

**CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES  
PARTICULIÈRES  
CCTP**

**INSTALLATION ET DECONSTRUCTION DE DEUX PONTS ROUTIERS  
EN ZONE VAUBAN**

**ANNEXE 5 – DIAGNOSTIC DES MASSIFS D’APPUIS EXISTANTS**

S’assurer de la validité de toute copie avant usage.

**Émetteur : Service d’Infrastructure de la Défense - Méditerranée**

<b>P</b>	<b>R</b>	<b>A</b>	<b>T</b>	<b>M</b>	<b>3</b>	-	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>C</b>	-	<b>S</b>	<b>I</b>	<b>D</b>	-	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	-	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	-	<b>1</b>	<b>.</b>	<b>0</b>
Code Projet							Type de doc				Émetteur				Arborescence						N° document						Version		

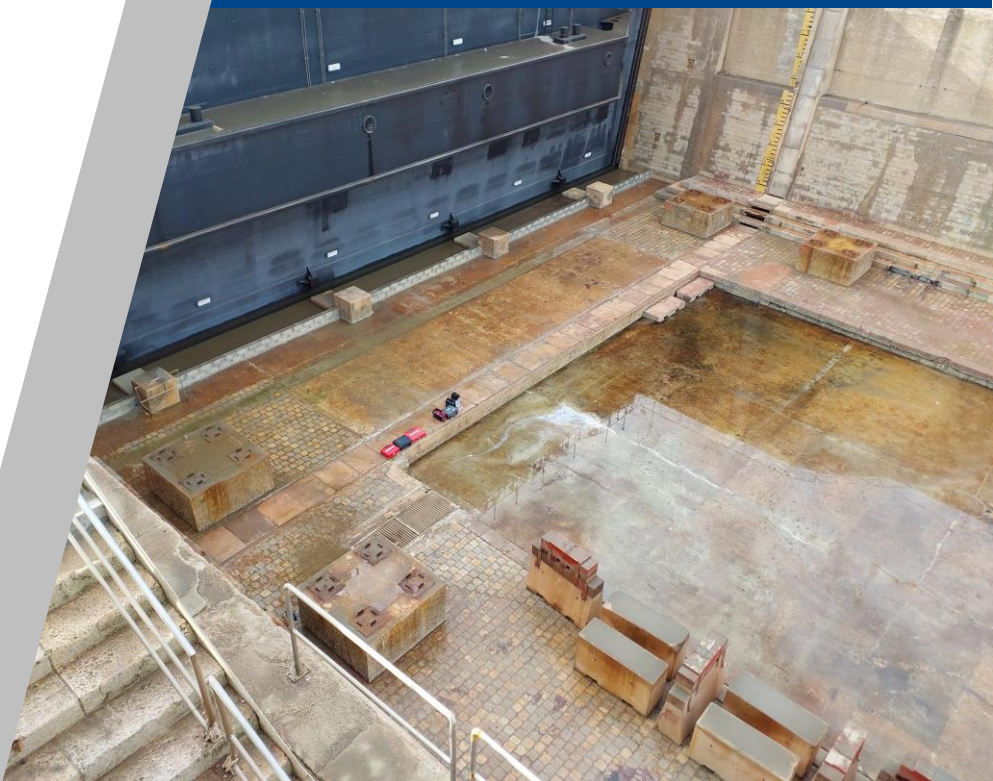
Ce document est la propriété du SID Méditerranée et ne peut être utilisé, reproduit, ou communiqué sans son autorisation

ESID TOULON

## **Massifs Bassins Vauban**

**Diagnostic corrosion et structurel  
des massifs**

Référence    A24 11870  
Indice        C  
Date         10/02/2025



# ESID TOULON

## Massifs Bassins Vauban

### Diagnostic corrosion et structurel des massifs

Rédigé par	A. VIENNE Chargé d'études
Contrôlé par	P. MARAIS Responsable Projet
Destinataire	M. Eric BEAT

