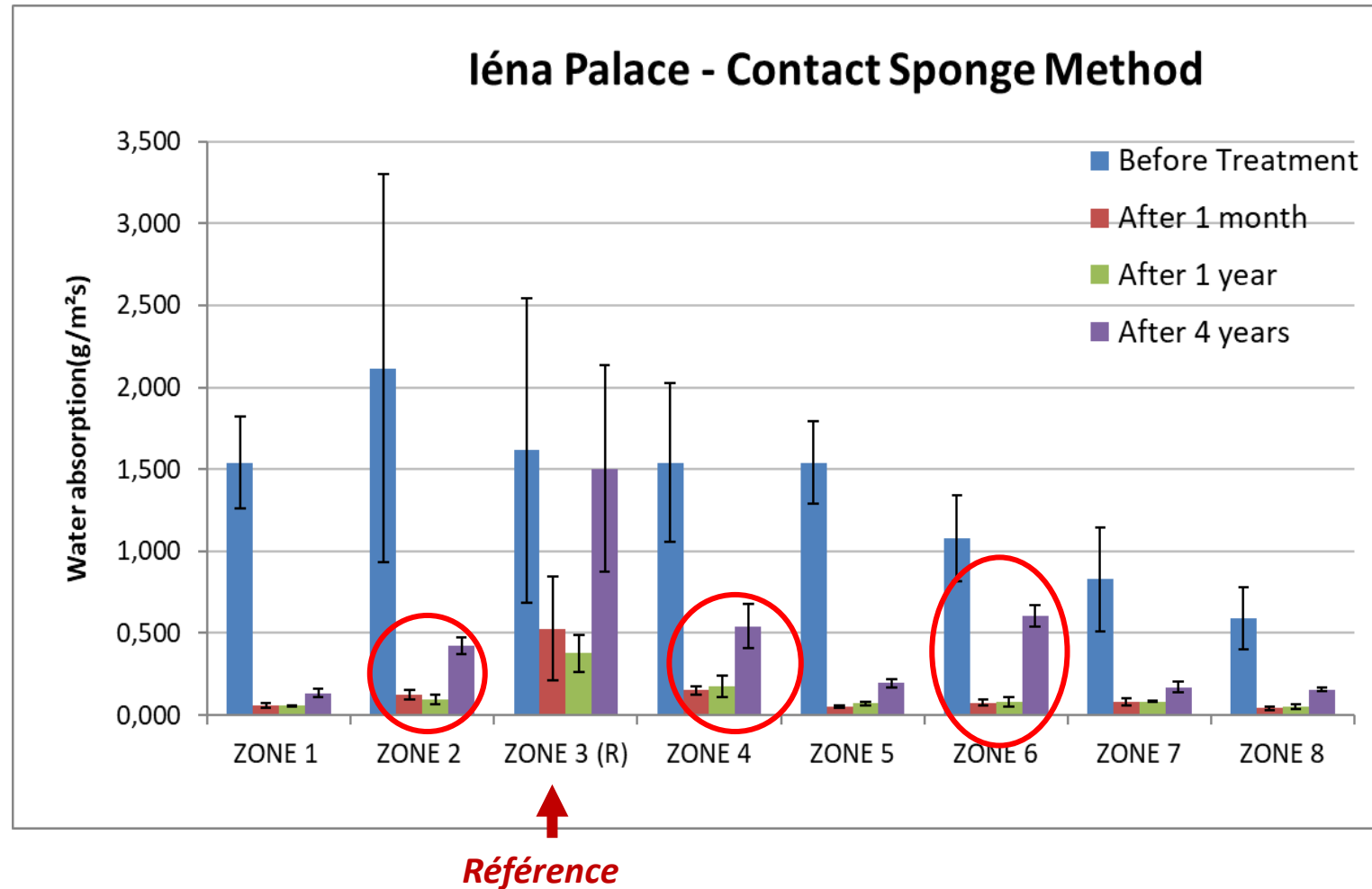
- **Propriétés de transfert 1 mois après traitement**

