

**EVREUX**

## ***Dôme - Cité Administrative***

**DIAGNOSTIC STRUCTURE**

**DOSSIER N°22-117**

**DIAG**

**IND 0 - 31/10/2023**

### **Maîtrise d'ouvrage**



Direction départementale des  
Finances Publiques (DDFIP)  
Cité Administrative  
Boulevard Georges Chauvin  
CS 50012  
27 020 Evreux Cedex

### **Maîtrise d'œuvre**

#### BET Structure :

BMI Patrimoine  
30, rue Charles de Gaulle  
94140 ALFORTVILLE  
Tél : 01 42 77 17 18  
Mail : [contact@bmi-patrimoine.fr](mailto:contact@bmi-patrimoine.fr)

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Ind 0	31/10/2023	Première édition	AG
		relecture	DD

Résumé

Le présent rapport concerne l’étude de diagnostic structure avec préconisations réalisée sur le Dôme en béton translucide de la cité administrative d’Evreux (27).

Mots-clefs : Diagnostic, état des lieux, préconisations, pathologies, béton armé, béton translucide, brique de verre, dôme

TABLE DES MATIÈRES

I. CONTEXTE.....	3
A. Introduction .....	3
B. Localisation et description de l’édifice.....	3
C. Sources.....	3
D. Nomenclature .....	3
E. Références normatives.....	3
F. Historique succinct .....	3
II. ETAT DES LIEUX.....	4
A. Description de la structure.....	4
B. Principaux désordres.....	4
C. Illustrations .....	4
III. SYNTHESE DES ANALYSES SUR LES BETONS .....	6
A. Préambule .....	6
B. Analyses réalisées sur les bétons.....	6
1. Essais réalisés .....	6
2. Auscultation non-destructive.....	6
3. Résultats.....	6
C. Synthèse BMI.....	7
IV. BILAN ET INTERPRETATION DES DESORDRES .....	8
A. Défaut d’étanchéité .....	8
B. Dégradation générale sur le béton armé.....	8
1. Fissuration superficielle.....	8
2. La corrosion des armatures.....	8
3. Concrétion de calcite en surface .....	9
C. Fissuration des pavés de verre.....	9
V. PRECONISATION DANS LE CADRE DU DIAGNOSTIC.....	10
A. Note sur les études de diagnostic .....	10
A. Nettoyage des parements.....	10
1. Suppression des végétaux .....	10
2. Nettoyage des salissure et encroutements noirs.....	10
3. Nettoyage du parement intérieur.....	10
B. Restauration des pavés de verre .....	10
C. Restauration de l’épiderme et traitement curatif des bétons.....	10
D. Traitement préventif.....	11
1. Limiter l’apport d’humidité.....	11
2. Protection hydrofuge .....	11
VI. CONCLUSION.....	12
LISTE DES DOCUMENTS JOINTS AU RAPPORT .....	12



# I. CONTEXTE

## A. Introduction

Ce rapport est rédigé dans le cadre de la mission de diagnostic avec préconisations confiée par le Service des Finances Publiques. Il concerne le Dôme en béton translucide de la cité administrative d'Evreux (Eure-27).

Ce diagnostic a pour objectif de définir les préconisations structurelles en vue d'une restauration du dôme.

Le présent document s'articule autour des points suivants :

- mise en contexte
- état des lieux
- synthèse des analyses laboratoires réalisées sur les bétons
- bilan et interprétation des désordres
- définition des préconisations structurelles au niveau diagnostic

Remarque : sauf indication contraire, les clichés et les schémas présents dans ce rapport ont été réalisés par nos soins. Les clichés sont ceux réalisés au cours de notre visite sur place du 17/11/2022.

## B. Localisation et description de l'édifice

La cité administrative d'Evreux se trouve boulevard Georges Chauvin dans le centre-ville d'Evreux (27)

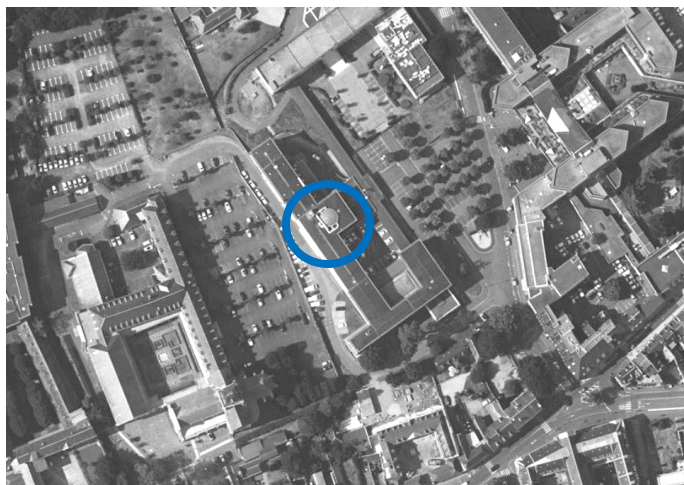


Figure 1 – Localisation de l'objet d'étude sur photographie aérienne, Source : Géoportail

## C. Sources

Nous avons eu accès et utilisé les documents suivants pour réaliser cette étude :

- relevés et photographies effectuées par BMI lors de sa visite de reconnaissance le 17/11/2022
- diagnostic sanitaire des éléments bétons, BPE LABORATOIRES, 31/07/2023
- plan et coupe géomètre réalisé par AGéose le 26/09/2022
- plans et coupe d'archive réalisé par M. Bailleau Architecte en 1950

## D. Nomenclature

Dans la suite de ce rapport, nous utiliserons la nomenclature donnée sur la figure ci-dessous.

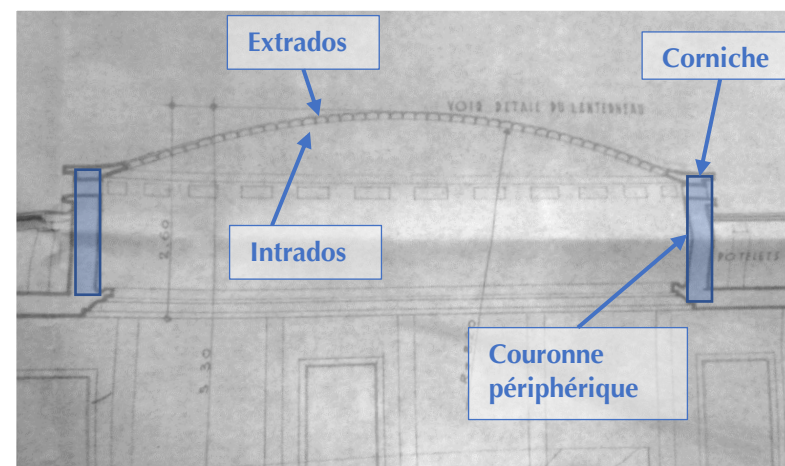


Figure 2 – Nomenclature du dôme, fond de plan architecte, image d'archive

## E. Références normatives

Sauf indication contraire, les normes utilisées dans le cadre de cette étude sont les normes actuellement en vigueur (Eurocodes, DTU, règles professionnelles). Nous utiliserons également des méthodologies de vérifications anciennes, du fait du caractère patrimonial et ancien de l'édifice.

## F. Historique succinct

La cité administrative d'Evreux est construite dans le cadre des grands travaux de reconstruction lancés à la sortie de seconde guerre mondiale.

Le chantier démarre en 1952 d'après les plans de M. Bailleau, architecte départemental.

Le style architectural de la cité, inhérent à cette période de reconstruction intensive, emploi des procédés modernes issus d'une industrialisation croissante du béton armé.

Le lanterneau qui couvre la cage d'escalier monumental est réalisé notamment en béton dit *translucide*. Ce procédé constructif, inventé par l'ingénieur Gustave Joachim en 1906 consiste à assembler des modules de verre (pavé de verre) par un réseau de poutrelle en béton assurant à la fois une certaine résistance et important apport de lumière.

Ce procédé se développe notamment à partir des années 30 pour la réalisation des plafonds du métropolitain parisien et la réalisation de coupole dans de nombreux bâtiment d'équipements publics et industriels.



Figure 3 - Annonce publicitaire pour les pavés de verre St-Gobain servant à la réalisation de dallage armé translucide, source : Le béton Armé, revue mensuelle technique et documentaire des constructions, septembre 1930



## II. ETAT DES LIEUX

### A. Description de la structure

Le dôme de la cité administrative couvre une cage d'escalier monumentale et franchie une portée de 7,9m. Il se compose d'une fine coque en béton d'environ 7cm ajourée pour accueillir des pavés de verre d'environ 10x10cm.

Le dôme est constitué d'un réseau de poutrelles circulaires qui permet d'assurer un effet de cerclage nécessaire à la reprise des poussées de voûte. Ce réseau se compose de cinq poutres principales d'une largeur comprise entre 16cm et 9cm et de poutres secondaires d'une largeur de 3,5cm situées entre chaque rangée de pavé. Un deuxième réseau de poutrelles radiales dont la largeur est variable assure également le maintien de pavés.

L'épiderme extérieure de dôme est composé d'une couche protectrice de 20mm en micro-béton. La face intérieure est couverte d'un enduit de 2mm.

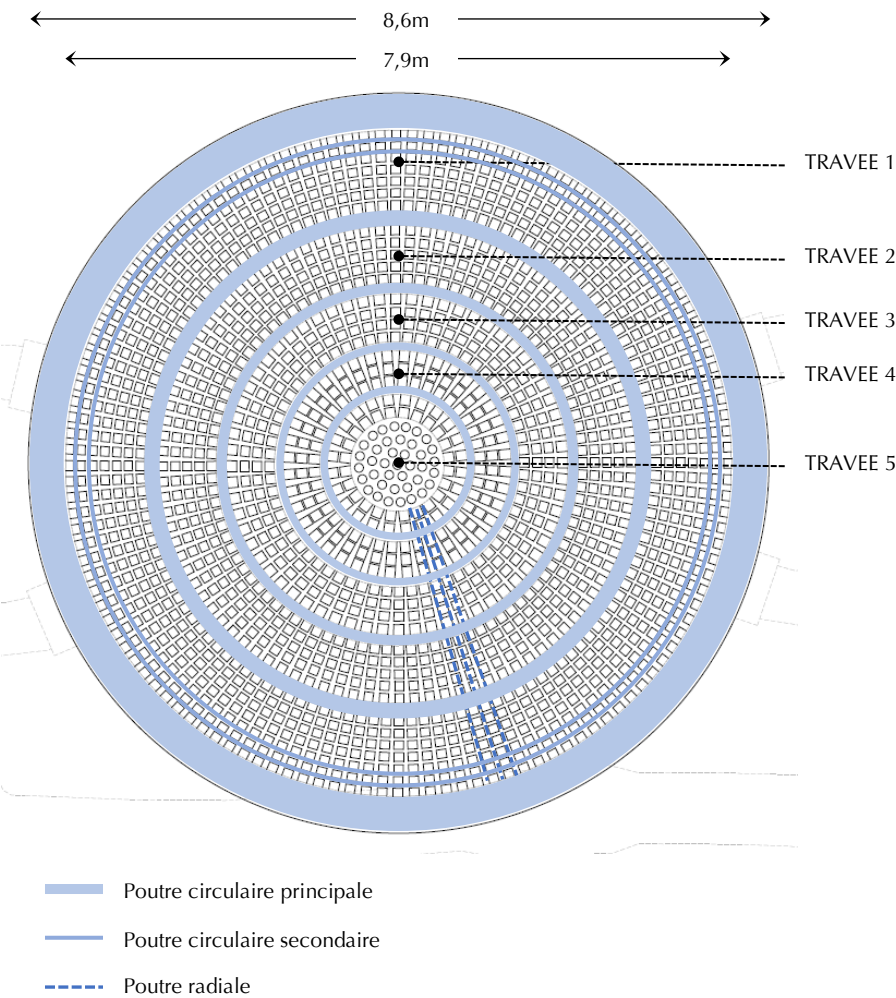


Figure 4 – Plan schématique de la structure du dôme

### B. Principaux désordres

Au cours de notre visite sur place du 17/11/2022 nous avons relevé les désordres structurels suivants (liste non exhaustive) :

- perte de matière
  - o éclatement de surface du béton
  - o épaufrures liées à la corrosion des armatures
  - o béton lacunaire sur la corniche extérieure
- fissuration
  - o fissuration de 3 pavés de verre
  - o faïençage de surface sur la corniche extérieure
- corrosion et mise à nue des armatures
- altération chromatique
  - o formation de voile blanchâtre
  - o concrétions salines
  - o traces de ruissèlement noirâtres
  - o encrouement superficiel
- recouvrement biologique
  - o mousse et lichens

On remarquera le marquage de la géométrie réalisé sur la couche d'enduit pendant la phase chantier.

Nous avons pu constater les traces de campagne de restauration antérieure telles que :

- reprise avec un mortier de ragréage
- reprise de joint de certains pavés

### C. Illustrations



Figure 5 – Pavés de verre fissurés, infiltrations au niveau des joints

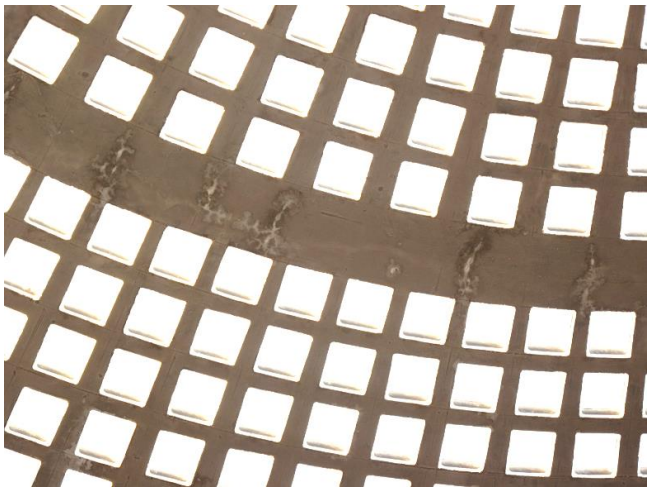


Figure 6 – Voile blanchâtre et concrétions salines sur la poutre circulaire au droit des armatures radiales



Figure 7 – Epaufrure, concrétions salines et armature corrodée





Figure 8 – Voile blanchâtre et concrétions salines



Figure 11 – Tâche de ruissèlement noirâtres



Figure 14 – Faïençage superficiel



Figure 9 – Pavés de verre fissurés, encrouement superficiel du béton



Figure 12 – Colonisation biologique



Figure 15 – Colonisation biologique, épaufrure du béton



Figure 10 – Eclatement du béton, recouvrement biologique, encrouement noirâtre



Figure 13 – Perte de matière importante laissant à nue des armatures corrodées



Figure 16 – Reprise au mortier de réparation de teinte différente



III. SYNTHÈSE DES ANALYSES SUR LES BETONS

A. Préambule

Le laboratoire BPE a été missionné par la maîtrise d’ouvrage, à la demande de BMI, pour effectuer un diagnostic sanitaire sur les bétons du dôme. Ces analyses ont pour but de d’identifier les pathologies physico-chimiques des bétons en vue de déterminer les préconisations de réparation les plus adaptées et dont nous présentons dans cette partie les principaux résultats, à titre indicatif. Pour d’avantage d’information, se référer au rapport joint en annexe.

B. Analyses réalisées sur les bétons

1. Essais réalisés

Des auscultations non destructives ont permis de déterminer les dispositions géométriques des armatures métalliques (entraxe, enrobage, diamètre etc...). Des prélèvements d’échantillon ont également été réalisés en divers endroits de la structure :

- 1 prélèvement P1 permettant :
  - o la caractérisation du revêtement en intrados
- 1 carottage C1 permettant :
  - o les analyses physico-chimiques sur le béton structurel du dôme
  - o la caractérisation du revêtement de l’extrados,
- 6 sondages S1 à S6 pour déterminer :
  - o l’épaisseurs d’enrobage des aciers
  - o la profondeur de carbonatation
  - o la teneur en chlorures libres, sulfates solubles et alcalins solubles
- 1 prélèvement D1 permettant
  - o une identification minéralogique en vue de définir la nature des concrétions salines visibles en sous-face

2. Auscultation non-destructive

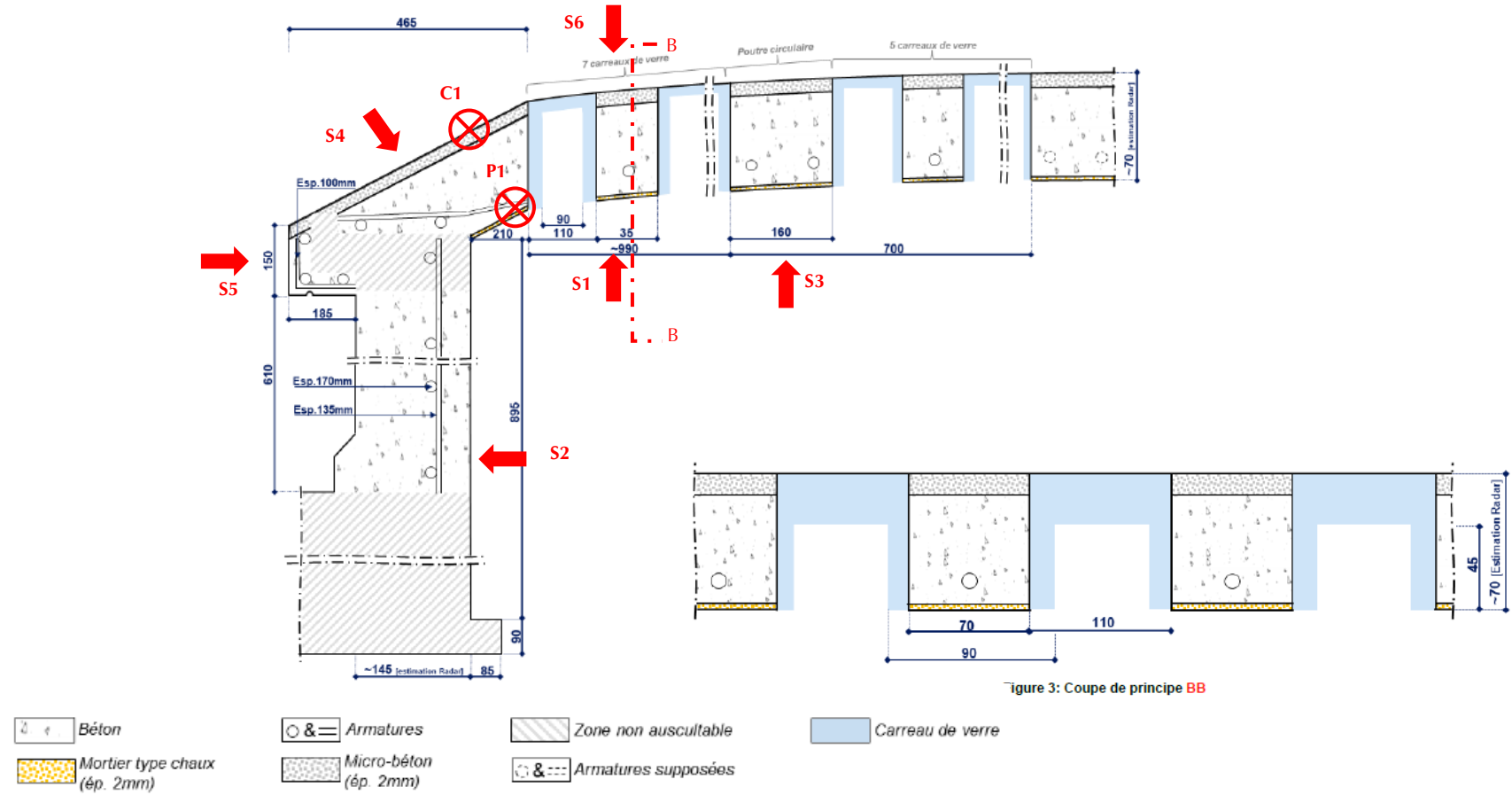
Les investigations ont été réalisées par auscultations au Ferroskan®, permettant de détecter les armatures métalliques au sein d’un matériau, à la fois au niveau des surfaces horizontales et verticales. Ces auscultations ont été réalisées sur la couronne périphérique et les deux premières travées. Les résultats de ces investigations sont donnés sur la Figure 17 et dans le Tableau 1.