#### Désignation du document

Référence	Nature	Nb pages	Nb annexe
A24 11870 BEI	Rapport de Diagnostic	38	6

#### Suivi des indices

Indice	Date	Rédaction	Vérification	Motif évolution
A	06/01/2025	A. VIENNE	P. MARAIS	1 ère diffusion
B	04/02/2025	A. VIENNE	P. MARAIS	Modification à la suite des observations clients et ajout du recalcul des massifs
C	07/02/2025	A. VIENNE	P. MARAIS	Modification après restitution

#### Sixsense Engineering - Agence Sud-Est

29 allée de St Jean, La Barque

**ARTEPARC de FUYEAU bât A**

**13710 FUYEAU**

Tel : 04 42 50 02 72

**www.sixsense-group.com**

## SOMMAIRE

<b>I - CONTEXTE DE LA MISSION .....</b>	<b>5</b>
<b>II - PRESENTATION DE L'OUVRAGE.....</b>	<b>6</b>
II.1 - IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE .....	6
II.2 - CARACTERISTIQUES GENERALES .....	6
II.3 - VIE DE L'OUVRAGE .....	6
II.4 - AVIS ET CONCLUSION DE LA PRECEDENTE ETUDE (DIAGNOSTIC 2014) .....	6
<b>III - PLAN DE SITUATION .....</b>	<b>7</b>
<b>IV - CONDITIONS D'INTERVENTION .....</b>	<b>7</b>
<b>V - PROGRAMME D'ETUDE .....</b>	<b>8</b>
V.1 - INVESTIGATIONS SUR SITE .....	8
V.1.1 - Relevé de désordres .....	8
V.1.2 - Diagnostic matériaux .....	8
V.2 - ANALYSES LABORATOIRE .....	8
<b>VI - RELEVÉ DE DESORDRES.....</b>	<b>9</b>
VI.1 - CONVENTION DE REPERAGE .....	9
VI.2 - CONSTATATIONS .....	10
VI.3 - APPRECIATION DE L'ETAT DES OUVRAGES .....	11
<b>VII - DIAGNOSTIC MATERIAUX .....</b>	<b>12</b>
VII.1 - LOCALISATION DES ZONES D'INVESTIGATIONS .....	12
VII.2 - RESULTATS DES INVESTIGATIONS IN-SITU .....	12
VII.2.1 - Synthèse des résultats de mesures d'enrobages .....	12
VII.2.2 - Examen visuel de l'état de conservation des armatures sondées .....	14
VII.2.3 - Synthèse des mesures du potentiel de corrosion des armatures .....	15
VII.2.4 - Mesure de l'épaisseur résiduelle des platines métalliques .....	16
VII.3 - RESULTATS DES ESSAIS ET MESURES LABORATOIRE .....	18
VII.3.1 - Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau .....	18
VII.3.2 - Estimation de la teneur en liant hydraulique .....	18
VII.3.3 - Mesures de profondeur de carbonatation du béton .....	19
VII.3.4 - Dosage des ions solubles (chlorures libres et chlorures totaux) .....	20
VII.3.5 - Corrélation enrobage des armatures - Pénétration des chlorures libres .....	21
VII.3.6 - Mesures de résistivité .....	22
<b>VIII - SYNTHESE DES INVESTIGATIONS .....</b>	<b>23</b>
<b>IX - ETUDE DE LA CAPACITE DES MASSIFS A REPENDRE LES CHARGES INDUITES PAR LA MISE EN PLACE DES PASSERELLES.....</b>	<b>24</b>
IX.1 - DOCUMENTS DE REFERENCE .....	24
IX.1.1 - Normes et règlements .....	24
IX.1.2 - Dossier d'ouvrage .....	24
IX.2 - METHODOLOGIE .....	24
IX.3 - HYPOTHESES .....	25
IX.3.1 - Géométrie et ferrailage .....	25
IX.3.2 - Matériaux .....	25
IX.3.3 - Charges .....	26
IX.3.4 - Géotechnique .....	27