- ✓ Efficacité de tous les produits, mais gradation dans les performances

- **Evolution au cours du temps**

- ✓ Après **4 ans**, diminution graduelle de l'efficacité pour tous les produits
- ✓ De 87 à 90% après un mois, à 60% pour l'efficacité la plus dégradée après 4 ans

| Z | P | Efficacité (%) |
|----|----|----------------|
| Z1 | P1 | 91 |
| Z2 | P2 | 72 |
| Z4 | P3 | 64 |
| Z5 | P4 | 87 |
| Z6 | P5 | 60 |
| Z7 | P6 | 89 |
| Z8 | P7 | 90 |



- Phénomène de séchage lié à la présence de l'échafaudage visible sur la zone de référence (zone 3)
- Pour tous les produits ⇒ 1 mois après traitement ⇒ Réduction de l'absorption d'eau de 91 à 97% par rapport à la zone de référence
- P4 : produit le moins efficace après 1 mois
- P7 : référence solvant white spirit

Protocole d'évaluation → Monitoring



6 capteurs noyés

- T°C et HR%
- 2 mesures/heure



2 capteurs en surface

- Résistance de polarisation
- 1 mesure/heure

Station météo



Système d'acquisition de données

- Accessible à distance (GSM)
- Alimentation par capteur solaire



Protocole d'évaluation ➔ Monitoring ➔ Evolution



2016



2017



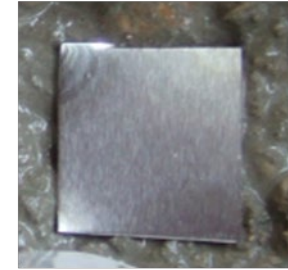
2025

- 1ers capteurs de corrosion installés en **2016-2017**
- Nouvelle installation en **2025** plus compacte

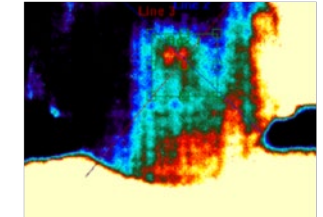
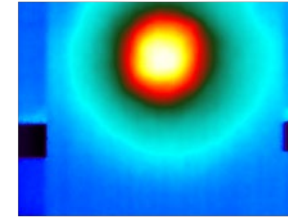
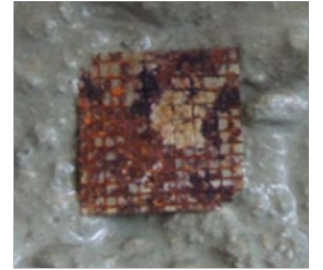
Protocole d'évaluation → Capteurs d'alerte



Capteur sain

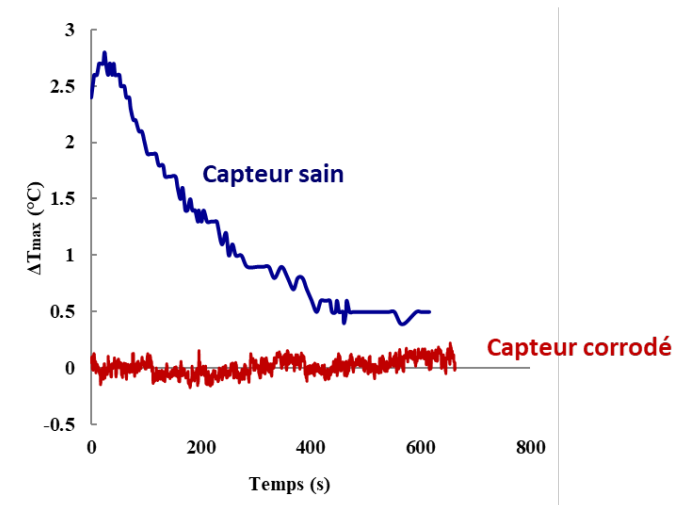


Capteur corrodé



Lames orphelines

- Fines lames de fer
- Chauffées par induction
- Signature thermique différente corrodée/non-corrodée