A noter que cette méthode d’auscultation emploi une technique qui présente un certain nombre de limites et doit être couplée avec des sondages mécaniques. Les armatures visibles au niveau des épaufrures en sous-face du dôme ont permis de préciser les relevés réalisés au Ferroskan®.

3. Résultats

Géométrie et disposition constructive du dôme

Le schéma ci-dessous récapitule la localisation des prélèvement réalisés ainsi que l’ensemble des mesure réalisées sur place.



Caractéristique physico-chimique du béton

Les principales caractéristiques mesurées sur le béton du dôme sont les suivantes :

- mesure de la porosité ouverte : **13%** (les valeurs de porosité communément admises pour un béton standard sont de l’ordre de 13 à 15%)
- mesure de la masse volumique apparente : **2132 kg/m³**
- dosage en ciment : **370 kg/m³** (17,4%)
- teneur en eau : **171 kg/m³**
- rapport eau/ciment (E/C) : **0,46** (généralement compris entre 0,4 et 0,6)
- résistance à la compression : **25,6 MPa**

Des analyses semblables ont également été menées sur le micro-béton constituant le revêtement extérieur du dôme mais que nous ne présentons pas dans ce rapport.

Caractérisation pathologique du béton

Les résultats obtenus dans le cadre de la caractérisation pathologique des bétons (enrobage, carbonatation, teneur en chlorure libres etc...) sont présentés dans le Tableau 1. Les valeurs obtenues sont comparées avec des valeurs seuils issues des normes en vigueur. Nous constatons que l’ensemble des valeurs mesurées se trouvent en dessous du seuil admissible. Nous constatons que le front de carbonatation n’a pas atteint les armatures bien que les enrobages soient faibles hormis au niveau de la couronne périphérique où 2% des armatures se trouvent en zone de dépasseivassions.

Les identifications minéralogiques sur les concrétions ont révélé qu'il s'agissait de cristallisation de calcite.

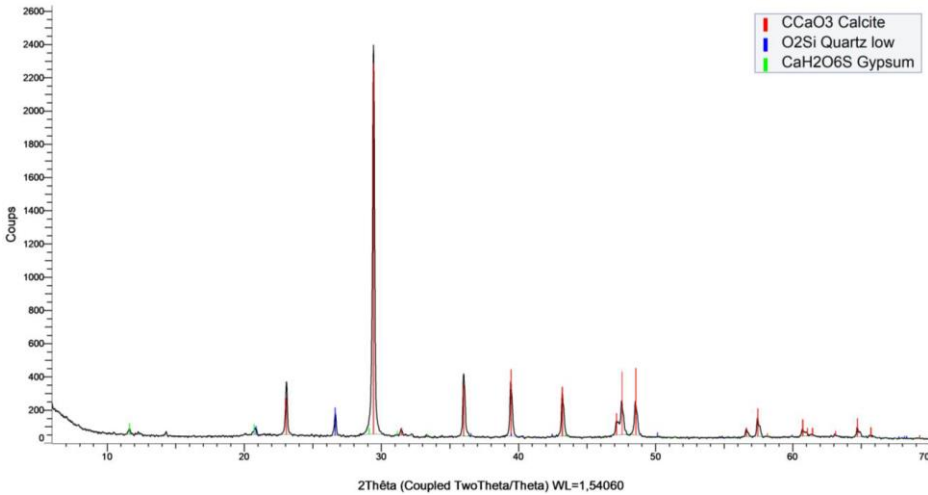


Figure 18 - Schéma de principe décrivant la géométrie du dôme et son système constructif déduit des auscultations, source : rapport BPE

C. Tableau de synthèse

Les principaux résultats obtenus par BPE sont synthétisés dans la tableau suivant :

	Enrobage mini (mm)	Enrobage moyen (mm)	Prof. De carbonatation (mm)	Armature en zone de dépasivation (%)		Prof 1 [0-15 mm]	Prof 2 [15-30 mm]	Prof 3 [30-45 mm]	Prof 4 [45-60 mm]
S1 Intrados dôme - Réseaux côté Ouest	10	16	4	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,03	0,02	--	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,73	0,98	--	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,79	0,45	--	--
S2 Intrados dôme - Couronne côté Ouest	14	44	18	2,0	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,03	0,02	0,02	0,02
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,62	0,84	0,85	0,54
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,36	0,3	0,18	0,15
S3 Intrados dôme - Réseaux côté Sud	8	16	4	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,04	0,03	--	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	1,79	1,09	--	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	1,53	0,94	--	--
S4 Extrados dôme - Réseaux côté Nord	6	33	1	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	<0,01	0,02	0,02	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,75	0,66	0,56	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,34	0,89	0,54	--
S5 Extrados dôme - Couronne côté Nord	28	42	1	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,03	0,02	0,02	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,74	1,06	0,46	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,15	0,84	0,88	--
S6 Extrados dôme - Réseaux côté Sud	26	37	1	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,03	0,03	0,03	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,49	1,19	0,68	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,09	0,08	0,16	--

Tableau 1 - Résultats des essais et analyse laboratoire

## IV. BILAN ET INTERPRETATION DES DESORDRES

Nous présentons dans la suite les différents types de désordres que nous avons observés sur l'édifice et décrivons pour chacun d'eux ses origines, les circonstances qui ont pu favoriser le désordre et les conséquences éventuelles (nouveaux désordres).

### A. Défaut d'étanchéité

De nombreux désordres observés sur l'édifice proviennent notamment de légers défauts d'étanchéité. On observe notamment plusieurs témoins de la présence d'humidité sur le dôme :

- corrosion des armatures et éclatement des bétons (épaufrures)
- trace de coulure
- infiltration au niveau des joints
- voile blanchâtre

### B. Dégradation générale sur le béton armé

#### 1. Fissuration superficielle

Nous avons constaté un réseau de fissures verticales sur la corniche extérieure du dôme. Ces fissures, toutes orientées dans la même direction semble correspondre à des fissures de retrait. Le phénomène de retrait est dû à une réaction chimique qui survient dès la mise en œuvre du béton, au moment de son durcissement et durant tout son développement. Ces fissures n'altèrent pas la performance de la structure, cependant elles deviennent le chemin préférentiel pour l'infiltration des eaux au sein du béton et peuvent occasionner, à terme la corrosion accélérée des armatures.

#### 2. La corrosion des armatures

Nous avons constaté des armatures qui présentaient des traces de corrosions au niveau de l'intrados et de la corniche extérieure di dôme.



Figure 19 - exemple d'armatures relevées présentant des traces de corrosion

Le processus de corrosion est particulièrement préjudiciable pour la pérennité des bétons. En effet le phénomène de corrosion entraîne :

- une réduction de la section des armatures
- une réduction de l'adhérence acier-béton
- l'apparition de traces de rouille en surface

Par ailleurs, les produits issus de la corrosion ont des volumes jusqu'à sept fois supérieurs à celui du métal sain, ce qui a pour conséquence :

- la fissuration de la zone d'enrobage
- l'écaillage surfacique
- des épaufrures : éclatements des bétons avec chute de matière
- l'éclatement local du béton

Les origines de la corrosion des armatures sont :

- les infiltrations
- la carbonatation du béton
- la pénétration des ions chlorures dans l'enrobage

A noter que le phénomène de corrosion peut être plus ou moins rapide suivant les caractéristiques physico-chimiques du béton (porosité, compacité etc...) et son état sanitaire (épaufrure, fissuration etc...).

#### Corrosion par carbonatation

La carbonatation est un phénomène naturel et inévitable pour les bétons. Il s'agit d'une transformation des composants du béton sous l'action du dioxyde de carbone atmosphérique (CO<sub>2</sub>).

Les bétons contiennent différents composés dont la portlandite<sup>1</sup> (Ca(OH)<sub>2</sub>) qui, sous l'effet du CO<sub>2</sub> engendre la formation de la **calcite** (CaCO<sub>3</sub>). Cette réaction chimique produit des hydroxydes qui font progressivement baisser le pH du béton de 11 (béton sain) à 8 environ. Cette baisse du pH place les aciers hors de leur domaine de passivation : la corrosion des aciers est alors amorcée.

Par ailleurs si des infiltrations d'eau ponctuelles ont eu lieu, elles créent par leur passage un chemin préférentiel pour le CO<sub>2</sub> puis l'eau, les armatures sont atteintes et des amorces de corrosion se déclenchent.

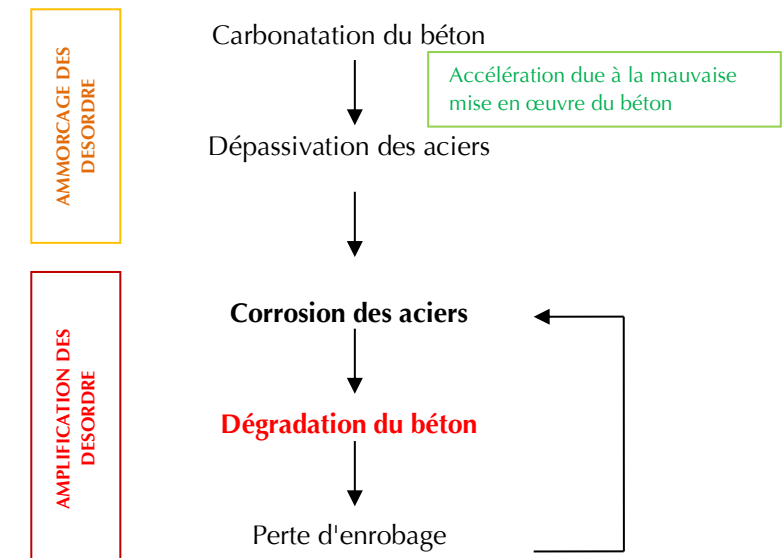
**Il y a eu des infiltrations d'eau ponctuelles. Elles créent par leurs passages un chemin préférentiel pour le CO<sub>2</sub> puis l'eau, les armatures sont atteintes et des amorces de corrosion se déclenchent.**

Le mesures réalisée montrent des progressions variables mais restant néanmoins faibles des fronts de carbonatation au regard des profondeurs d'enrobages relevés hormis au niveau de la couronne périphérique où 2% des armatures de peau se trouve en zone de dépasse.

Dans ce dernier cas, nous sommes donc en présence d'une combinaison de phénomènes : faiblesse des enrobages, et la présence d'eau, probablement par défaut d'étanchéité ou de malfaçons, facteurs qui pourrait entraîner une corrosion active des aciers et provoquer l'éclatement des bétons.

Il conviendra donc de trouver une solution pour bloquer les échanges entre le béton et le gaz carbonique, lorsque les fers présentent des défauts d'enrobage, et stopper les pénétrations d'eau.

Par ailleurs, on peut considérer qu'aujourd'hui, la carbonatation a atteint son niveau maximum. Même si la réaction de carbonatation ne peut pas être évitée et se poursuit tout au long de la vie de l'édifice, la vitesse de la réaction ralentit fortement au cours du temps<sup>2</sup>.



#### Corrosion par pénétration d'ions chlorures

Les ions chlorure sont principalement présent en milieu marin, dans le sel de déverglaçage ou en milieu pollué. La pénétration des ions chlorures s'opère par la migration d'une phase liquide qui transfère les ions chlorures dans le matériau. Par conséquent, ce phénomène dépend des caractéristiques du matériaux, mais également de son environnement et des cycle d'humidification/séchage.

Les analyse laboratoire révèlent un béton d'une porosité relativement faible qui explique notamment le taux très faible d'ion chlorures. Par ailleurs, nous n'avons pas relevé d'origine potentielle à l'apport extérieur d'ions chlorures dans l'environnement immédiat du dôme.

Nous en concluons que les ions chlorures ne sont pas la cause de la corrosion des armatures et que celles-ci sont correctement protégées contre cet agent exogène.

<sup>1</sup> ou chaux éteinte ou di-hydroxyde de calcium ou chaux grasse

<sup>2</sup> vitesse en  $\sqrt{t}$ , en raison de la progression du front de carbonatation vers la profondeur du béton, où le transfert du CO<sub>2</sub> extérieur est ralenti.



### 3. Concrétion de calcite en surface

Nous avons également constaté des voiles blanchâtres et de concrétion sur l'intrados du dôme.



Figure 20 - Exemple de trace de calcite relevée sur l'intrados du dôme

Si visuellement les concrétions semblent accentuer la gravité des désordres, les analyses minéralogiques indiquent que ces concrétions sont exclusivement assimilables à de la calcite résultant d'infiltrations d'eau dans les bétons.

### C. Fissuration des pavés de verre

Nous avons constaté que trois pavés sont fissurés. La fissuration des briques de verre peut avoir pour origine :

- un phénomène de dilatation thermique différentielles entre le verre et le béton armé
- projectiles d'origine extérieure tombés sur le dôme
- une corrosion des armatures ayant induit une augmentation de leur volume et des contraintes à l'interface béton-verre. Nous constatons que le joint autour d'un des pavés a été restauré. Ce calfeutrement ne semble plus assuré son rôle étanche, il est probable que des armatures aient corrodées à cet endroit.
- des mouvements de la structure du bâtiment ou du dôme. N'ayant pas constaté de désordres structurels laissant suggérer une déformation différentielle du dôme (fissurations, etc...) cette dernière hypothèse nous paraît peu probable.



Figure 21 - Joint (et pavé ?) ayant été remplacé et n'assurant plus l'étanchéité

## V. PRECONISATION DANS LE CADRE DU DIAGNOSTIC

### A. Note sur les études de diagnostic

Les préconisations décrites dans ce document ne peuvent en aucun cas être considérées comme des études abouties pouvant servir d'étude d'exécution. Elles sont définies dans le cadre d'une mission de diagnostic-préconisations permettant au maître d'ouvrage de programmer les travaux et de lancer une mission de maîtrise d'œuvre.

### A. Nettoyage des parements

Dans un premier temps, nous préconisons de procéder au nettoyage des parements qui permettra de les dégager de toutes les salissures et végétaux. Un nettoyage préliminaire permettra également de mettre à jour d'éventuels défauts à traiter qui auraient été dissimulés.

Les méthodes agressives de type sablage ou nettoyeur à haute pression sont à proscrire en raison du risque d'endommagement, perte de matière ou de refoulement de sels dissous dans les porosités.

#### 1. Suppression des végétaux

Pour traiter les lichens, mousses, algues nous conseillons de :

- les traiter par un biocide adapté (fongicide, algicide, etc...),
- de les asperger localement de vapeur d'eau,
- de les frotter avec une brosse douce

#### 2. Nettoyage des salissures et encroutements noirs

Le nettoyage du parement extérieur doit être effectué avant les opérations de traitement et de protection. Le choix entre les différentes techniques de nettoyage devra se faire en fonction de l'état sanitaire du béton ainsi que des particularités logistiques. On pourra procéder aux interventions suivantes :

- nettoyage par voie humide :
  - o à basse pression ou nébulisation (projection de microgouttelettes)
  - o à la vapeur, efficace sur les parements faiblement indurés mais dont l'avantage est de limiter l'imbibition du parement
- application d'un cataplasme
  - o application d'un cataplasme à base de laine de roche ou argiles
  - o rinçage et brossage manuel à la brosse douce
- nettoyage cryogénique

Afin de ne pas endommager les pavés de verres, le nettoyage par projection d'abrasifs est à proscrire. De manière générale, la technique employée ne devra en aucun cas endommager les matériaux en place. Une attention particulière devra être apportée à la préservation de l'épiderme.

### 3. Nettoyage du parement intérieur

Le parement intérieur est couvert d'une fine couche d'enduit d'environ 2mm. Pour sa restauration nous conseillons de procéder comme suit :

- purge des parties instables à proximité des épaufrures
- reprise d'enduit avec un matériau compatible
- brossage des efflorescences de calcite
- nettoyage manuel avec un traitement doux
- une mise en peinture pourra être envisagée.

### B. Restauration des pavés de verre

On procédera au remplacement des pavés de verre fissurés en veillant à conserver une teinte identique à celle d'origine.

Pour cela nous conseillons de procéder comme suit :

- picage manuel soigné du béton sur le pourtour du pavé
- extraction du pavé
- remplacement par un pavé identique
- scellement du pavé avec un béton de réparation adapté
- application d'un mortier enduit de finition de type micro-béton sur environ 2 cm

Par ailleurs nous préconisons une révision de l'ensemble des pavés de verre et si besoin de regarnir les joints avec un mastic adapté.

### C. Restauration de l'épiderme et traitement curatif des bétons

Une restauration du béton est nécessaire au droit des zones présentant des épaufrures, traces de corrosion, fissures etc...

Au démarrage du chantier, il sera impératif de s'assurer de la compatibilité chimique et mécanique des bétons en place et des différents traitements qui seront appliqués.

#### Traitement des armatures corrodées

- dégagement des armatures corrodées par burinage, repiquage ou bouchardage, effectué jusqu'à apparition d'un acier sain, avec un minimum de 2cm en arrière de l'armature
- élimination de la corrosion foisonnante ou de surface par décapage et brossage soigné
- nettoyage avec précaution de la surface après élimination des bétons dégradés afin de faire disparaître toute poussière

- application sur la totalité des armatures dégagées et en périphérie complète d'un produit anticorrosion. Cette opération est à réaliser immédiatement après le décapage. Appliquer une deuxième couche de produit anti-corrosion sur l'armature et avant que celle-ci ne sèche, projeter un sable de quartz sec afin d'améliorer l'adhérence du mortier.
- remplacement des armatures trop dégradées par de nouvelles armatures si la section résiduelle est inférieure à 90%. La reconstitution du ferrailage pourra se faire par :
  - o recouvrement (les recouvrements devront être conformes aux règles en vigueur)
  - o soudage avec une nouvelle armature (norme NF A35-018)
  - o scellement chimique

#### Réfection des bétons

La reprise des bétons se fait au droit des armatures à nu, à l'aide d'un mortier compatible avec l'existant coulé en place :

- Soit béton formulé comparables aux bétons aujourd'hui en place
- Soit béton prêt à l'emploi compatible chimiquement et mécaniquement aux bétons aujourd'hui en place.

Pour les zones de faibles épaisseurs (ragréage), un ajout de fibres permettra d'améliorer la cohésion du mortier et d'éviter les risques de fissuration par retrait. Parmi ces produits, peuvent être retenus : SIKA MONOTOP 612 F, LANKO 731 mortier de réparation ou tout autre mortier de réparation équivalent faisant l'objet d'un avis technique.

Pour les volumes les plus importants, il pourra être mis en place des goudonnages en fibre de carbone pour assurer la fixation.

A noter que le mortier respectera les critères suivants :

- tenue verticale sans coffrage
- montée en résistance rapide et résistance mécanique supérieure au béton support
- adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support
- imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs
- coefficient de dilatation thermique et module d'élasticité dynamique équivalent au béton support.



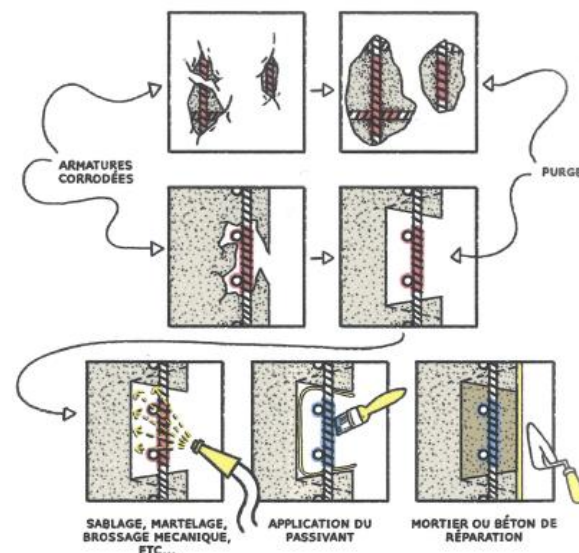


Figure 22 – Schéma de principe de la méthodologie de restauration du béton, source : Les bétons du patrimoine, FFB, Paris, 2021

Compte tenu du caractère patrimonial du dôme, il conviendra d'apporter un soin particulier aux opérations de reprise des bétons notamment dans le cadre de l'intégration des réparations.