IX.4 - MASSIFS DE LA PASSERELLE EST.....	28
IX.4.1 - Vérification des armatures en place selon l'annexe E.8 du BAEL.....	28
IX.4.2 - Vérification de l'équilibre du coin selon l'annexe 4 du BPEL.....	30
IX.4.3 - Vérification de la portance du sol.....	31
IX.5 - MASSIFS DE LA PASSERELLE OUEST.....	31
IX.5.1 - Vérification des armatures en place selon l'annexe E.8 du BAEL.....	31
IX.5.2 - Vérification de l'équilibre du coin selon l'annexe 4 du BPEL.....	33
IX.5.3 - Vérification de la portance du sol.....	34
IX.6 - SYNTHES DES CALCULS.....	34
<b>X - CONCLUSION .....</b>	<b>35</b>
X.1 - AVIS SUR L'ÉTAT GÉNÉRAL DES OUVRAGES.....	35
X.2 - PRÉCONISATIONS DE TRAVAUX.....	36
X.2.1 - Remplacement des platines métalliques.....	36
X.2.2 - Traitement des bétons.....	36
X.3 - STRATÉGIE DE DÉMOLITION / RECONSTRUCTION.....	38
X.4 - STRATÉGIE INTERMÉDIAIRE – RÉPARATION PARTIELLE.....	38

## LISTE DES ANNEXES

### ANNEXE 1 REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE

### ANNEXE 2 CARTOGRAPHIE DES DESORDRES

### ANNEXE 3 PRINCIPES ET METHODOLOGIE DES ESSAIS

### ANNEXE 4 PLANCHES TECHNIQUES

### ANNEXE 5 PRELEVEMENTS

### ANNEXE 6 MESURES ULTRASONORES

## I - CONTEXTE DE LA MISSION

Dans le cadre d'un projet de mise en place de ponts routiers métalliques pour le franchissement de deux bassins de la zone Vauban sur la base navale de Toulon, l'ESID souhaite établir un diagnostic des massifs sur lesquels les piles de ces ponts s'appuient (voir photos ci-dessous).

Pour chaque bassin, 4 massifs soutiennent les 4 piles de la structure métallique. Les massifs, de construction beaucoup plus récente que les bassins, sont soumis à de potentielles pathologies liées à leurs immersions dans l'eau de mer à raison de 4 semaines tous les 6 mois (hors période de cale sèche).

Les données d'entrée du client, émises lors de la réunion de restitution permettent de mieux appréhender la durée de vie résiduelle des massifs souhaitée par la maîtrise d'ouvrage. Pour une période de maximum 4 ans supplémentaires, les massifs devront avoir la capacité de remplir leur rôle de fondation pour les passerelles. Durant 2 ans, ceux-ci seront en attente dans les bassins et ne recevront les passerelles métalliques qu'à ce terme et pour une durée maximale de 18 mois. Les massifs ne seront plus utilisés par la suite.



Figure 1 : Passerelle à mettre en place et massif 1.1 du bassin 1 (Ouest)

La mission a pour objectif d'évaluer l'état de l'existant des massifs de 2 bassins ainsi que de préconiser les actions sommaires pour mener d'éventuelles travaux de réparation. Afin de compléter ce diagnostic, l'étude de la capacité portante des massifs pour la reprise des piles a également été réalisée.

## II - PRESENTATION DE L'OUVRAGE

### II.1 - Identification de l'ouvrage

Nom de l'ouvrage	: Massifs Bassins Vauban
Maître d'ouvrage	: ESID Toulon
Département	: Bouches-du-Rhône
Commune	: Toulon

### II.2 - Caractéristiques générales

Géométrie	
Type de structure	: Massifs en béton armé parallélépipédiques de section carrée en plan
Nombre de massifs	: 8 (répartis dans deux bassins)
Nombre de bassins	: 2
Dimensions massifs	: - Bassin 1 (Ouest) : 250 x 250 x 128 cm : - Bassin 2 (Est) : 250 x 250 x 92 cm
Équipements	
Platines	: Platines métalliques ancrées en surface des massifs
Nombre de platines	: 4 par massif
Dimensions	: 65 x 65 cm