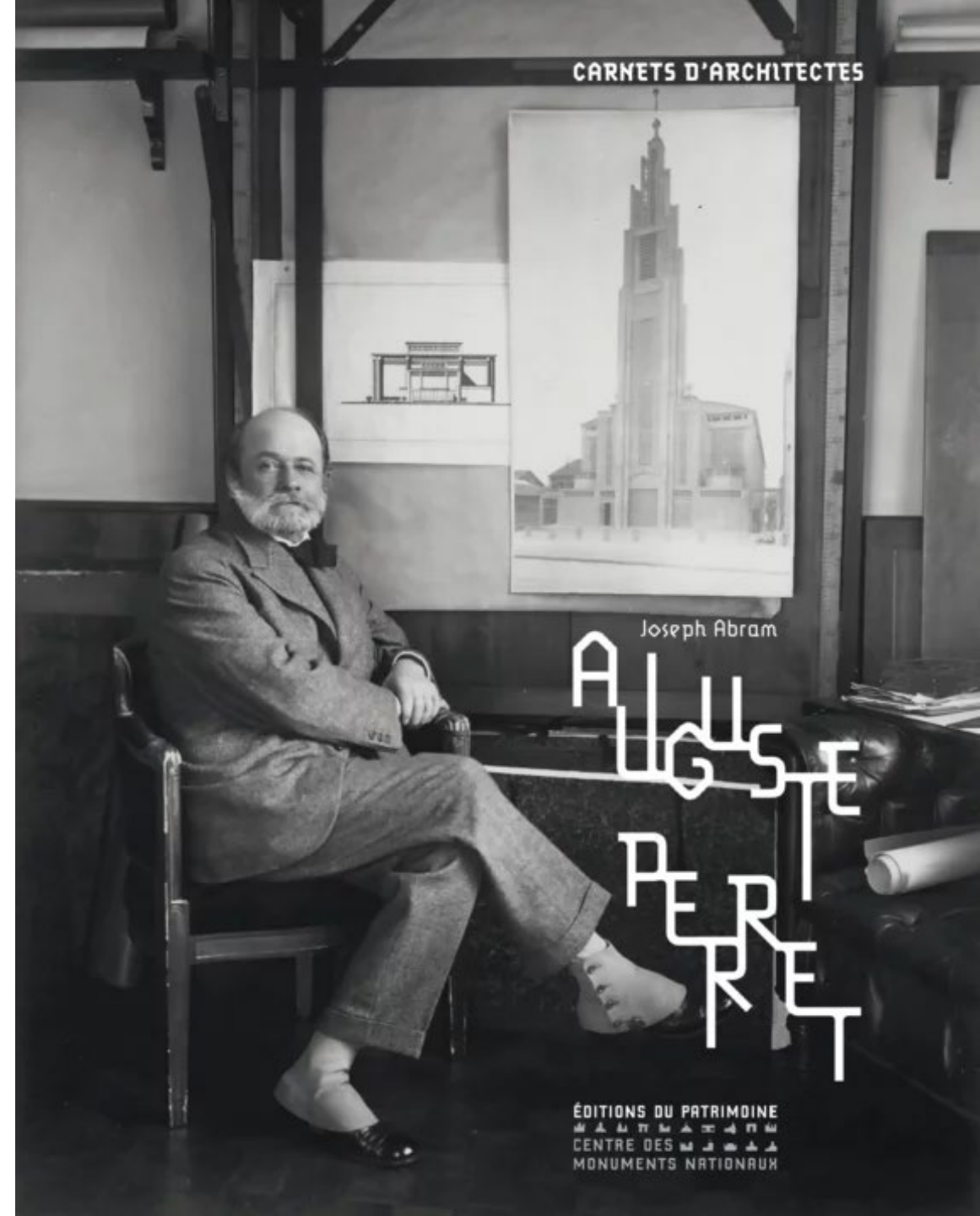
Conclusions

- Remarquable qualité initiale des bétons (*impact 2nde GM*)
- Première restauration d'envergure presque 70 ans après la construction
- Restauration exemplaire ➔ 1er prix de l'ACI, 2 Labels *Qualibat* et 2 formations GMH (maçons et encadrants)
- Belles performances esthétiques et techniques 6 ans après la restauration
- Un site unique d'expérimentation ➔ Nouvelle génération d'hydrofuges, outils de monitoring et capteurs d'alerte.