Les réparations devront s'effectuer en recherche avec un mortier de teinte adaptée. Pour cela il sera nécessaire d'utiliser un mortier ayant une teinte originelle relativement claire laquelle pourra être adaptée en fonction du vieillissement naturel du béton. Pour les enduits et les zones de béton apparentes et visibles, une zone d'essai devra être menée au démarrage du chantier pour régler les colorimétries, textures, afin d'éviter un aspect hétéroclite entre zones traitées et zones non traitées. L'aspect de surface sera traité pour obtenir la même couleur après séchage, le même grain et la même texture que l'existant.

#### D. Traitement préventif

Afin de garantir la pérennité de l'ouvrage dans le temps nous recommandons à la maîtrise d'ouvrage de procéder à un traitement préventif sur l'ensemble du dôme. En effet, les méthodes de réparations préventives sont beaucoup moins coûteuses que les méthodes curatives décrites plus haut.

##### 1. Limiter l'apport d'humidité

Les ouvrages en béton sont particulièrement sensibles à l'eau.

Nous avons constaté des indices d'infiltrations qui, à terme, peuvent être préjudiciables à la structure. Nous préconisons par conséquent une révision complète de l'étanchéité de la couronne extérieure notamment au niveau de joint entre les membranes.

Par ailleurs, on veillera à assurer une bonne ventilation de l'espace couvert par le dôme afin de limiter la condensation sur la paroi intérieure.

Il conviendra enfin de restituer une goutte d'eau conforme en sous-face de la corniche afin d'éviter la stagnation d'eau qui accélère la corrosion des armatures.

##### 2. Protection hydrofuge

Nous préconisons de mettre en œuvre un traitement visant à protéger la surface des bétons afin de réduire les pénétrations d'eau dans l'épiderme de celui-ci et de ralentir les phénomènes de vieillissement tel que la carbonatation de la matrice cimentaire.

Pour cela, on procédera à l'application d'un produit hydrofuge de type SIKAGARD 703W, LANKOSTOP 230 ou tout hydrofuge de surface équivalent faisant l'objet d'un avis technique.

Les revêtements étanches sont à éviter car ils modifieraient la respiration naturelle du bâtiment pouvant induire d'autres problématique à long terme.

Cette intervention devra être réalisée sur l'extrados en priorité, étant la zone la plus exposée aux intempéries.

Nous recommandons de traiter également l'intérieur de la couronne périphérique qui présente des armatures en zone de dépassivation.

En intrados, cette intervention nécessitera une purge préalable de l'enduit. L'enduit devra ensuite être restitué car il constitue une couche protectrice notamment vis-à-vis de la stabilité au feu.

## VI. CONCLUSION

Ce rapport est rédigé dans le cadre de la mission de diagnostic avec préconisations confiée par le Service des Finances Publiques. Il concerne le Dôme en béton translucide de la cité administrative d'Evreux (Eure-27).

Ce diagnostic a pour objectif de définir les préconisations structurelles en vue d'une restauration du dôme.

### Etat des lieux

Les principaux désordres relevés sur le dôme sont :

- des épaufrures sur la corniche extérieure et sur l'intrados liées à la corrosion des armatures
- des fissures superficielles causées par le retrait du béton sur l'extrados
- la fissuration de trois pavés de verre
- des traces d'infiltration d'eau ayant créé des auréoles blanchâtres,
- un encrouement superficiel de l'épiderme extérieur du dôme
- des recouvrements d'espèces biologiques de type mousse et lichens

Des analyses sur les bétons ont été menées par le laboratoire BPE et dont les conclusions sont les suivantes :

- le béton est de bonne qualité et globalement en bon état de conservation
- le béton est relativement peu poreux par rapport aux valeurs usuelles
- le front de carbonatation n'a pas dépassé l'enrobage des armatures hormis au niveau de la couronne périphérique où 2% des armatures se trouve en zone de dépassements
- les analyses à caractère pathologique font état de teneurs en composés chlorés, sulfatés et alcalins très largement inférieurs aux seuils critique définis par les normes en vigueur
- les épaisseurs moyennes d'enrobages sont comprises entre 16 et 44 mm. Cependant, certaines armatures présentent un enrobage inférieur à 10mm.
- les dépôts blanchâtres sont causés par la migration de la calcite via les eaux d'infiltration.

Nous pouvons conclure que les désordres sont principalement liés au vieillissement naturel du béton. Notons cependant que l'épiderme extérieur ne garantit plus une étanchéité parfaite du dôme ce qui favorise l'infiltration d'eau et ainsi la corrosion des armatures, l'éclatement du béton et le développement d'auréole de calcite en surface.

Afin de garantir la pérennité de l'ouvrage nous préconisons de procéder aux interventions suivantes :

- un nettoyage du parement extérieur afin de supprimer tous les recouvrements biologiques et encrouement. On pourra

procéder à un nettoyage par nébulisation ou cryogénie ou par l'application d'un cataplasme.

- le nettoyage et brossage du parement intérieur pour supprimer les efflorescences de calcite
- le remplacement des pavés fissurés
- la révision des joints des pavés et réfection si nécessaire avec un mastic adapté
- une restauration du béton comprenant :
  - o la mise à nue et le traitement des armatures corrodées
  - o la reprise des bétons avec un mortier adapté
- un traitement préventif par l'application d'un produit hydrofuge

Les préconisations décrites dans ce document ne peuvent en aucun cas être considérées comme des études abouties pouvant servir d'étude d'exécution. Elles sont définies dans le cadre d'une mission de diagnostic.

Ces études de diagnostic doivent être complétées par la mission de maîtrise d'œuvre. Elles seront notamment mises à jour au regard des études complémentaires à mener.

## LISTE DES DOCUMENTS JOINTS AU RAPPORT

Ce rapport est accompagné des documents suivants :

- Diagnostic sanitaire sur les éléments béton, BPE, 31/07/2023

En l'absence de ces documents, cette copie du rapport n'est pas complète.

A Paris, le 31 octobre 2023





(27) – EVREUX

## **DOME DE LA CITE ADMINISTRATIVE**

Diagnostic sanitaire des éléments  
en béton

Caractérisation physico-chimique et  
pathologique des bétons

Page intentionnellement blanche



## (27) – EVREUX

### DOME DE LA CITE ADMINISTRATIVE

Diagnostic sanitaire des éléments en béton

Caractérisation physico-chimique et pathologique des bétons en œuvre

### ASSISTANCE SCIENTIFIQUE AU DIAGNOSTIC

Maîtrise d'ouvrage : **FINANCE PUBLIQUE – CITE ADMINISTRATIVE – Monsieur François GUINCETRE** – Boulevard Georges Chauvin – CS50012 – 27 020 EVREUX Cedex

Maitrise d'œuvre : **BMI** – 30, rue Charles de Gaulles – 94 140 ALFORTVILLE



# SOMMAIRE

---

<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>TEXTES DE REFERENCE</b>	<b>6</b>
<b>CONSTAT INITIAL – PRINCIPAUX FCAIES D'ALTERATION</b>	<b>7</b>
<b>DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES</b>	<b>12</b>
METHODOLOGIE ET PRINCIPE D'AUSCULTATION	12
RELEVÉ DES AUSCULTATIONS GEOPHYSIQUES	13
<b>CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES BETONS</b>	<b>17</b>
PROGRAMME ANALYTIQUE	17
REFERENCEMENT DES ECHANTILLONS POUR ANALYSES EN LABORATOIRE	17
LOCALISATION DES ZONES DE PRELEVEMENT	17
PRINCIPE DES ESSAIS DE CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE	18
PRINCIPE : ANALYSE DE COMPOSITION ELEMENTAIRE PAR XRF	18
PRINCIPE : CARACTERISATION PETROPHYSIQUE DES BETONS	18
PRINCIPE : DETERMINATION DE LA TENEUR EN CIMENT	18
PRINCIPE : DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU	18
PRINCIPE : RESISTANCE MECANIQUE DES BETONS A LA COMPRESSION	18
RESULTATS ANALYTIQUES	19
SUR LA QUALITE ET LA COMPOSITION DU BETON EN ŒUVRE	20
<b>CARACTERISATION PATHOLOGIQUE DES BETONS</b>	<b>23</b>
PROGRAMME ANALYTIQUE	23
REFERENCEMENT DES ECHANTILLONS POUR ANALYSES EN LABORATOIRE	23
EVALUATION PATHOLOGIQUE DES BETONS EN LABORATOIRE	24
PRINCIPE : MESURE DE L'ENROBAGE DES ACIERS ET REPARTITION	24
PRINCIPE : MESURE DES PROFONDEURS DE CARBONATATION	24
PRINCIPE : MESURE DE LA TENEUR EN CHLORURES LIBRES	24
PRINCIPE : MESURE DE LA TENEUR EN SULFATES SOLUBLES	24
PRINCIPE : MESURE DE LA TENEUR EN ALCALINS SOLUBLES	24
PRESENTATION DES DONNEES – ELEMENTS DE LECTURE	25
COMPLEMENT D'ANALYSE – IDENTIFICATION MINERALOGIQUE	32
COMPLEMENT D'ANALYSE – OBSERVATIONS DES HYDRATES ET FACIES [MEB]	33
SYNTHESE DES DONNEES PATHOLOGIQUES	34
<b>CARACTERISATION DES REVETEMENTS EN OEUVRE</b>	<b>38</b>
PROGRAMME ANALYTIQUE	38
REFERENCEMENT DES ECHANTILLONS POUR ANALYSES EN LABORATOIRE	38
ILLUSTRATION DES ZONES DE PRELEVEMENT	38
ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DU MORTIER ENDUIT	39
OBSERVATIONS ET ANALYSES EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE	41
<b>ETAT GENERAL DES BETONS &amp; PERSPECTIVES</b>	<b>42</b>
<b>PROPOSITIONS DE TRAITEMENTS</b>	<b>43</b>
TRAITEMENT CURATIF [TC]	43
TRAITEMENT PREVENTIF – PROTECTION DE SURFACE [TP]	44



# INTRODUCTION

A la demande de Monsieur François GUINCETRE représentant la DIRECTION DEPARTEMENTALE DES FINANCES PUBLIQUES EURE (DDFIP) et sous la maîtrise d'œuvre du bureau d'études BMI, le laboratoire BPE a été chargé de réaliser des investigations analytiques sur les structures en béton armé formant le dôme de la Cité Administrative d'Evreux (27), afin de définir les caractéristiques physico-chimiques des matériaux et les éventuelles pathologies associées.

Les résultats présentés dans ce rapport font suite aux investigations réalisées in-situ et en laboratoire et font suite au programme préétabli avec le demandeur référencé MTPBE2301112V1 en date du 06 février 2023.

La caractérisation des matériaux en œuvre est réalisée en deux étapes ; une étape sur site visant à déterminer les paramètres liés à l'environnement dans lequel sont édifiés les différentes installations et une étape en laboratoire visant à qualifier la nature et les performances des matériaux.

Les investigations ont comme objectif de renseigner sur les dispositions constructives des différents éléments des ouvrages et d'évaluer l'état sanitaire des matériaux en œuvre. Ces éléments permettront de compléter le diagnostic de l'ouvrage, d'évaluer sa durabilité et de déterminer les potentielles solutions de traitement et régénération adaptées. Les opérations proposées se décomposent en quatre étapes d'investigation, déclinées comme suit :

1. Etat initial et aperçu des dispositions constructives,
2. Caractérisation physico-chimique des bétons,
3. Caractérisation pathologique des bétons,
4. Caractérisation des revêtements en œuvre.

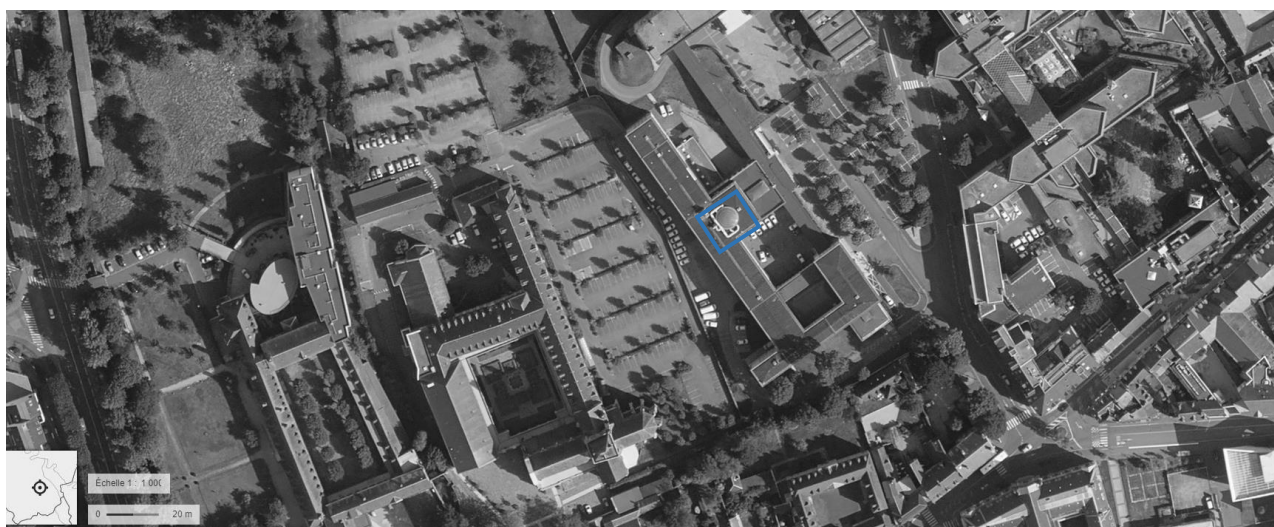


Figure 1: Localisation du dôme de la cité administrative – Source: / Géoportail

Note sur la présentation du rapport : Chaque type d'investigation fera l'objet d'un chapitre reprenant l'ensemble des analyses et investigations. Ce rapport est optimisé pour une impression recto-verso.

## TEXTES DE REFERENCE

### Documents généraux

- Ministère de la Culture et de la Communication. Direction de l'Architecture et du Patrimoine. Mission étude et travaux. Travaux de restauration des Monuments Historiques. Guide de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre.
- GranDuBé – Grandeurs associées à la durabilité des bétons – Presse de l'école nationale des Pont et Chaussées – Gillette Arliguie et Hugues Hornain – Edition 2007
- Documents scientifiques et techniques de l'AFGC – Edition AFGC - « Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion » (Novembre 2003)
- Norme NF EN 206-1 : Béton : spécification, performances, production et conformité
- Norme NF P 18-011 : Classification des environnements agressifs
- AFPC-AFREM – Durabilité des bétons : Mode opératoire recommandé pour la méthodologie d'approche de la microstructure des bétons par les techniques microscopiques, sous la direction de J.P. Ollivier, LMDC, Toulouse, décembre 1997.

### Mesure de la profondeur de carbonatation

- RILEM TC 56-MHM, Recommendations: CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth, Materials and structures, Vol 21, N°6, November 1998, pp 453-455.
- NF EN 14630 « Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode de la phénolphthaléine ».
- XP 18-458 « Essai pour béton durci – Essai de carbonatation accélérée – Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté » (article 6.5).
- CEN/TS 12390-10 Spécification Technique: «Testing hardened concrete – Part 10 : Determination of the relative carbonation resistance of concrete».

### Carottages et essais à la compression

- NF EN 12390-1 Essais sur béton durci – Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules.
- NF EN 12390-3 Essais sur béton durci – Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.
- NF EN 12504-1 Essais pour béton dans les structures – Partie 1 : carottes - prélèvement, examen et essais en compression.

### Essai de porosité et de masse volumique sur le béton durci

- NF P18-459 - Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique
- AFPC-AFREM – Durabilité des bétons : Mode opératoire recommandé pour la détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau, sous la direction de J.P. Ollivier, LMDC, Toulouse, décembre 1997, pp 165-167

### Dosage en ciment

- GranDuBé – Grandeurs associées à la durabilité des bétons : Mode opératoire recommandé pour la détermination du dosage en ciment dans un béton durci, sous la direction de Ginette Arliguie et Hugues Hornain, Presses de l'École Nationale des Ponts et chaussées, Paris, 2007, pp 305-314.

### Dosage des chlorures

- AFPC-AFREM – Durabilité des bétons : Mode opératoire recommandé pour le prélèvement d'échantillons (poudres) pour la mesure de teneur en chlorure dans le béton, sous la direction de J.P. Ollivier, LMDC, Toulouse, décembre 1997, pp 159-164.
- AFPC-AFREM – Durabilité des bétons : Mode opératoire recommandé pour l'extraction et le dosage des chlorures libres (extraits à l'eau) et totaux dans le béton, sous la direction de J.P. Ollivier, LMDC, Toulouse, décembre 1997, pp 165-167.
- GranDuBé – Grandeurs associées à la durabilité des bétons : Mode opératoire recommandé pour l'extraction et le dosage des chlorures libres et totaux dans un béton durci, sous la direction de Ginette Arliguie et Hugues Hornain, Presses de l'École Nationale des Ponts et chaussées, Paris, 2007, pp 357-362.
- Baroghel-Bouny. B. Capra et S. Laurens, dans "La durabilité des armatures et du béton d'enrobage" (in La durabilité des bétons, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2008, pp. 303-385) indiquent un seuil pathogène de 0.4% par rapport à la masse de ciment pour un béton non carbonaté.
- Norme NF EN 14629 – Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage du taux de chlorure d'un béton durci

### Dosage des sulfates

- Norme NF EN 197-1 – Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants



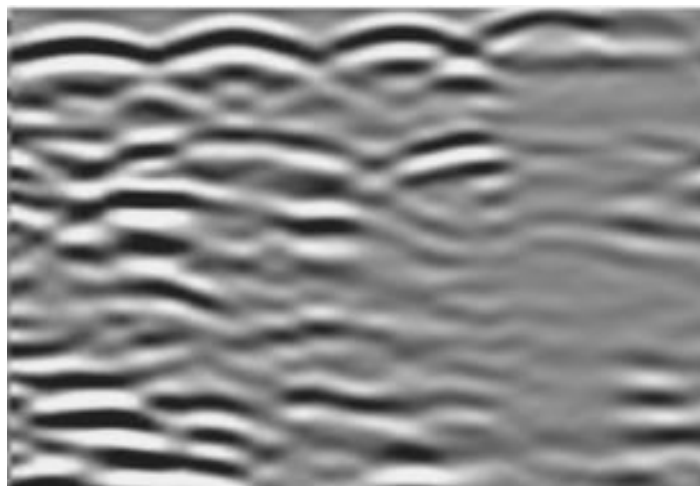
## CONSTAT INITIAL – PRINCIPAUX FCAIES D'ALTERATION



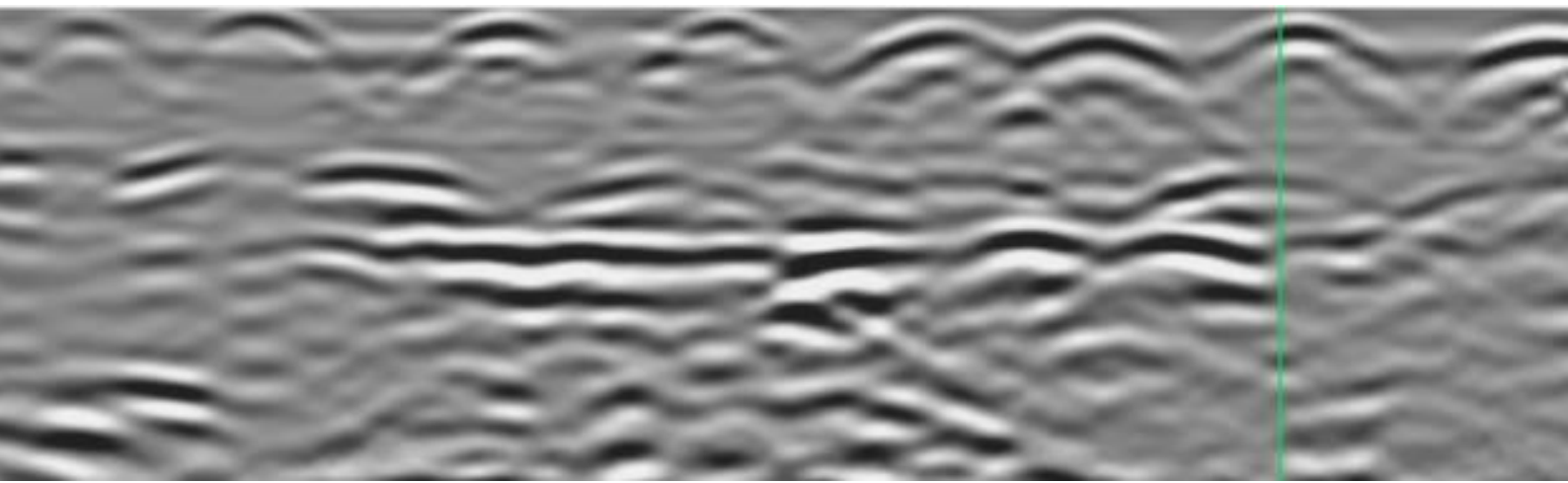
[A] : épaufrure induite par le gonflement par corrosion des armatures sous-jacentes. [B] : détail d'une perte de matière laissant apparaître une armature sous-jacente corrodée. [C] : détail d'une efflorescence blanche [D] : détail de concrétion saline sur l'intrados du dôme. [E] : détail d'une fissure affectant l'extrados du dôme.