### II.3 - Vie de l'ouvrage

Date de mise en service	: 2006
Entreprises constructrices	: Non communiquées
Inspections/Diagnostics antérieurs	: Diagnostic 2014 – CONCRETE Pathology
Evènements subit par l'ouvrage depuis la dernière inspection	: Immersion totale des bassins sur une période de 1 <sup>1/2</sup> ans.
Travaux et réparation réalisés depuis la dernière inspection ou la construction	: Remplacement/modification des platines métalliques (année inconnue).
Existence d'un suivi ou d'une surveillance particulière	: Non communiqués

### II.4 - Avis et conclusion de la précédente étude (Diagnostic 2014)

« Le béton des massifs est dans un bon état général et présente de bonnes caractéristiques mécaniques. En l'absence d'oxygène (plots immergés), aucune activité de corrosion ne s'est enclenchée à ce jour, même si certaines conditions sont réunies pour le développement d'une activité corrosive (humidité du milieu et fortes teneurs en ions chlorures libres du béton).

Les ouvrages sont dans un état satisfaisant, et ne présentent pas de dégradation de leurs caractéristiques structurelles par rapport à leur état d'exploitation initial. »

### III - PLAN DE SITUATION

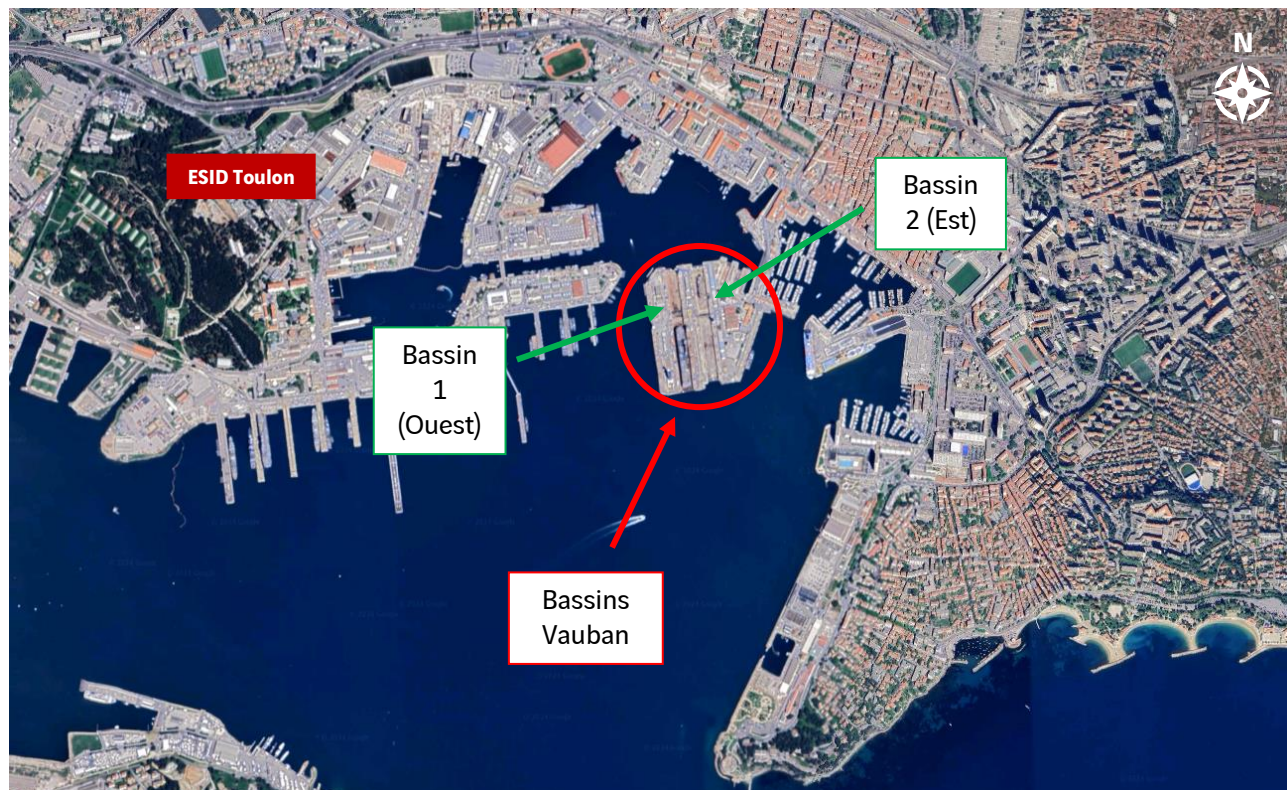


Figure 2 : Vue satellite de l'ouvrage – source google Earth

### IV - CONDITIONS D'INTERVENTION

Date de l'intervention	Conditions climatique	Equipe d'intervention	Balisage	Moyen d'accès	Commentaire
05/11/2024 au 07/11/2024	(Jour, Ensoleillé) 20°C	A. CARREAU F. COLLAS A. VIENNE	Aucun	Pédestre	Diagnostic matériaux et inspection visuelle des massifs des Bassins Vauban

- Particularités d'intervention :

Une demande d'accès provisoire au site (badge ESID) a été nécessaire pour la réalisation des investigations. Présence d'une coactivité dans le bassin 2, sans impact sur l'intervention.

## V - PROGRAMME D'ETUDE

### V.1 - Investigations sur site

#### V.1.1 - Relevé de désordres

L'intervention comprend une inspection visuelle de la partie aérienne de l'ensemble des 8 massifs des 2 bassins avec un relevé des dimensions et le positionnement des platines métalliques sur ces plots. Un relevé des désordres affectant la partie périphérique des massifs (radier) est aussi réalisé.

#### V.1.2 - Diagnostic matériaux

Le programme d'investigation concerne 5 massifs sur les 8 existants (massifs 1.1, 1.3, 2.1, 2.3 et 2.4) et comprend :