Le mot de la fin...

« Le béton c'est de la pierre que nous fabriquons, bien plus belle et plus noble que la pierre naturelle. Il faut lui faire honneur et l'éveiller. On peut la travailler au marteau, on la boucharde, on la cisaille, on la laye avec tous les instruments qui servent à aviver la pierre »

A. Perret



CARNETS D'ARCHITECTES

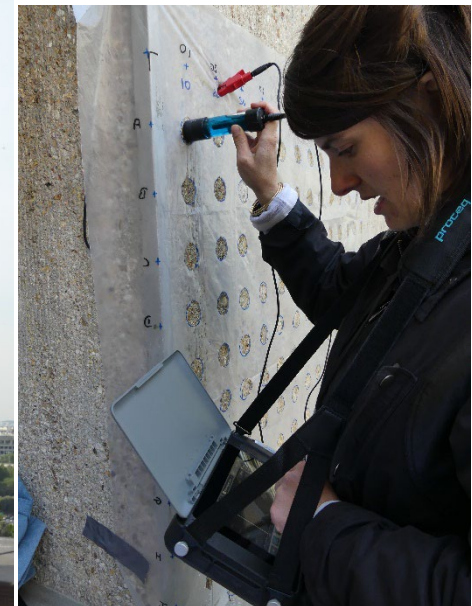
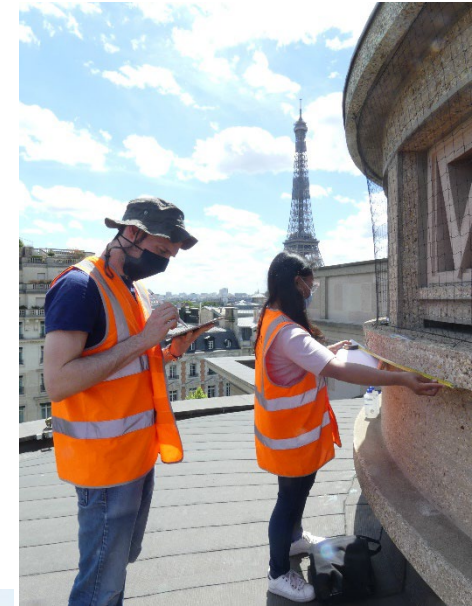
Joseph Abram

AUGUSTE
PERRET

ÉDITIONS DU PATRIMOINE
CENTRE DES MONUMENTS NATIONAUX

Remerciements

- Le CESE et en particulier Yves Bouvier
- Arnaud de Saint-Jouan et son équipe
- Les entreprises Pierrenoël et Freyssinet
- Sensecorr et Safecor
- Carmen Andrade
- Et toutes les équipes qui ont contribué aux essais (Redmonest et PEPS)



To be continued...

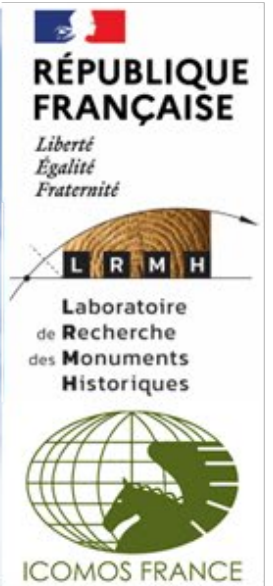


Merci de votre attention

Colloque
11-12 janvier
2027
Paris



Les bétons du patrimoine face à la corrosion des armatures



LéaV
laboratoire de recherche
ÉNSA Versailles



LABORATOIRE EMGCU
EXPÉRIMENTATION
ET MODÉLISATION POUR
LE GÉNIE CIVIL ET URBAIN

11 et 12 janvier 2027 - INHA - 2 rue Vivienne – 75002 Paris - Auditorium Jacqueline Lichtenstein