Page intentionnellement blanche





# DISPOSITION CONSTRUCTIVES



Page intentionnellement blanche



## DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

---

**Les auscultations non destructives des éléments en béton armé en œuvre ont comme objet de renseigner la maîtrise d'ouvrage et son bureau d'étude sur les principes constructifs de l'ouvrage. Ces données serviront également de base pour l'évaluation des paramètres de durabilité des bétons.**

### Méthodologie et principe d'auscultation

Dans le cadre de la mission confiée au laboratoire BPE, les différentes techniques d'auscultation non destructives employées sont les suivantes :

- **Auscultation au Ferroskan®** HILTI PS200,
- **Auscultation Radar** – PROCEQ GPR 8000.

Pour déterminer les principes constructifs et plus précisément l'enrobage des armatures des différents éléments de l'ouvrage ont été utilisées deux techniques ; l'auscultation de surface visant principalement à déterminer la taille et la géométrie des aciers (jusqu'à une profondeur de 70 mm) et l'auscultation électromagnétique visant à détecter la localisation des différents aciers y compris au cœur des ouvrages (jusqu'à une profondeur de 600 mm).

Les investigations ont été réalisées par auscultations au Ferroskan®, permettant de détecter les armatures métalliques au sein d'un matériau, à la fois au niveau des surfaces horizontales et verticales. Cette technologie est composée d'une cellule émettrice, qui génère un champ magnétique à des intervalles de temps réguliers. Lorsque le signal rencontre un élément métallique, ce dernier induit un champ magnétique secondaire, qui est ensuite détecté et enregistré par la cellule réceptrice. Les signaux sont alors analysés au niveau de l'unité d'acquisition et fournissent un ensemble d'informations sur la répartition géographique, la profondeur d'enrobage et le diamètre des armatures métalliques. Dans le cas de deux armatures alignées et/ou accolées cette technique ne permet pas de les distinguer et par conséquent le diamètre donné peut être erroné

Le radar d'auscultation (GPR pour Ground Penetrating Radar ou géoradar) est composé d'une unité d'acquisition de données radar de marque PROCEQ modèle GPR8000,

Le radar fonctionne sur le principe de l'étude de la propagation d'une onde électromagnétique dans le milieu étudié. Le système envoie une onde (un pulse) de très courte durée dans le matériau et enregistre l'amplitude et le temps d'arrivée de chaque onde réfléchi. Les réflexions sont produites au droit de tout changement dans les propriétés de conduction du courant électrique du milieu (constante diélectrique). L'amplitude de la réflexion est déterminée par le contraste de permittivité diélectrique entre l'encaissant et la cible. Une partie de l'énergie envoyée continue aussi à se propager dans le milieu jusqu'à ce qu'elle soit trop atténuée pour être détectée. L'atténuation du signal est ainsi très variable et dépend grandement de la conductivité électrique des matériaux.

#### Addendum sur la technique d'interférométrie radar

La détection d'éléments métalliques par la technique d'interférométrie électromagnétique est une technique de reconnaissance non destructive présentant un certain nombre de limites. Il est ainsi impossible de distinguer deux aciers parfaitement alignés ou deux aciers parfaitement accolés. L'auscultation est également limitée par les dimensions de l'appareil ne permettant pas de détection sur les jonctions d'éléments. L'onde électromagnétique peut être gênée par différents facteurs comme :

- la présence d'eau ou d'humidité trop importante,
- la présence d'un isolant ou d'une étanchéité,
- la présence de fibres métalliques,
- la présence d'une lame d'air.

En l'absence de sondages mécaniques, les diamètres des armatures ne peuvent être évalués qu'avec une technique complémentaire de type Ferroskan. Cette évaluation de diamètre permet une précision de  $\pm 2$  mm.

## Relevé des auscultations géophysiques

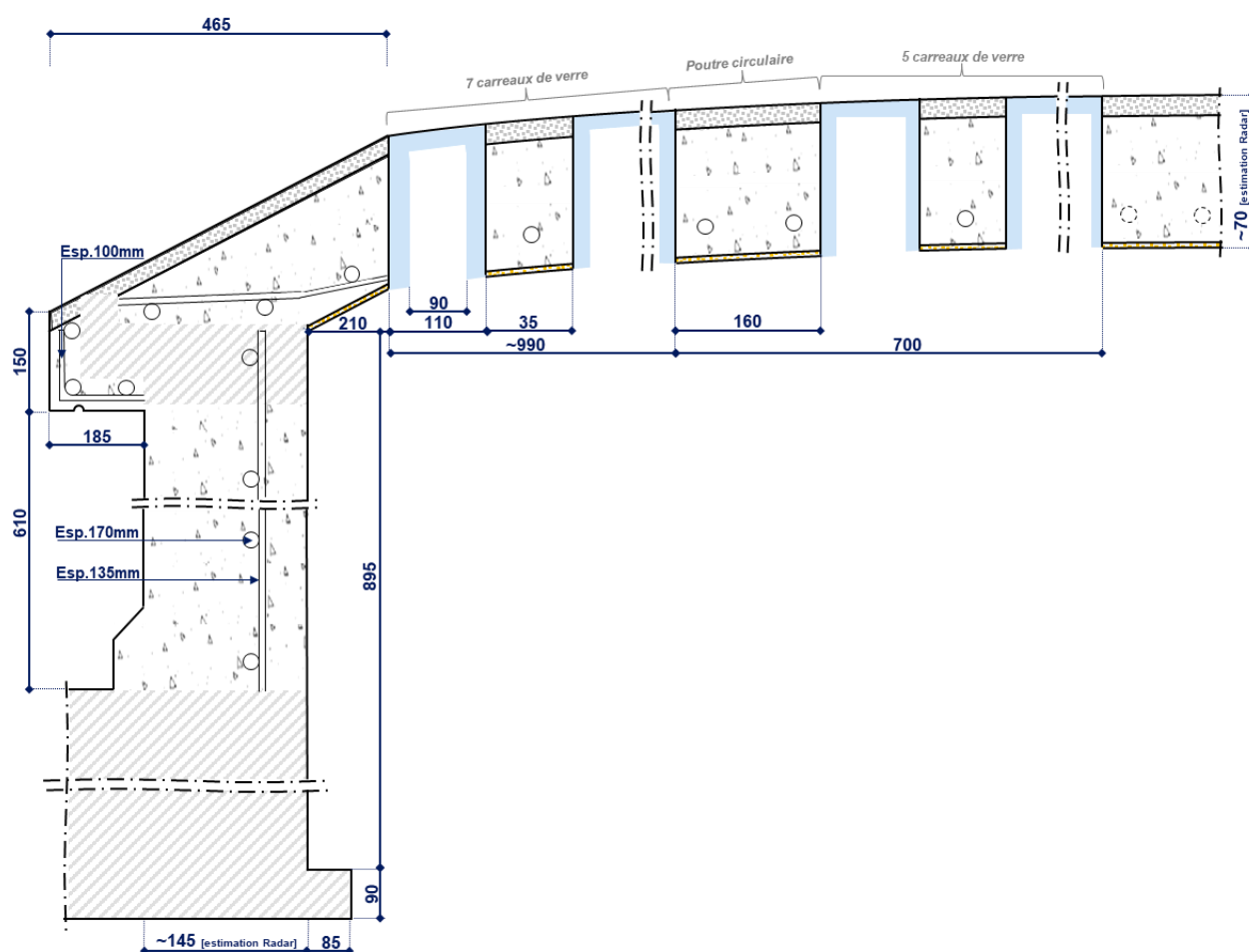
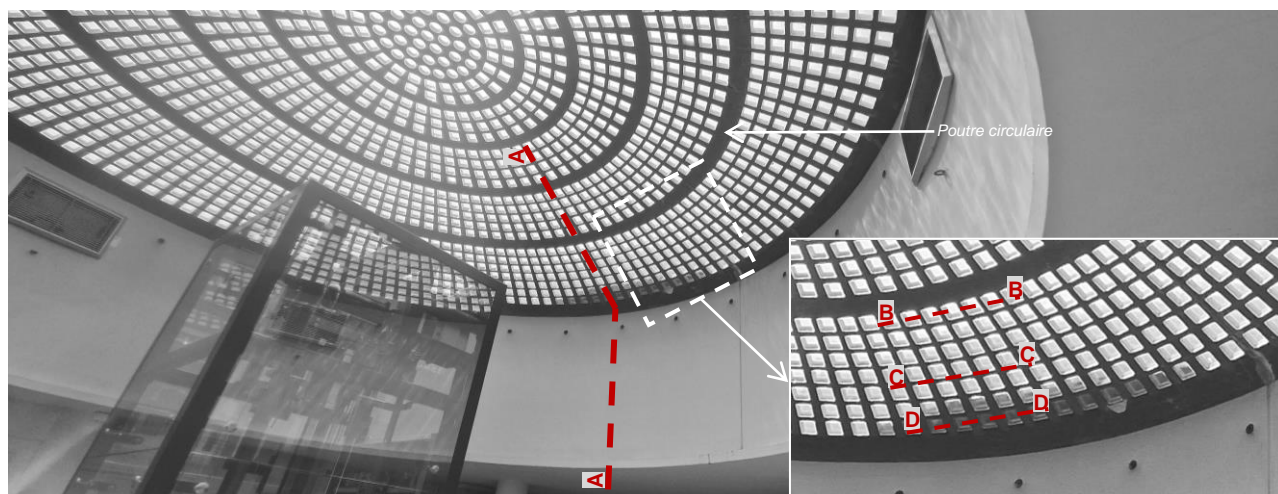


Figure 2: Coupe de principe AA

<b>Légende:</b>	Béton	Armatures	Zone non auscultable	Carreau de verre
	Mortier type chaux (ép. 2mm)	Micro-béton (ép. 2mm)	Armatures supposées	

Note : Les mesures sont données en millimètres.

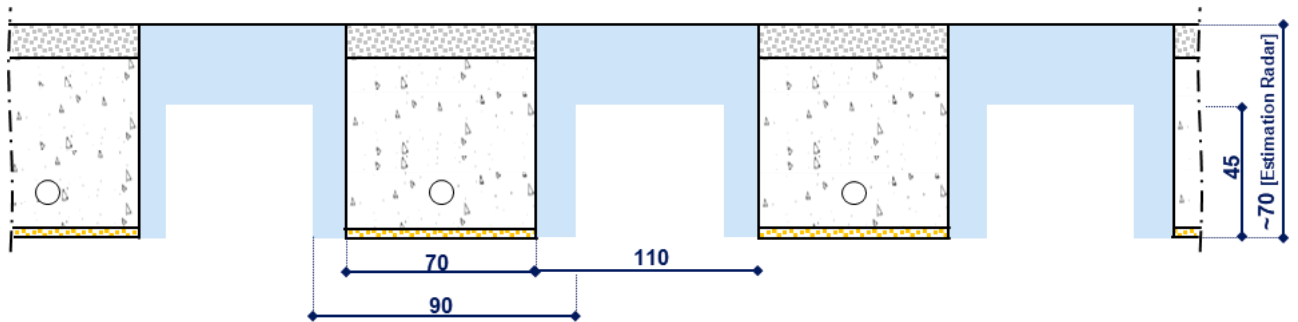


Figure 3: Coupe de principe **BB**

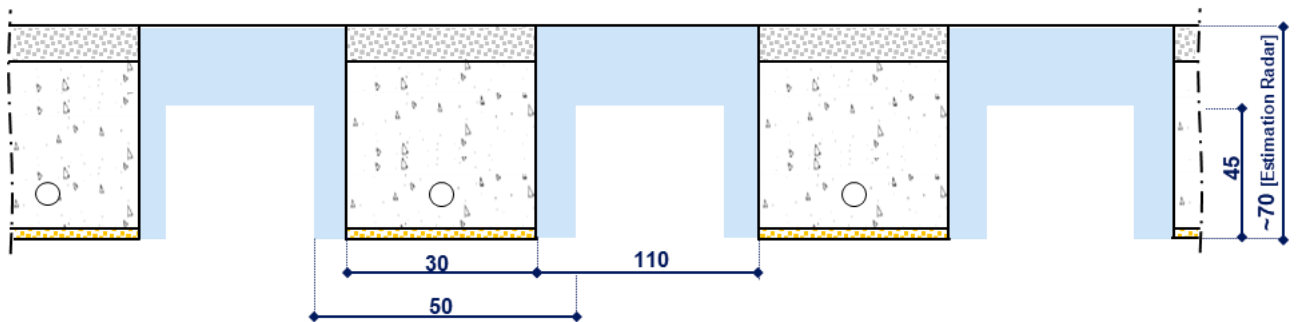


Figure 4: Coupe de principe **CC**

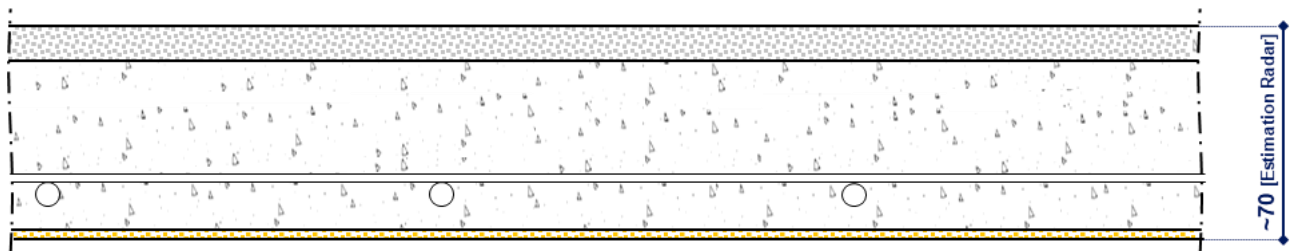
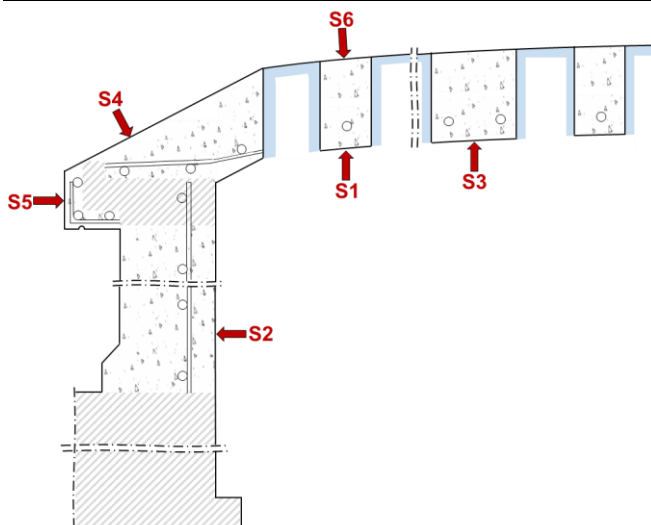


Figure 5: Coupe de principe **DD**

## Etude statistique des enrobages au Ferroskan

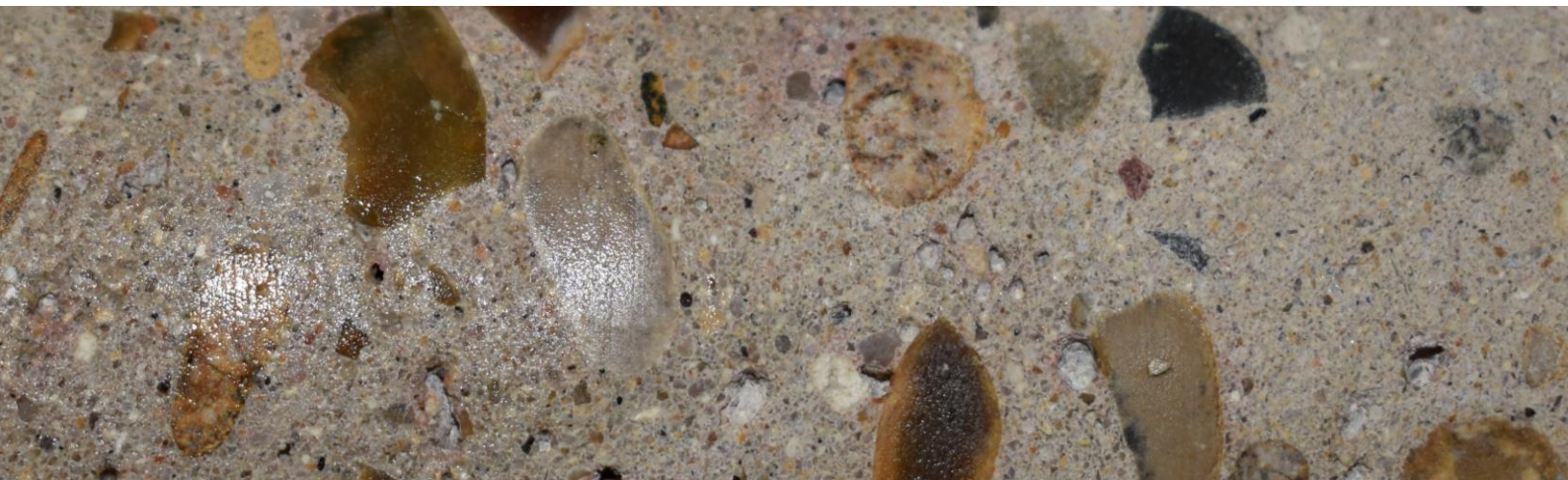


Zone	Enrobage	
	Minimum	Moyen
<b>S1</b> Réseaux côté Ouest	10	18
<b>S2</b> Couronne côté Ouest	14	44
<b>S3</b> Poutre circulaire côté Sud	8	16
<b>S4</b> Réseaux côté Nord	6	33
<b>S5</b> Couronne dôme côté Nord	28	42
<b>S6</b> Réseaux dôme côté Sud	26	37





# ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES



# CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES BETONS

Les analyses physico-chimiques des bétons en œuvre ont pour objet de renseigner la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre sur les différentes familles de bétons ayant servies à l'édification des éléments de l'ouvrage. Les analyses servent également de base à l'exploitation des données relatives au comportement pathologique afin d'établir les paramètres de durabilité visant à établir les traitements possibles.

## Programme analytique

Les analyses proposées pour la caractérisation physico-chimique des bétons, sont les suivantes :

- Mesure de la **porosité ouverte** et de la **masse volumique apparente**,
- Analyses **élémentaires de composition** par spectrométrie de fluorescence des rayons X,
- Détermination des **teneurs en ciment** par la méthode de la silice soluble et méthode des inertes,
- **Détermination de la résistance à la compression** des bétons.