- **Repérages pachométriques et radar** pour recherche de ferrailage et mesures d'enrobage : D'une manière générale, des mesures pachométriques sont réalisées au droit de toutes les zones d'investigation, afin d'une part de confirmer les constitutions de ferrailage vis-à-vis de la classe d'exposition supposée de l'ouvrage, et d'autre part, de permettre la réalisation des investigations en tenant compte des armatures détectées. En complément, le contrôle du positionnement de la platine vis-à-vis de celui du ferrailage des massifs sera réalisé, en vue d'une étude de l'équilibre du coin.
- **Sondages destructifs** pour appréciation de la nature et l'état des armatures : Des sondages destructifs ponctuels sont réalisés au droit des armatures afin de relever leur état de conservation et de mesurer les éventuelles pertes de section, en comparaison avec les sections nominales des plans de ferrailage transmis. Il est réalisé 2 sondages par massif investigué, soit 10 sondages au total.
- Evaluation de l'activité corrosive au sein du béton par **mesure du potentiel électrochimique**. Les mesures permettent d'établir une cartographie de potentiels afin d'estimer l'étendue et la probabilité d'évolution des zones de corrosion d'armatures au sein du milieu environnant. Une cartographie par massif investigué est réalisée, soit 5 zones.
- **Mesure de l'épaisseur résiduelle** des platines pour estimation des pertes d'épaisseur via un appareil de mesure ultrasonore.
- **Prélèvements de béton** pour analyses en laboratoire : afin d'évaluer l'étendue et l'origine des dégradations, des prélèvements de béton ont été réalisés. Il est prélevé le nombre de 7 échantillons de béton nécessaires à la bonne réalisation des analyses en laboratoire définies ci-après. Les prélèvements sont réalisés sous forme de carottage, de fragments ou de poudre.

### V.2 - Analyses laboratoire

Les essais laboratoire suivants permettront l'analyse et la détermination de l'altération du matériau mis en place :

- Des **mesures de carbonatation** : 5 unités.
- Des **mesures de chlorures libres** solubles dans l'eau (sur 5 profondeurs définies en fonction de l'enrobage réel des armatures) : 5 zones x 5 profondeurs soit 25 unités.
- Des **mesures de chlorures totaux** solubles dans l'eau (sur 2 profondeurs définies en fonction de l'enrobage réel des armatures) : 5 zones x 2 profondeurs soit 10 unités.
- Des **mesures de pH** : 5 zones x 5 profondeurs soit 25 unités.
- **Dosage en ciment** : 2 unités (1 par bassin).
- Des **mesures de masse volumique et de porosité** : 2 unités.
- **Mesures de résistivité** : 2 unités.