## Référencement des échantillons pour analyses en laboratoire

Dans le cadre de la caractérisation des bétons en œuvre, a été réalisé un prélèvement sur l'ouvrage par carottage à la couronne diamantée de 60 mm. Le prélèvement a été enregistré sous la référence suivante :

- **PBE231138-9** : « **C1** – Béton formant le dôme – Extradados du dôme »

## Localisation des zones de prélèvement

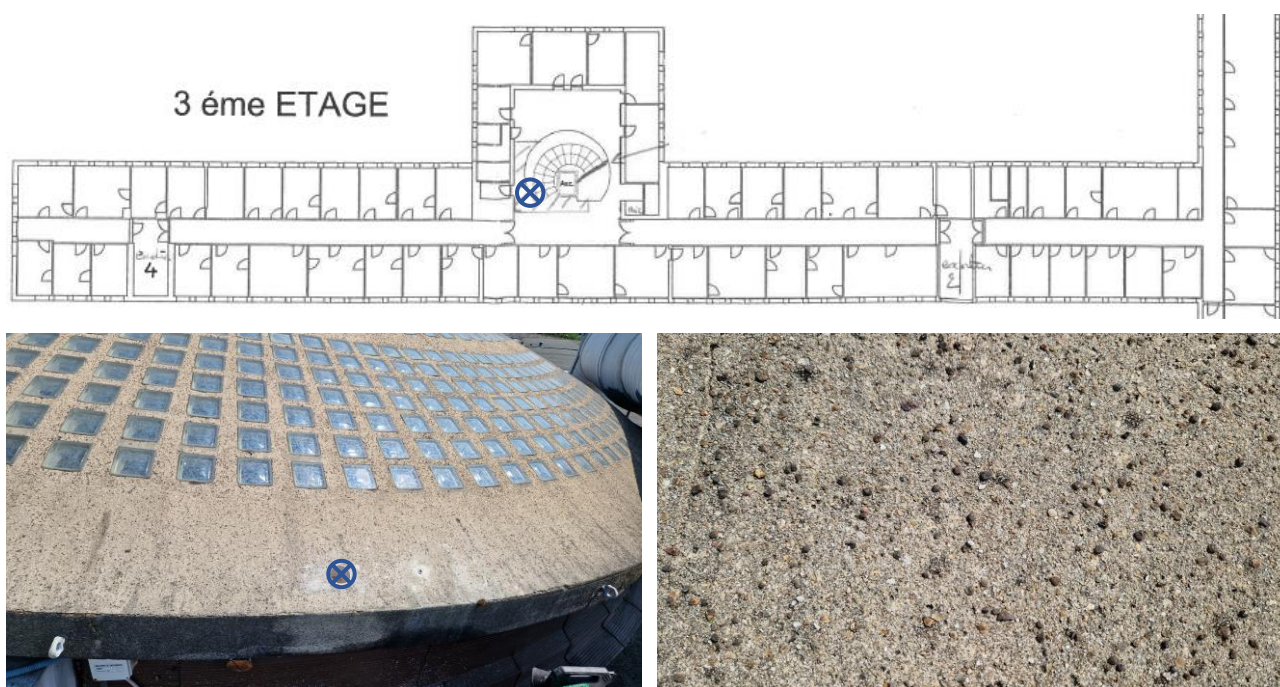


Figure 6: Localisation de la zone de prélèvement



## Principe des essais de caractérisation physico-chimique

### Principe : Analyse de composition élémentaire par XRF

*Matériel utilisé* : Spectromètre de fluorescence des rayons X NITON XR3TGOLDD+

*Norme* : NF EN 15309

La composition élémentaire des échantillons a été déterminée par spectrométrie de fluorescence des rayons X. Il s'agit d'une technique permettant, par les propriétés physiques des matériaux en les irradiant avec un faisceau de rayons X, d'obtenir une composition élémentaire quantitative exprimée en poids d'oxyde. Les analyses ont été réalisées avec un spectromètre NITON XR3TGOLDD+ avec une puissance de 50keV préalablement calibré de l'élément Magnésium à l'élément Uranium. Les résultats des principaux éléments sont présentés dans les tableaux à suivre.

### Principe : Caractérisation pétrophysique des bétons

*Matériel utilisé* : Cloche à vide, pompe à vide et balance KERN 440 (6000g/0,1g)

*Norme* : AFREM/GranDuBé

La mesure de la porosité s'effectue sur un matériau solide et insoluble par pesée hydrostatique. Elle s'exprime en pourcentage, par le rapport du volume des vides au volume total et indique la grandeur du volume des pores accessibles à l'eau par le volume apparent de l'éprouvette. La masse volumique apparente renseigne sur le volume total des vides, d'où l'on déduit la porosité. Les essais ont été réalisés selon les recommandations du GranDuBé.

### Principe : Détermination de la teneur en ciment

*Matériel utilisé* : Spectromètre d'émission atomique AGILENT MP AES 4210  
et analyseur thermogravimétrique LECO TGA701

*Norme* : AFREM/GranDuBé

Les résultats relatifs à la quantification de la silice soluble contenue dans les matériaux sont présentés ci-dessous, avec une précision relative de 10 %. La quantification a été réalisée selon les recommandations du GranDuBé après minéralisation à l'acide nitrique dilué à 0,24M. Les résultats présentés ci-dessous correspondent au pourcentage massique de la silice soluble SiO<sub>2</sub> dans l'échantillon considéré en intégrant une teneur en silice soluble de référence dans le ciment de 23% (ciment équivalent type CEM II). La méthode des inertes consiste à réaliser une analyse thermogravimétrique et une détermination du résidu insoluble par attaque acide. L'analyse thermogravimétrique est une technique permettant de renseigner sur les différentes phases en présence dans les mortiers notamment les teneurs en eau liée, les teneurs en composés organiques et les teneurs en dioxyde de carbone. Ces déterminations sont réalisées avec un analyseur permettant une mesure continue de la perte de masse en fonction de la température sur une gamme de 80°C à 950°C avec une vitesse de montée en température de 10°C/min et des paliers jusqu'à masse constante à 450°C, 550°C et 950°C.

### Principe : Détermination de la teneur en eau

La détermination de la teneur en eau est réalisée par calcul à partir des données pétrophysiques (masse volumique et porosité) et des données relatives à l'analyse thermogravimétrique (teneur en eau liée). Les teneurs en eau liées indiquées ci-après correspondent à une moyenne de la méthodologie proposée par l'AFREM en intégrant une teneur en air entraîné de 3% et une teneur d'absorption des granulats de 2%.

### Principe : Résistance mécanique des bétons à la compression

*Matériel utilisé* : Presse hydraulique MATEST 3000 kN

*Norme* : NF EN 12390-3

Les analyses concernant ces performances consistent à soumettre les échantillons à des pressions croissantes jusqu'à rupture de ces derniers. La valeur de pression enregistrée lors de la rupture permet, par analogie à la surface testée de déterminer la contrainte de rupture exprimée en N/mm<sup>2</sup> ou en MPa.

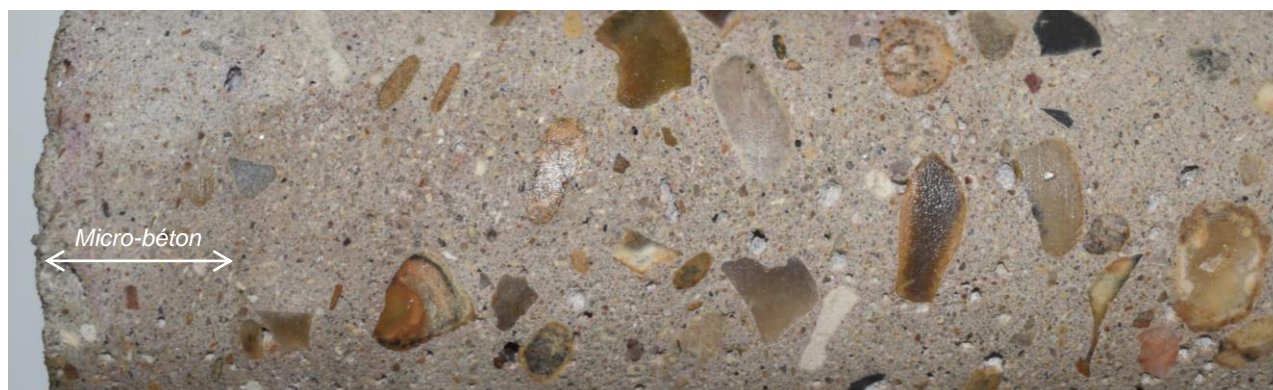


Figure 7 : Cliché macroscopique du prélèvement de béton analysé

ANALYSE DE LA COMPOSITION ELEMENTAIRE PAR XRF									
MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rapport Si/CA
< 0,01	1,28	27,6	1,59	0,03	0,37	38,7	0,16	1,34	0,47
CARACTERISATION PETRO-PHYSIQUE									
POROSITE OUVERTE (%)							13,0		
MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (KG/M <sup>3</sup> )							2 132		
DETERMINATION DE LA TENEUR EN CIMENT									
TENEUR EN CIMENT METHODE SI.SOL (%)							18,1		
TENEUR EN CIMENT METHODE INERTES (%)							16,6		
TENEUR EN CIMENT RETENUE (%)							17,4		
TENEUR EN CIMENT (KG/M <sup>3</sup> ) <sup>[1]</sup>							370 ± 37		
DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU									
TENEUR EN EAU STRUCTURELLE (%)							3,06		
TENEUR EN EAU (%)							8,01		
TENEUR EN EAU (KG/M <sup>3</sup> )							171		
RAPPORT E/C							0,46		
CARACTERISATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION									
ELANCEMENT							1,58		
VALEUR BRUTE (MPa)							29,3		
FACTEUR DE CORRECTION							1,15		
RESISTANCE CORRIGEE <i>f</i> <sub>is</sub> (MPa)							25,6		

Tableau 1 : Résultats des analyses de caractérisation physico-chimique du béton en œuvre

<sup>[1]</sup> Teneur exprimée en kg/m<sup>3</sup> avec une masse volumique défini précédemment.

<sup>[2]</sup> Correction réalisée sur l'éclatement et le diamètre des éprouvettes le cas échéant selon les figures NA.1 et NA.2 de la norme NF EN 13791/CN. Correction non applicable sur échantillon dont l'éclatement est inférieur à 1 ou s'il s'agit d'un cube. La résistance caractéristique à la compression des bétons  $f_{ck, is, cyl}$  ne peut être calculée en méconnaissance des zones et aires d'essais.

## Sur la qualité et la composition du béton en œuvre

Les observations mettent en évidence un béton élaboré à partir d'une phase liante de teinte gris clair et d'un squelette granulaire constitué d'un sablon et de granulats de faciès émoussé suggérant une origine alluvionnaire dont la granulométrie maximale n'excède pas 17 mm de diamètre. Notons la présence de nombreux pores, non interconnectés, pouvant atteindre 6 mm de diamètre.

Un micro-béton d'une épaisseur de 17 millimètres a été observé en surface du prélèvement. Ces caractéristiques physico-chimiques sont relativement similaires au béton en œuvre excepté une granulométrie plus faible ( $D_{max}$  : 2 millimètres). Les analyses relatives à ce matériau sont présentées dans la partie « Caractérisation des revêtements en œuvre (page 38).

Les analyses physico-chimiques mettent en évidence une teneur en ciment de  $408 \text{ kg/m}^3$  pour une masse volumique apparente moyenne de  $2\,132 \text{ kg/m}^3$  lui conférant une porosité de 13,0 %. Ces dernières valeurs, seront utilisées pour l'exploitation pathologique des bétons.

Les essais relatifs au comportement mécanique réalisés sur un échantillon mettent en évidence une résistance mécanique brute de 29,3 MPa. En considérant la norme NF EN 13791/CN, la résistance  $f_{ck, is}$  calculée équivaut à 25,6 MPa.





# ANALYSES PATHOLOGIQUES



# CARACTERISATION PATHOLOGIQUE DES BETONS

Ces investigations analytiques s'inscrivent dans le cadre de l'accompagnement technique d'évaluation sanitaire des structures et ont comme objectif d'établir l'état sanitaire des bétons, d'en établir les paramètres de durabilité et de réaliser une caractérisation visant à déterminer les traitements possibles. Ces investigations réalisées sur site et en laboratoire ont notamment comme objectif de renseigner le maître d'ouvrage et son bureau d'étude sur :

- **La disposition des aciers et leur niveau de protection**
- **Les mesures de carbonatation des bétons,**
- **Identifier et préciser le caractère évolutif des altérations le cas échéant.**

## Programme analytique

Dans le cadre de la mission confiée au laboratoire BPE, les différentes analyses réalisées pour la caractérisation des agents pathogène sont les suivantes :

- **Dosage des ions potassium et sodium (alcalins libres)** par spectrométrie d'émission atomique – résultats exprimés en % et kg/m<sup>3</sup>, selon les recommandations du GranDuBé,
- **Dosage des ions sulfates** par chromatographie ionique **et des ions chlorures** par titrage potentiométrique selon les recommandations du GranDuBé,

## Référencement des échantillons pour analyses en laboratoire

Dans le cadre des caractérisations des pathologies, ont essentiellement été réalisés des prélèvements par perçage [Sx] par pas successifs en fonction des épaisseurs moyennes d'enrobage des aciers. Le détail des prélèvements est indiqué dans le tableau à suivre :

REFERENCE DES ECHANTILLONS	DESIGNATION
PBE231138 – 2	<b>S1</b> : Intrados du dôme – Réseaux côté Ouest
PBE231138 – 3	<b>S2</b> : Intrados du dôme – Couronne côté Ouest
PBE231138 – 4	<b>S3</b> : Intrados du dôme – Réseaux côté Sud
PBE231138 – 5	<b>S4</b> : Extrados du dôme – Réseaux côté Nord
PBE231138 – 6	<b>S5</b> : Extrados du dôme – Couronne côté Nord
PBE231138 – 7	<b>S6</b> : Extrados du dôme – Réseaux côté Sud

Tableau 2 : Référencement des échantillons pour analyses en laboratoire



## Evaluation pathologique des bétons en laboratoire

### Principe : Mesure de l'enrobage des aciers et répartition

*Matériel utilisé :* Ferroskan PS200 et radar PROCEQ GPR8000

*Norme :* procédure interne

Mesure des épaisseurs d'enrobage des armatures par auscultation pachométrique (à effet inductif) au Ferroskan. Les résultats des mesures sont présentés sous forme de cartographie colorisée permettant une d'évaluer la profondeur d'enrobage, intégrant la position géographique des armatures, leur profondeur et une exploitation statistique sur la zone considérée. Ces investigations ont également permis d'éviter le perçage des armatures afin de garantir l'intégrité des structures. La profondeur de détection est de 90 mm.

### Principe : Mesure des profondeurs de carbonatation

*Matériel utilisé :* Solution de phénolphthaléine

*Norme :* NF EN 13295

La mesure de la profondeur du front de carbonatation est réalisée par coloration à la phénolphthaléine sur chaque zone d'investigation. Les mesures ont été réalisées sur les prélèvements par carottage. Les mesures de profondeur ont été réalisées avec une jauge de profondeur permettant d'apprécier une évaluation dimensionnelle à 0,1 mm près. Les mesures des profondeurs de carbonatation seront mises en parallèle aux mesures des épaisseurs d'enrobage des aciers de « peau » afin d'évaluer la progression du front de modification du pH.

### Principe : Mesure de la teneur en chlorures libres

*Matériel utilisé :* Titrateur automatique SI ANALYTICS TITROLINE 5000

*Norme :* AFREM/GranDuBé

L'extraction des chlorures permet de passer du matériau brut dont on veut connaître la teneur en chlorures à la solution limpide à passer dans l'appareil pour faire la mesure. La mesure se fait sur 5g d'échantillon et peut correspondre soit à de la poudre de perçage soit un carottage sur lequel la poudre est extraite par sciage. La mesure est réalisée avec le titrateur automatique à l'aide d'une solution de nitrate d'argent par ajouts dosés jusqu'au point d'équilibre. Une courbe de calibration avec des solutions étalons certifiées FISHER SCIENTIFIC est réalisée tous les 50 échantillons et un contrôle qualité (CQ) est réalisé avec un étalon certifié en milieu de gamme tous les 10 échantillons.

### Principe : Mesure de la teneur en sulfates solubles

*Matériel utilisé :* Chromatographe ionique DIONEX AQUION THERMO SCIENTIFIC

*Norme :* NF EN 196-2

L'extraction des sulfates permet de passer du matériau brut dont on veut connaître la teneur en sulfates à la solution limpide à passer dans l'appareil pour faire la mesure. Dans le cas d'un béton, la mesure se fait sur 1g d'échantillon et peut correspondre soit à de la poudre de perçage soit un carottage sur lequel la poudre est extraite par sciage. Pour le dosage des sulfates totaux, l'extraction est réalisée à l'aide d'une solution d'acide nitrique à 0,1N, pour les sulfates solubles, l'extraction est faite avec de l'eau ultra-pure. La mesure est réalisée en chromatographie ionique. Une courbe de calibration avec des solutions étalons certifiées FISHER SCIENTIFIC est réalisée tous les 50 échantillons et un contrôle qualité (CQ) est réalisé avec un étalon certifié en milieu de gamme tous les 10 échantillons.

### Principe : Mesure de la teneur en alcalins solubles

*Matériel utilisé :* Spectromètre d'émission atomique AGILENT TECHNOLOGIES 4210 MP AES

*Norme :* NF EN 196-2

L'extraction des alcalins permet de passer du matériau brut dont on veut connaître la teneur en sodium et en potassium à la solution limpide à passer dans l'appareil pour faire la mesure. La mesure se fait sur 1g d'échantillon et peut correspondre soit à de la poudre de perçage soit un carottage sur lequel la poudre est extraite par sciage. La mesure est réalisée par spectrométrie d'émission atomique ICP-AES-MP. Une courbe de calibration avec des solutions étalons certifiées FISHER SCIENTIFIC est réalisée tous les 50 échantillons et un contrôle qualité (CQ) est réalisé avec un étalon certifié en milieu de gamme tous les 10 échantillons.

## Présentation des données – éléments de lecture

Dans la suite du présent rapport d'étude, les données sont présentées sous forme de tableau reprenant l'intégralité des résultats individuels mais également sous forme graphique permettant une reconnaissance rapide de l'ensemble des paramètres pathologiques définis. Cette représentation graphique propose en abscisse la profondeur des différents événements et en ordonnée l'ampleur de l'évènement à savoir la concentration des différents éléments. Sont ainsi représentés :

**Par une armature orangée** ; la profondeur minimale d'enrobage des armatures déterminée au Ferroskan,

**Par une armature grise** ; la profondeur moyenne d'enrobage des armatures déterminée au Ferroskan,

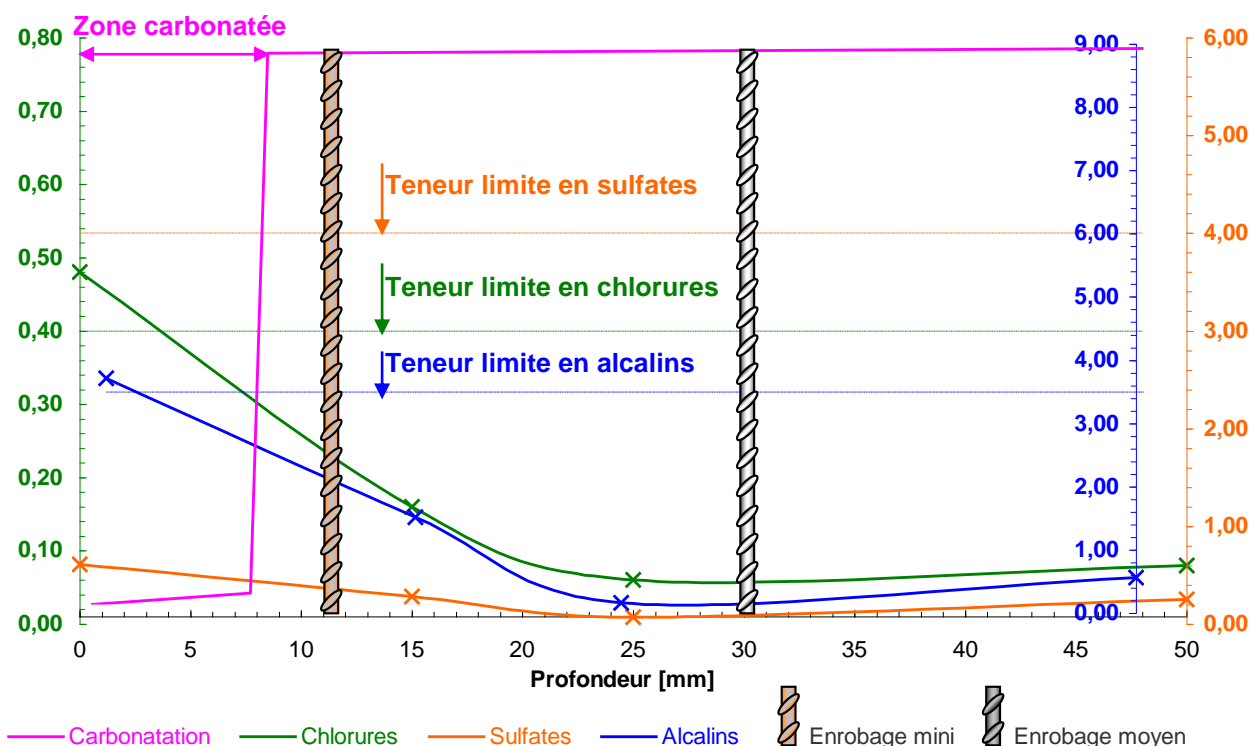
**En rose** ; la profondeur de carbonatation [Afin de préserver l'effet de passivation originel des fers à béton, il est nécessaire que la profondeur de carbonatation mesurée soit inférieure à l'épaisseur minimum d'enrobage des armatures],

**En vert** ; la concentration en chlorures solubles. Nota : la représentation de la concentration en chlorure est exprimée sur une échelle logarithmique. [En référence à la norme NF EN 206-1 traitant des bétons armés, les teneurs en chlorures dans les bétons armés doivent être limités à 0,4% exprimés en poids de ciment],

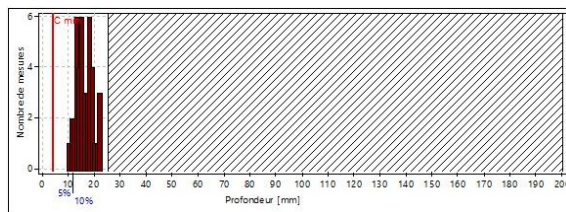
**En orange** ; la concentration en sulfates solubles [En référence à la norme NF EN 197-1, les teneurs en sulfates doivent être inférieures à 4% en poids de ciment],

**En bleu** ; la concentration en alcalins exprimée en  $\text{éq.Na}_2\text{O}$  intégrant la concentration en potassium et en sodium soluble [En référence aux recommandations de prévention des risques liés à l'alcali-réaction du LCPC, les teneurs en alcalins dans les bétons doivent être limités à 3,5  $\text{kg/m}^3$ ].

Pour chacun des polluants, est indiquée la teneur limite actuellement en vigueur dans les textes normatifs et réglementaire par une ligne de même couleur en pointillés discontinus. Ainsi, lorsque les données sont situées en deçà de cette limite, le niveau de polluants répond aux spécifications actuellement en vigueur.



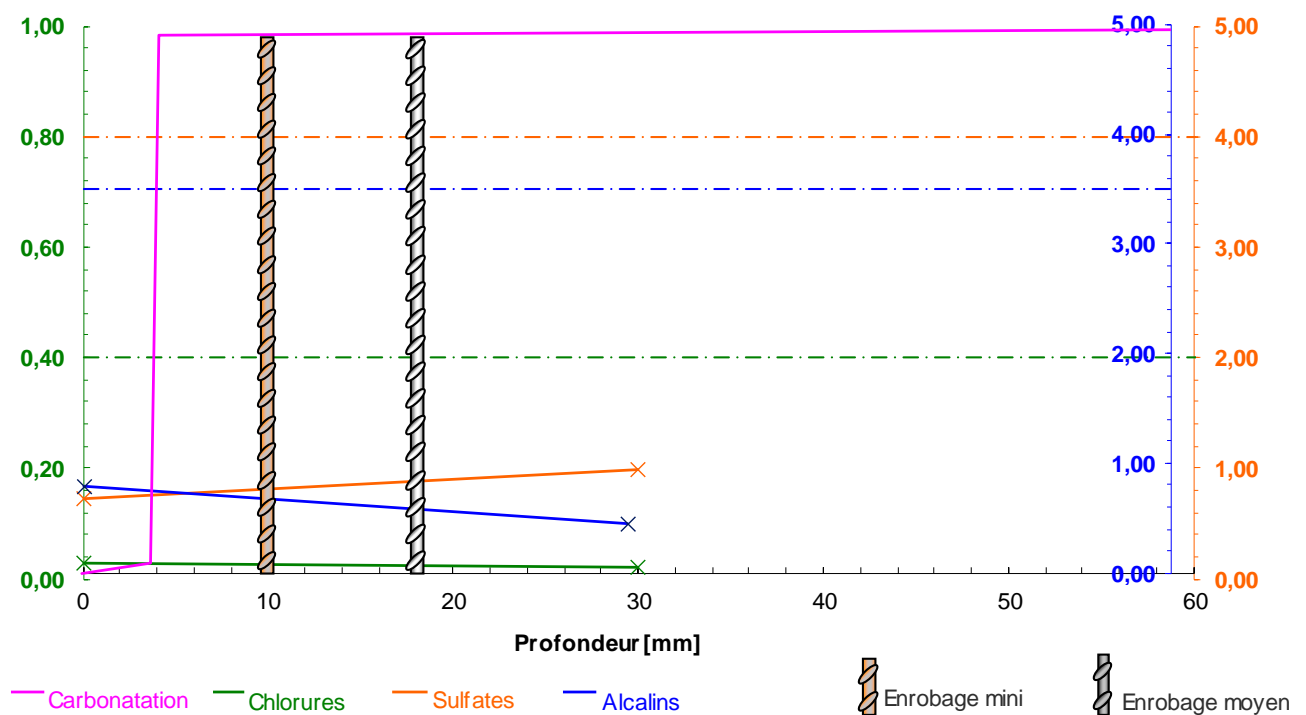
## S1 – INTRADOS DU DOME – RESEAUX COTE OUEST



Plage		Statistique Profondeur	
Limite supérieure calculée	25 mm	Minimum	10 mm
Cmin	4 mm	Maximul	22 mm
Nombre de fers en-dessous Cmin	0	Moyenne	16 mm
Nombre de fers	42	Ecart-type	3 mm
		Median	16 mm
		Quantiles 5%	12 mm
		Quantiles 10%	12 mm

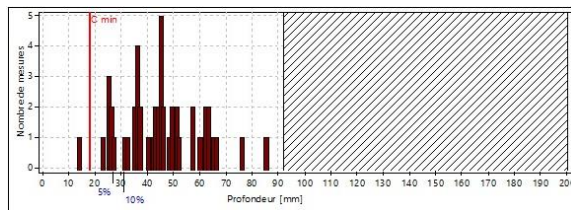
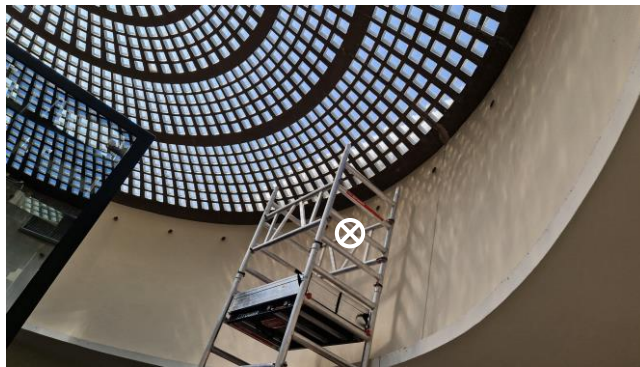
EPAISSEUR MINIMALE D'ENROBAGE (MM)	10
EPAISSEUR MOYENNE D'ENROBAGE (MM)	16
PROFONDEUR DE CARBONATATION (MM)	4
ARMATURE EN ZONE DE DEPASIVATION (%)	<1

	0-15MM	15-30MM
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLE (%/CEM)	0,03	0,02
TENEUR EN SULFATES SOLUBLE (%/CEM)	0,73	0,98
TENEUR EN ALCALINS SOLUBLES (%/CEM)	0,79	0,45





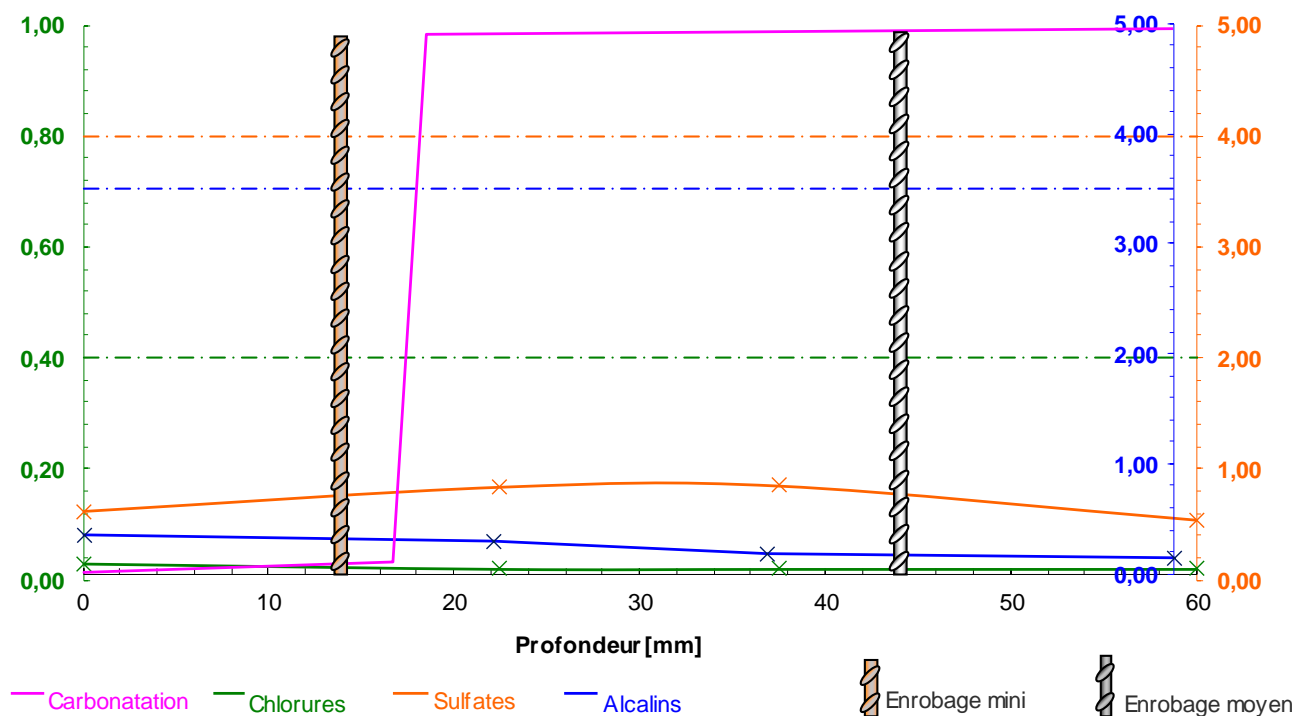
## S2 – INTRADOS DU DOME – COURONNE COTE OUEST



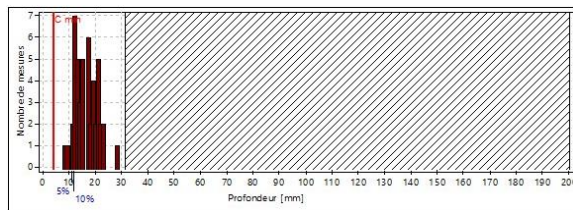
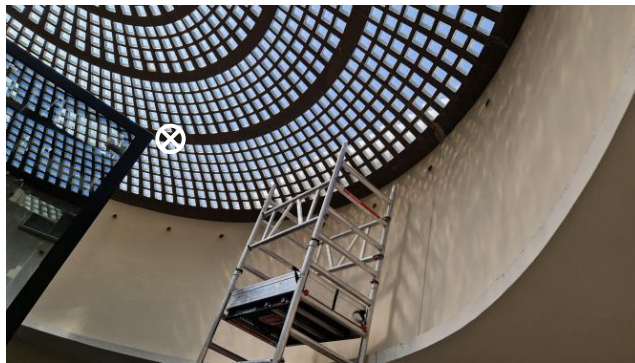
Plage		Statistique Profondeur	
Limite supérieure calculée	92 mm	Minimum	14 mm
Cmin	18 mm	Maximul	85 mm
Nombre de fers en-dessous Cmin	1	Moyenne	44 mm
Nombre de fers	48	Ecart-type	15 mm
		Median	45 mm
		Quantiles 5%	27 mm
		Quantiles 10%	31 mm

EPAISSEUR MINIMALE D'ENROBAGE (MM)	14
EPAISSEUR MOYENNE D'ENROBAGE (MM)	44
PROFONDEUR DE CARBONATATION (MM)	18
ARMATURE EN ZONE DE DEPASIVATION (%)	2,0

	0-15MM	15-30MM	30-45MM	45-60MM
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLE (%/CEM)	0,03	0,02	0,02	0,02
TENEUR EN SULFATES SOLUBLE (%/CEM)	0,62	0,84	0,85	0,54
TENEUR EN ALCALINS SOLUBLES (%/CEM)	0,36	0,30	0,18	0,15



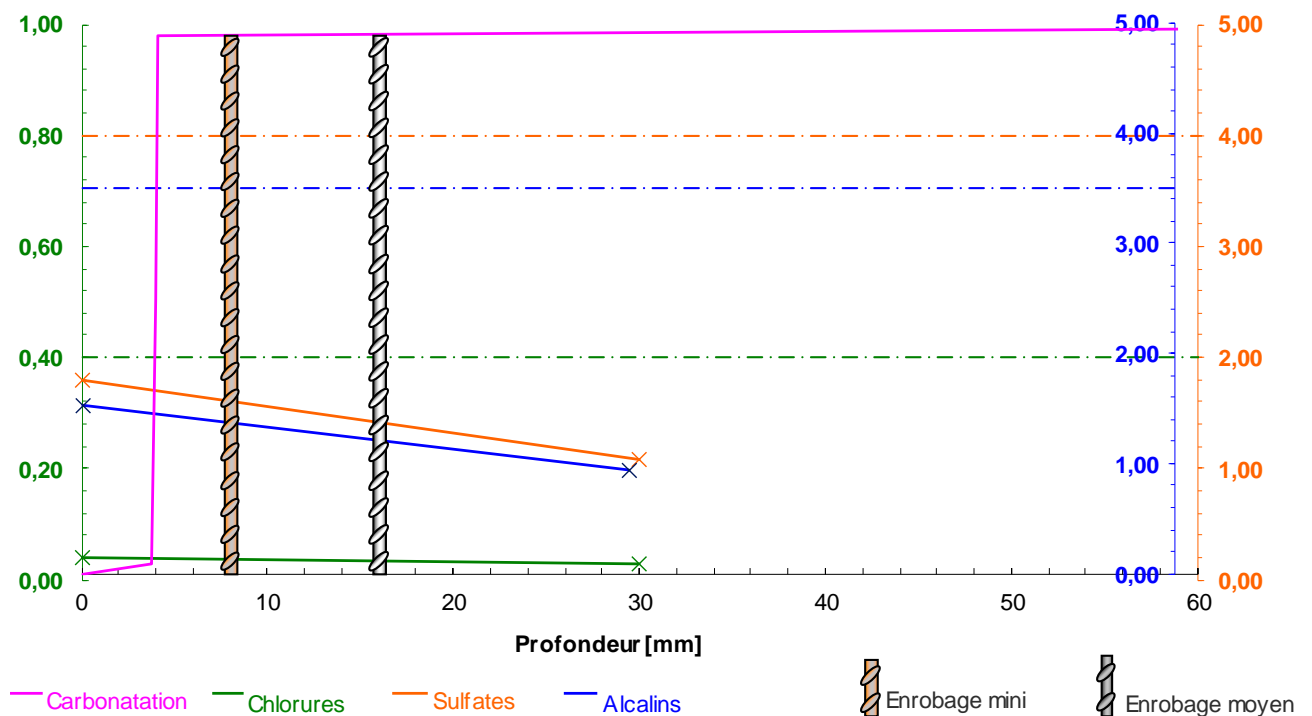
### S3 – INTRADOS DU DOME – POUTRE CIRCULAIRE COTE SUD



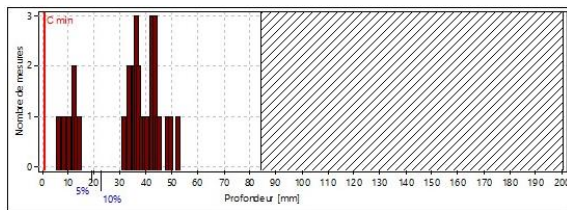
Plage		Statistique Profondeur	
Limite supérieure calculée	31 mm	Minimum	8 mm
Cmin	4 mm	Maximul	28 mm
Nombre de fers en-dessous Cmin	0	Moyenne	16 mm
Nombre de fers	48	Ecart-type	4 mm
		Median	16 mm
		Quantiles 5%	11 mm
		Quantiles 10%	12 mm

EPAISSEUR MINIMALE D'ENROBAGE (MM)	8
EPAISSEUR MOYENNE D'ENROBAGE (MM)	16
PROFONDEUR DE CARBONATATION (MM)	4
ARMATURE EN ZONE DE DEPASIVATION (%)	<1

	0-15MM	15-30MM
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLE (%/CEM)	0,04	0,03
TENEUR EN SULFATES SOLUBLE (%/CEM)	1,79	1,09
TENEUR EN ALCALINS SOLUBLES (%/CEM)	1,53	0,94



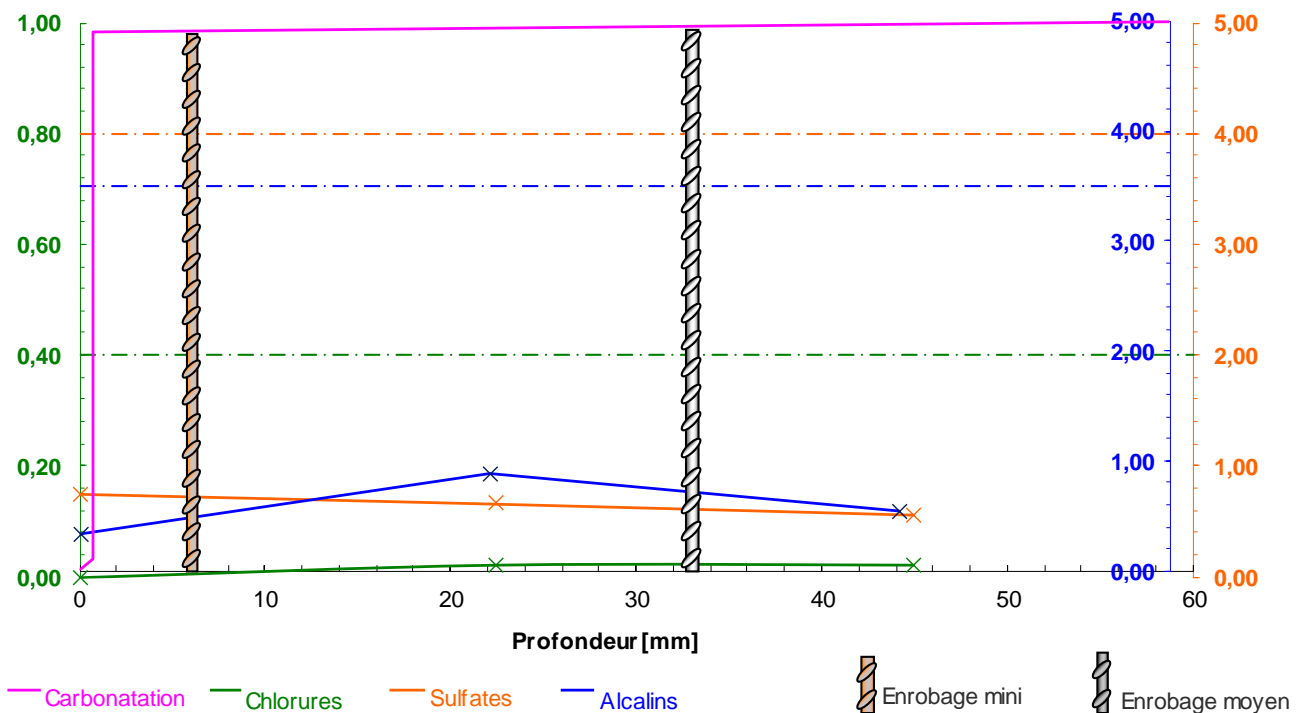
## S4 – EXTRADOS DU DOME – RESEAUX COTE NORD