L'ensemble de ces résultats et leurs analyses sont présentés dans la suite du rapport de diagnostic.



## VI - RELEVÉ DE DESORDRES

### VI.1 - Convention de repérage

Chaque bassin est composé de 4 massifs numérotés de 1.1 à 1.4 pour le bassin 1 et de 2.1 à 2.4 pour le bassin 2. Pour le présent rapport, la numérotation de 1 à 4 des massifs correspond à celle du DOE et du rapport de diagnostic de 2014.

La figure ci-dessous illustre la convention de repérage établie pour cet ouvrage et qui sera utilisée pour la suite.

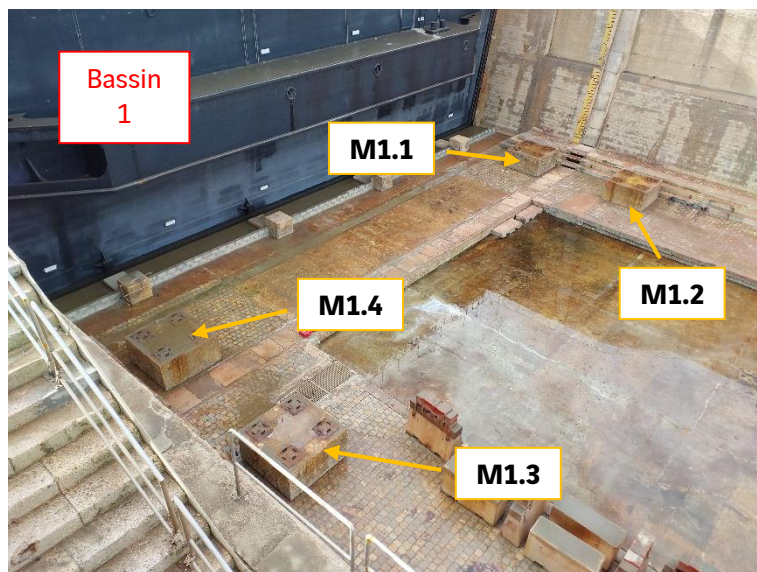


Figure 3 : Convention de repérage Bassin 1 (Ouest)

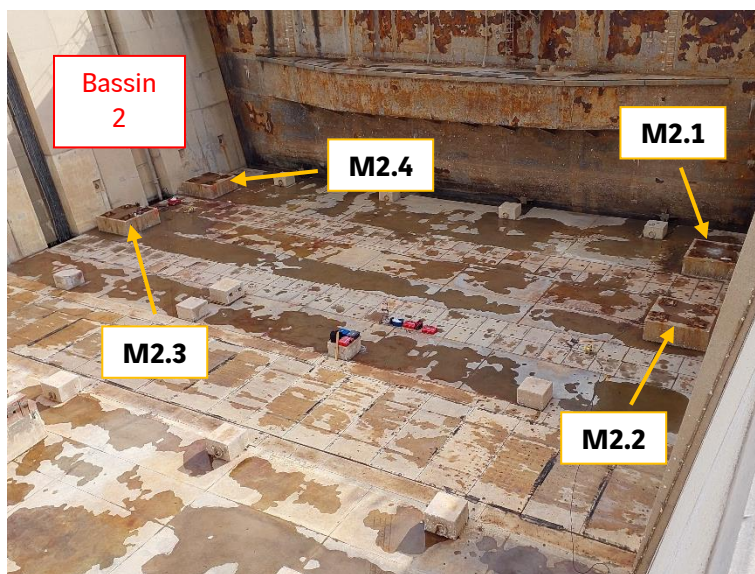


Figure 4 : Convention de repérage Bassin 2 (Est)

Pour la suite du rapport, la dénomination des faces de chaque massif sera identifiée par les lettres A, B, C, D selon le schéma suivant :