Plage		Statistique Profondeur	
Limites supérieure calculée	84 mm	Minimum	6 mm
Cmin	1 mm	Maximul	52 mm
Nombre de fers en-dessous Cmin	0	Moyenne	33 mm
Nombre de fers	31	Ecart-type	13 mm
		Median	37 mm
		Quantiles 5%	19 mm
		Quantiles 10%	23 mm

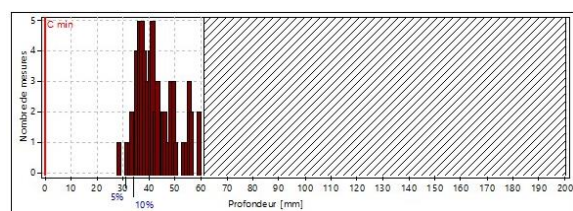
EPAISSEUR MINIMALE D'ENROBAGE (MM)	6
EPAISSEUR MOYENNE D'ENROBAGE (MM)	33
PROFONDEUR DE CARBONATATION (MM)	1
ARMATURE EN ZONE DE DEPASIVATION (%)	<1

	0-15MM	15-30MM	30-45MM
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLE (%/CEM)	<0,01	0,02	0,02
TENEUR EN SULFATES SOLUBLE (%/CEM)	0,75	0,66	0,56
TENEUR EN ALCALINS SOLUBLES (%/CEM)	0,34	0,89	0,54





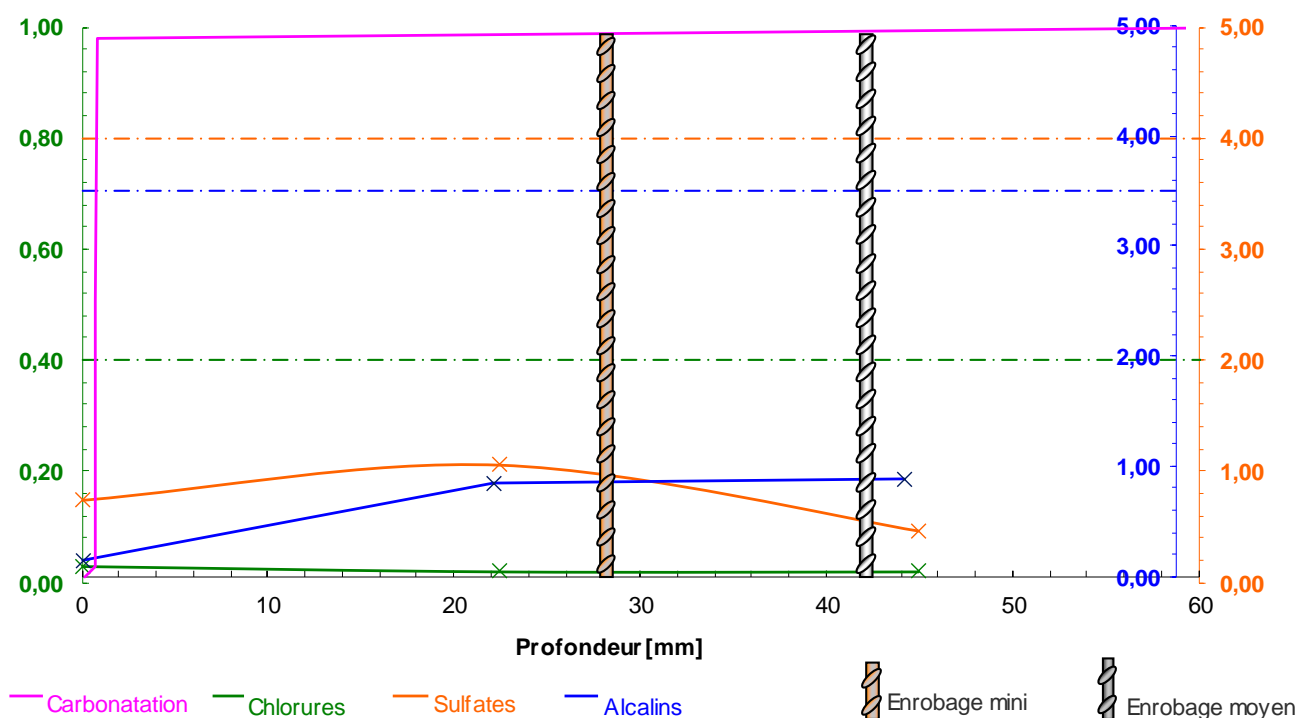
## S5 – EXTRADOS DU DOME – COURONNE COTE NORD



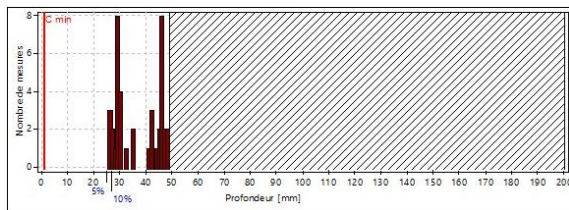
Plage		Statistique Profondeur	
Limite supérieure calculée	61 mm	Minimum	28 mm
Cmin	0 mm	Maximul	59 mm
Nombre de fers en-dessous Cmin	-	Moyenne	42 mm
Nombre de fers	61	Ecart-type	7 mm
		Median	41 mm
		Quantiles 5%	31 mm
		Quantiles 10%	34 mm

EPAISSEUR MINIMALE D'ENROBAGE (MM)	28
EPAISSEUR MOYENNE D'ENROBAGE (MM)	42
PROFONDEUR DE CARBONATATION (MM)	1
ARMATURE EN ZONE DE DEPASIVATION (%)	<1

	0-15MM	15-30MM	30-45MM
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLE (%/CEM)	0,03	0,02	0,02
TENEUR EN SULFATES SOLUBLE (%/CEM)	0,74	1,06	0,46
TENEUR EN ALCALINS SOLUBLES (%/CEM)	0,15	0,84	0,88



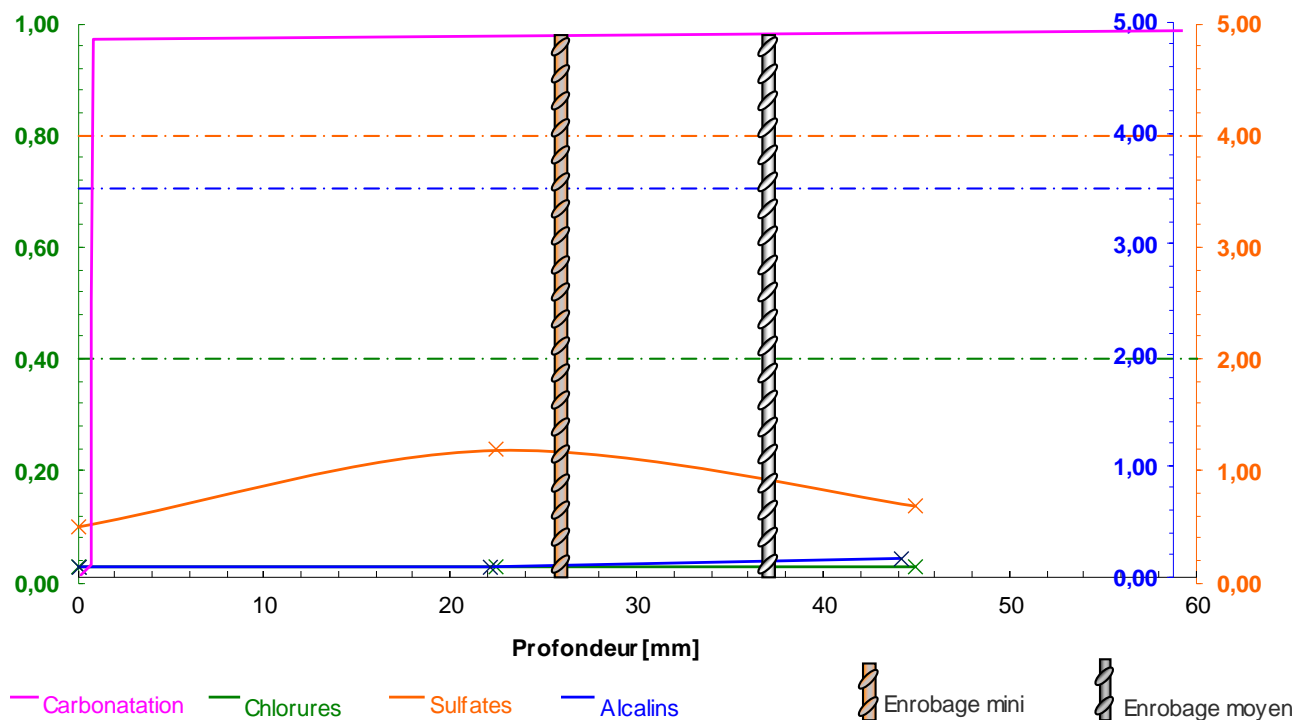
## S6 – EXTRADOS DU DOME – RESEAUX COTE SUD



Plage		Statistique Profondeur	
Limite supérieure calculée	49 mm	Minimum	26 mm
Cmin	1 mm	Maximul	48 mm
Nombre de fers en-dessous Cmin	0	Moyenne	37 mm
Nombre de fers	40	Ecart-type	8 mm
		Median	35 mm
		Quantiles 5%	25 mm
		Quantiles 10%	27 mm

EPAISSEUR MINIMALE D'ENROBAGE (MM)	26
EPAISSEUR MOYENNE D'ENROBAGE (MM)	37
PROFONDEUR DE CARBONATATION (MM)	1
ARMATURE EN ZONE DE DEPASIVATION (%)	<1

	0-15MM	15-30MM	30-45MM
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLE (%/CEM)	0,03	0,03	0,03
TENEUR EN SULFATES SOLUBLE (%/CEM)	0,49	1,19	0,68
TENEUR EN ALCALINS SOLUBLES (%/CEM)	0,09	0,08	0,16

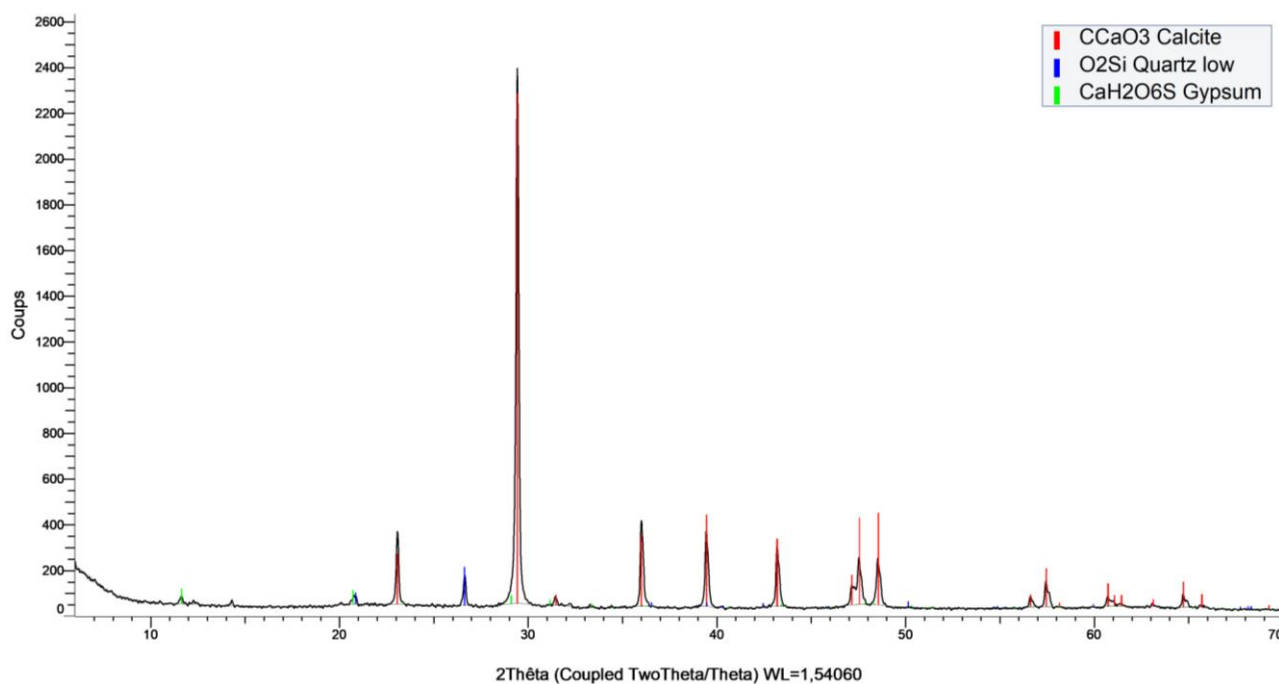


## Complément d'analyse – Identification minéralogique

La spectrométrie de diffraction des rayons X donne principalement des informations sur les structures et les phases minérales contenues dans un matériau. Les pics de diffraction des rayons X sont produits par interférence d'un faisceau monochromatique de rayons X diffusé à des angles spécifiques de chaque jeu de plans réticulaires compris dans un échantillon. Les intensités des pics sont déterminées par la distribution des atomes à l'intérieur du réseau. Par conséquent, le schéma de diffraction des rayons X est l'empreinte du dispositif atomique dans un matériau donné. Une recherche dans la base de données standard COD des schémas de diffraction des rayons X permet de faire une identification rapide de phase dans une grande quantité d'échantillons cristallins.

**Ce complément d'analyse concerne les concrétions visibles au niveau de l'intrados du dôme. Les analyses ont comme objet de déterminer la nature cristalline de ces concrétions pour les confondre avec d'éventuels agents délétères.**

### D1 – RESEAUX COTE OUEST

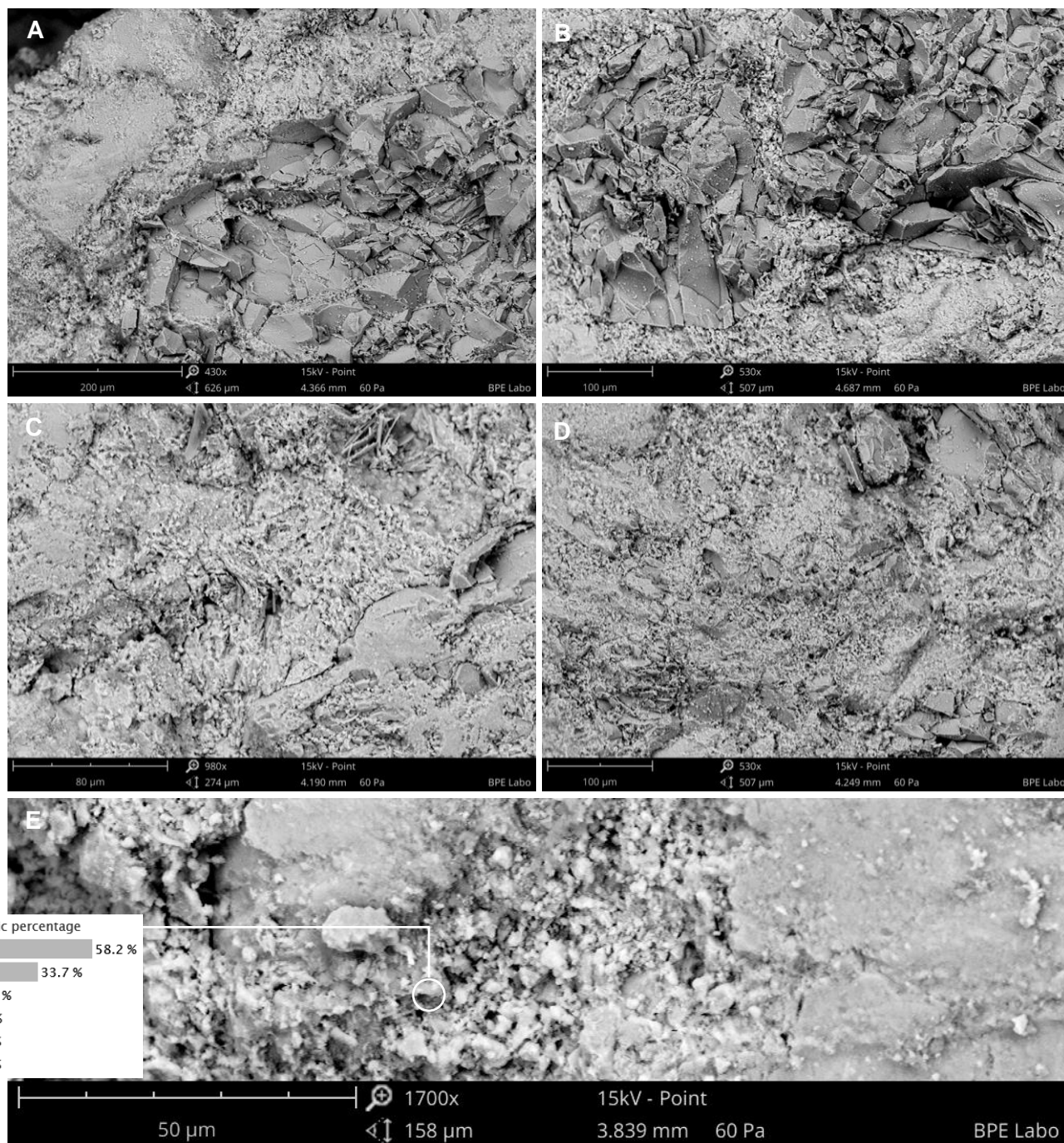




## Complément d'analyse – Observations des hydrates et faciès [MEB]

Les clichés présentés ci-après correspondent à des images rétrodiffusées en microscopie électronique à balayage couplée à une sonde EDX réalisées sur fragment brut prélevé à cœur des échantillons. Les analyses élémentaires semi-quantitatives associées y sont présentées.

### C1 – Béton formant le dôme – Extradoss /PBE231138-9



**[A] & [B]** : Illustration de la microstructure matricielle du béton – liaisons granulats / phase liante étroites – recristallisations calciques ponctuelles **[C]** : Porosité localement développée à la périphérie d'un grain silicaté – absence de formations de néogénèse **[D] & [E]** : Zone de contact entre un grain calcaire et la phase liante recouverte par des minéraux calciques néoformés suggérant un béton soumis à des phénomènes hydriques

## Synthèse des données pathologiques

	Enrobage mini (mm)	Enrobage moyen (mm)	Prof. De carbonatation (mm)	Armature en zone de dépäsivation (%)		Prof 1 [0-15 mm]	Prof 2 [15-30 mm]	Prof 3 [30-45 mm]	Prof 4 [45-60 mm]
<b>S1</b> Intrados dôme - Réseaux côté Ouest	10	16	4	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,03	0,02	--	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,73	0,98	--	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,79	0,45	--	--
<b>S2</b> Intrados dôme - Couronne côté Ouest	14	44	18	2,0	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,03	0,02	0,02	0,02
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,62	0,84	0,85	0,54
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,36	0,3	0,18	0,15
<b>S3</b> Intrados dôme - Réseaux côté Sud	8	16	4	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,04	0,03	--	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	1,79	1,09	--	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	1,53	0,94	--	--
<b>S4</b> Extrados dôme - Réseaux côté Nord	6	33	1	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	<0,01	0,02	0,02	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,75	0,66	0,56	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,34	0,89	0,54	--
<b>S5</b> Extrados dôme - Couronne côté Nord	28	42	1	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,03	0,02	0,02	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,74	1,06	0,46	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,15	0,84	0,88	--
<b>S6</b> Extrados dôme - Réseaux côté Sud	26	37	1	<1	Teneur en chlorures (%/CEM)	0,03	0,03	0,03	--
					Teneur en sulfates (%/CEM)	0,49	1,19	0,68	--
					Teneur en alcalins (%/CEM)	0,09	0,08	0,16	--

Figure 8: Synthèse des données pathologiques

Page intentionnellement blanche





# CARACTERISATION DES REVETEMENTS



# CARACTERISATION DES REVETEMENTS EN OEUVRE

Les analyses physico-chimiques des revêtements en œuvre ont pour objet de renseigner la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre sur la nature du revêtement présent en sous-face et surface du dôme et de déterminer la présence d'un éventuel hydrofuge en surface de l'élément.

## Programme analytique

Les analyses proposées pour la caractérisation physico-chimique des bétons, sont les suivantes :

- Analyses élémentaires de composition par spectrométrie de fluorescence des rayons X,
- Détermination du résidu insoluble par attaque acide complétée par une analyse thermogravimétrique,
- Observations au microscope électronique à balayage couplé à une sonde EDX.

## Référencement des échantillons pour analyses en laboratoire

Dans le cadre des caractérisations des revêtements en œuvre, ont été réalisés deux types de prélèvement sur l'ouvrage : des prélèvements par clivage ainsi que par carottage à la couronne diamantée de 60 mm. Le détail des prélèvements est indiqué dans le tableau à suivre :

REFERENCE DES ECHANTILLONS	DESIGNATION
PBE231138 – 9	C1 – Micro-béton – Extrados du dôme
PBE231138 – 10	P1 – Enduit – Intrados du dôme

Tableau 3 : Référencement des échantillons pour analyses en laboratoire

## Illustration des zones de prélèvement



Figure 9: Illustration des zones de prélèvement



## Analyses physico-chimiques du mortier enduit

**Les observations en microscopie optique** visant à déterminer les caractéristiques morphologiques des matériaux (squelette granulaire et liant) ont été réalisées sur des fragments bruts, légèrement polis, à des grossissements x20.

**La spectrométrie de fluorescence des rayons X** est une technique permettant, par les propriétés physiques des matériaux en les irradiants avec un faisceau de rayons X, d'obtenir une composition élémentaire quantitative. Les analyses ont été réalisées avec un spectromètre NITON XR3TGOLDD+ avec une puissance de 50keV préalablement calibré à partir de l'élément Magnésium. Les résultats des analyses sont exprimés en poids d'oxyde.

**L'analyse thermogravimétrique** est une technique permettant de renseigner sur les différentes phases en présence dans les mortiers notamment les teneurs en eau liée, les teneurs en composés organiques et les teneurs en dioxyde de carbone. Ces déterminations sont réalisées avec un analyseur permettant une mesure continue de la perte de masse en fonction de la température sur une gamme de 80°C à 950°C avec une vitesse de montée en température de 10°C/min et des paliers jusqu'à masse constante à 450°C, 550°C et 950°C.

### Prélèvement P1 / [PBE231138-10] Enduit de finition – Intrados du dôme



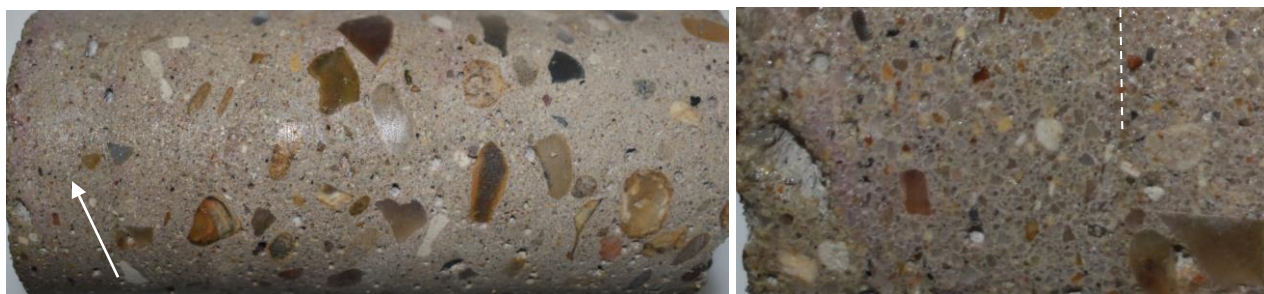
MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	Ba	Pb
<0,01	<b>1,43</b>	<b>6,36</b>	<b>2,49</b>	<b>0,09</b>	<b>0,14</b>	<b>85,4</b>	<b>0,20</b>	<b>0,61</b>	<0,01	<0,01	<0,01
Perte au feu 105/450°C (%)									<b>2,67</b>		
Perte au feu 450/550°C (%)									<b>1,92</b>		
Perte au feu 550/950°C (%)									<b>34,0</b>		
Résidu insoluble (%)									<b>3,13</b>		

Mortier, de teinte matricielle blanchâtre, présentant une épaisseur de l'ordre de 2 mm, élaboré à partir d'un squelette granulaire de faciès émoussé, suggérant une origine alluvionnaire et de granulométrie n'excédant pas 2 mm.

Les résultats analytiques font état d'un mortier présentant une teneur en eau structurale de 2,67% ainsi qu'une fraction carbonatée importante, notons un équivalent en carbonates évalué à près de 77,2%. La fraction silicatée, attribuable au squelette granulaire représente seulement 3,13% du mélange.

Fort de ces résultats, ce mortier apparaît confectionné à partir d'un liant calcique hydraulique [pertes au feu 105/450°C et 550/950°C], de **type chaux hydraulique avec potentiellement une adjonction de ciment**.

**Prélèvement C1 / [PBE231138-9] Micro-béton – Extrados du dôme**



ANALYSE DE LA COMPOSITION ELEMENTAIRE PAR XRF									
MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rapport Si/CA
< 0,01	1,56	23,7	1,88	< 0,01	0,57	41,4	0,28	2,38	0,37
CARACTERISATION PETRO-PHYSIQUE									
POROSITE OUVERTE (%)							15,2		
MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (KG/M <sup>3</sup> )							2 043		
DETERMINATION DE LA TENEUR EN CIMENT									
TENEUR EN CIMENT METHODE SI.SOL (%)							27,5		
TENEUR EN CIMENT METHODE INERTES (%)							27,1		
TENEUR EN CIMENT RETENUE (%)							27,3		
TENEUR EN CIMENT (KG/M <sup>3</sup> ) [1]							558 ± 56		

Tableau 4 : Résultats des analyses de caractérisation physico-chimique du mortier en œuvre

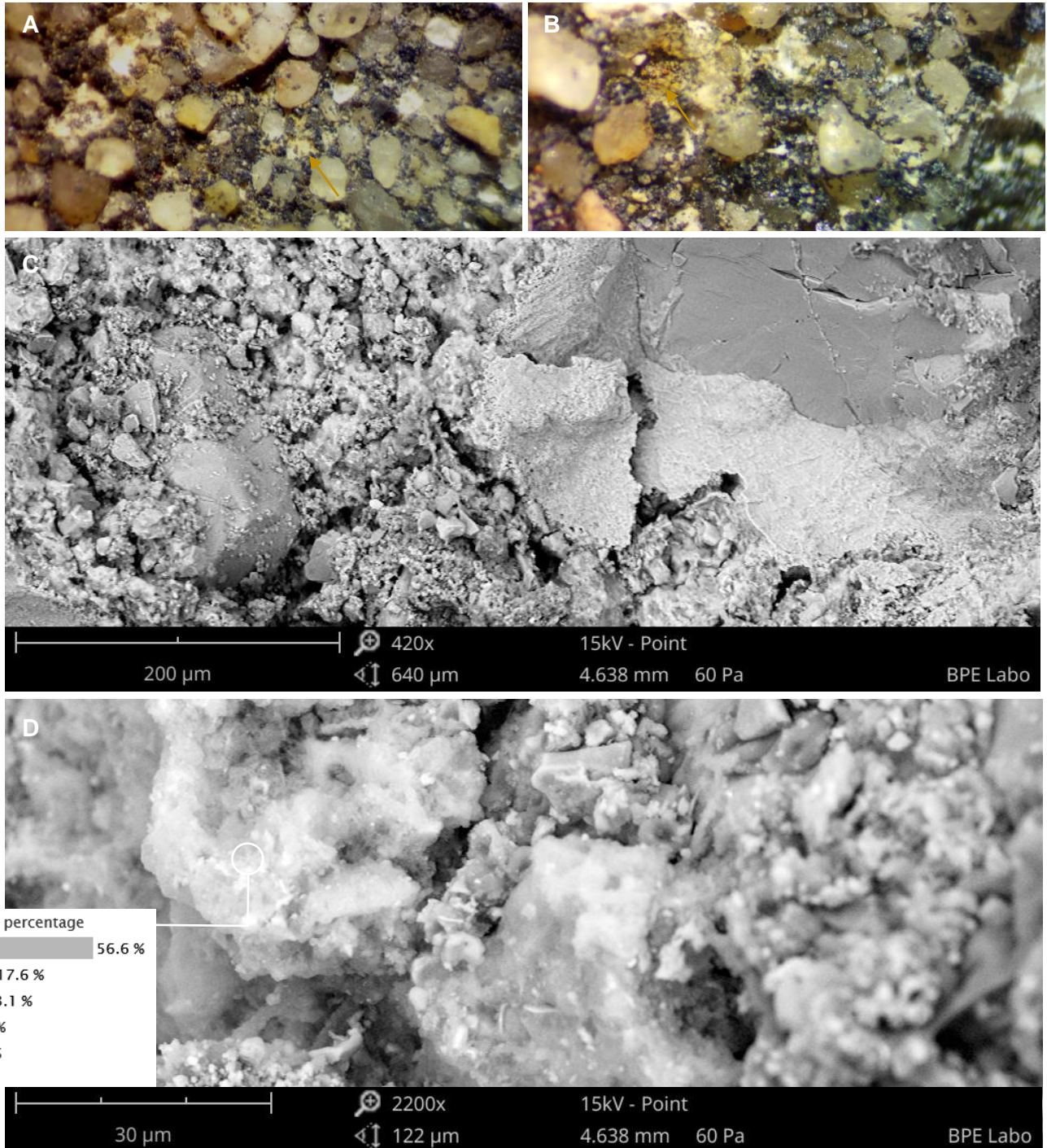
<sup>[1]</sup> Teneur exprimée en kg/m<sup>3</sup> avec une masse volumique défini précédemment.

Micro-béton, assimilable à un mortier enduit mis en œuvre sur une épaisseur de l'ordre de 20 mm. Il convient toutefois de souligner l'absence d'interface nette avec le support béton sous-jacent. L'adhérence entre ces deux matériaux est satisfaisante et exempte de déficit. Ce mortier a été confectionné à partir d'un **liant gris équivalent à celui formant la structure [CEM II] mais dosé à hauteur de 558 kg/m<sup>3</sup>** pour une masse volumique apparente de 2043 kg/m<sup>3</sup>. La fraction silicatée du sablon alluvionnaire 0/4 employé est évaluée à 56 % du mélange.

## Observations et analyses en microscopie électronique

Les clichés présentés ci-après correspondent à des images obtenues en microscopie optique [grossissement x20 et x40 – couleurs] ainsi que des images rétrodiffusées en microscopie électronique à balayage [noir et blanc] couplée à une sonde EDX réalisées sur fragment brut en surface des échantillons. Les analyses élémentaires semi-quantitatives associées y sont présentées.

### C1 – Béton formant le dôme – Extrados /PBE231138-9

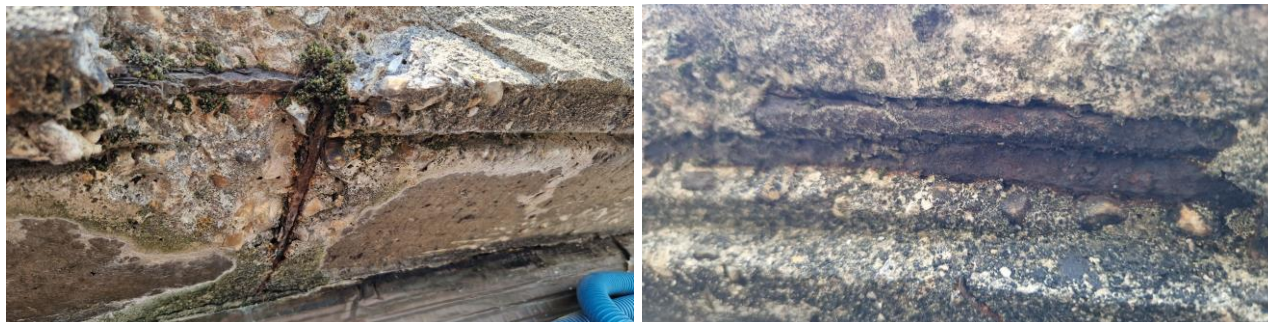


**[A] & [B]** : Clichés en microscopie optique surface de l'extrados – Grains roulés émergents et présence d'agglomérats ocres résiduels dans les parties concaves du micro-relief **[C] & [D]** : Illustration de la microstructure à proximité d'un grain déchaussé en surface du fragment brut – formation résiduelle sous forme de gel silicaté riche en aluminium calcium et comportant du dioxyde de titane ainsi qu'une surconcentration en oxydes de fer – Ces éléments suggèrent la présence résiduelle d'un ancien revêtement ou badigeon silicaté jaunâtre.



## ETAT GENERAL DES BETONS & PERSPECTIVES

Les analyses relatives au comportement pathogène des bétons mettent en évidence un comportement différentiel en fonction des éléments investigués. Il s'agit d'un différentiel lié à l'exposition des éléments. Soulignons que l'exploitation des données mettent en évidence des bétons de bonne qualité ayant néanmoins souffert d'un vieillissement naturel et d'une conception parfois défailante, notamment en ce qui concerne la disposition des armatures filantes dans les gouttes d'eau.



Les résultats des mesures relatives à la détermination des profondeurs des fronts de carbonatation indiquent uniquement des propagations notables au niveau des bétons formant la couronne en intrados du dôme [2% des armatures de peau en zone de dépassement]. Soulignons qu'il s'agit d'un phénomène de vieillissement naturel du béton entraînant, par la modification de son pH lié à la transformation de la Portlandite en Calcite, une dépassement des armatures constituant le squelette armé de celui-ci et permettant ainsi, en présence d'eau, une corrosion de celles-ci.

Concernant les autres zones d'investigation, observons des progressions variables mais restant néanmoins faibles des fronts de carbonatation, au regard des profondeurs d'enrobage des armatures relevées.

Les analyses à caractère pathologique font état de teneurs en composés chlorés, sulfatés et alcalins ne dépassant pas les seuils limites actuellement en vigueur.

Si visuellement les concrétions semblent accentuer la gravité des désordres du au rendu esthétique, les analyses minéralogiques indiquent que ces concrétions sont exclusivement assimilables à de la Calcite résultant d'infiltrations d'eau dans les bétons.

Au regard du fascicule relatif à la protection cathodique du béton armé du Cerema, la sélection de techniques de réparation peut être la suivante :

	Incubation	Amorçage	Propagation
Ralentissement ou arrêt de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage	Imprégnation		
	Impr. hydrofuge		
	Revêtement		
Protection électrochimique des aciers	Réalcalisation		
	Inhibiteur		
	PC par anodes galvaniques		
	PC par courant imposé		
Reconstitution de sections de béton armé			Ragréage
			Béton projeté
			Béton coulé

Au total les bétons en œuvre peuvent être qualifiés en stade de l'incubation.

# PROPOSITIONS DE TRAITEMENTS

---

Les propositions de traitement de l'ouvrage sont établies à partir des observations précédemment formulées et concernent un traitement curatif (applicables aux zones dégradées par des épaufrures– référencé TC) et traitement préventif (visant à accroître la durabilité des interventions de rénovation – référencé TP ce dernier pouvant être appliqué sur l'ensemble des surfaces).

## Traitement curatif [TC]

**Ces préconisations sont applicables dans les zones affectées par d'épaufrures de béton accompagnées d'une apparition d'armature corrodée et concernent l'ensemble des éléments en béton.**

### Dégagement des armatures corrodées

Le dégagement des armatures corrodées est réalisé par burinage, repiquage ou bouchardage : le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'apparaisse une partie saine et la longueur doit être dégagée sur toute la périphérie. Il est souhaitable de dégager une zone de 200 mm autour du point d'altération. Il est nécessaire de réaliser un dégagement des armatures sur une profondeur d'au moins 10 mm derrière l'armature.

### Elimination de la corrosion

Cette phase constitue l'une des tâches la plus délicate à réaliser. La bonne tenue dans le temps des réfections de parement dépendra directement de la qualité d'exécution de ces travaux. Il est donc impératif d'éliminer l'intégralité de cette altération, qu'elle soit foisonnante ou de surface, par décapage et brossage soigné ou par des moyens mécaniques de type sablage. Les surfaces seront ensuite nettoyées afin de faire disparaître toute poussière ou toute souillure subsistant après élimination des bétons dégradés.

### Protection des armatures

Cette phase consiste à appliquer sur toute la surface des armatures dégagées, et en périphérie complète, un produit assurant sa protection vis-à-vis de la corrosion. Cette application doit suivre immédiatement le décapage. L'application est réalisée en deux couches dont la première couche directement sur l'armature dégagée. Appliquer une deuxième couche de produit anti-corrosion sur l'armature et avant que celle-ci ne sèche, projeter un sable de quartz sec afin d'améliorer l'adhérence du mortier. La passivation des armatures peut être obtenue par application de passivation de type peinture anti-corrosion. Ces produits de passivation peuvent être : SIKA MONOTOP 610 AC, LANKO 760 Passivant acier ou tout autre produit de passivation équivalent faisant l'objet d'un avis technique.

### Réfection des bétons

La réfection des zones dégagées peut être réalisée avec des mortiers prêts à l'emploi fibrés et adjuvantés. Ces produits spécialement destinés à ce type de travaux résistent aux variations dimensionnelles et peuvent être appliqués en couches minces (de l'ordre de 3 mm). Parmi ces produits, peuvent être retenus : SIKA MONOTOP 612 F, LANKO 731 mortier de réparation ou tout autre mortier de réparation équivalent faisant l'objet d'un avis technique. Ces mortiers peuvent recevoir un traitement de surface (sablage, travail à l'outil) permettant de les intégrer au support existant.

Afin de conserver le caractère architectural de l'édifice, il conviendrait d'apporter un soin particulier aux opérations de reprise des bétons notamment dans le cadre de l'intégration des réparations. Les réparations devront s'effectuer en recherche avec un mortier de teinte adaptée. Pour cela il sera nécessaire d'utiliser un mortier ayant une teinte originelle relativement claire laquelle pourra être adaptée en fonction du vieillissement naturel du béton. Cette remarque est notamment importante concernant le traitement et la reprise des panneaux de remplissage de type 2 ; les autres panneaux comportant des armatures métalliques corrodées localisées au niveau des joints inter-panneaux.

## **Traitement préventif – Protection de surface [TP]**

Dans tous les cas, il est conseillé de mettre en œuvre un traitement visant à protéger la surface des bétons afin de réduire les pénétrations d'eau dans l'épiderme de celui-ci et de ralentir les phénomènes de vieillissement tel que la carbonatation de la matrice cimentaire.

Il conviendrait d'employer une peinture minérale (silicatée par exemple) de type KEIM CONCRETAL ou toute peinture ou lasure équivalente faisant l'objet d'un avis technique. Cette protection peut également se présenter sous forme de produit hydrofuge de type SIKAGARD 703W, LANKOSTOP 230 ou tout hydrofuge de surface équivalent faisant l'objet d'un avis technique. L'avantage de cette seconde gamme de produits réside dans l'application qui peut être réalisée par pulvérisation





Laboratoires

Pour le laboratoire BPE :

Dimbsthal, le 31 juillet 2023

**Maxime TROMP**  
Chargé d'étude

**Laboratoires BPE**  
5, rue de Hengwiller – 67440 Dimbsthal  
Tél : 03 88 91 13 96 - @ : bpe@bpe-ing.com  
SARL au capital de 150 000€ - SIRET 517 597 092 00025 – APE 7112B