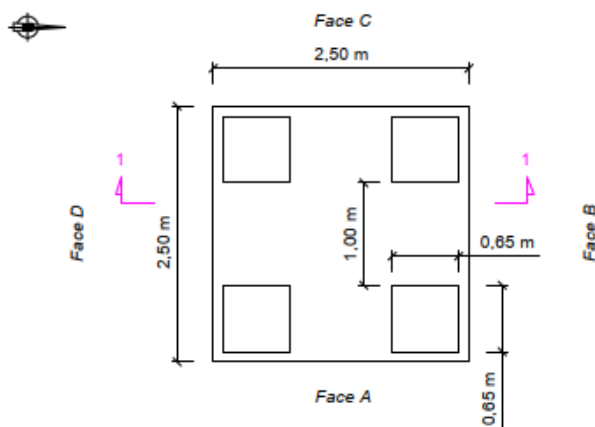


Figure 5 : Convention de repérage des faces de chaque massif

## VI.2 - Constatations

L'inspection visuelle des plots de fondation supportant les piles de la structure métallique a permis d'identifier et de localiser les principaux désordres. L'ensemble de ces désordres constatés est reporté sur les plans de l'**annexe 2** et illustré par le reportage photographique de l'**annexe 1**. Des vues générales sont présentées dans le reportage photographique de la photo 1 à 6.

Eléments et constatations	Localisation/importance	Photos
<b>Partie aérienne</b>		
<b>Environnement (radier)</b>		
Fissuration	Rectiligne depuis le massif 1.2 et à proximité des massifs 2.3 et 2.4 sur les dalles préfabriquées	7 et 8
Décalage/Fracture maçonnerie	Biaise depuis le massif 1.3 suivant le joint de la maçonnerie	9
Eclat en formation	A proximité du massif 1.3 sur une plaque en béton	10
Stagnation d'eau	Généralisé dans les deux bassins	11
<b>Massifs en béton armé</b>		
Fissures calcitées ouv. Maxi 0,6 mm	Verticales et horizontales sur les faces latérales des massifs et dans les angles, sur les deux bassins	12 et 13
Coulures d'oxyde	Généralisées sur les faces latérales des massifs dans les deux bassins	13
Fissures avec coulures d'oxyde ouv. Maxi 0.8 mm	Verticales et horizontales depuis les platines et évoluant quasiment sur toute la hauteur des plots	14
Eclats en formation	Multiples aux angles des massifs provenant des platines	15 et 16
Faïençage/Réseau de fissures	Généralisé en surface de plots dans le Bassin 2 et sur le massif 1.2 prenant naissance aux angles des platines	17
Ségrégation	Eparses en partie basse des faces latérales dans les deux bassins	18



Ragréage fissuré	Dans les angles des massifs	19
Stagnation d'eau + dépôts	En surface des massifs 1.2, 1.4 et 2.3	20
Couche de fossiles de crustacés	Généralisée sur toute la surface des massifs	21
<b>Platines métalliques</b>		
Décollement du mortier de liaison	Généralisé entre les platines et les massifs	22
Corrosion feuilletante/Perte de section	Généralisée sur toutes les platines métalliques avec des pertes de section et feuilletage plus importants dans le Bassin 2	23 à 26

### VI.3 - Appréciation de l'état des ouvrages

Les platines métalliques supports des piles souffrent d'une corrosion feuilletante avancée, avec perte de section notable. Le relevé de désordre permet de conclure à un état général satisfaisant des plots en béton armé.

Toutefois, le caractère évolutif de la corrosion des plaques métallique est à surveiller. Il conviendrait de les traiter, voire de les remplacer d'assurer la stabilité de la structure supportée.

L'étude de capacité portante des massifs permettra de déterminer la solution la plus adaptée.

En conclusion, on note une augmentation croissante de désordres dans la zone d'influence des platines :

- Fissures et éclats en formation prenant naissance aux angles.
- Coulures d'oxyde dû au développement de la corrosion feuilletante des platines.
- Faïençage et réseau de fissures en surface des massifs.

## VII - DIAGNOSTIC MATERIAUX

### VII.1 - Localisation des zones d'investigations

Les zones d'investigations sont repérées sur les planches techniques de l'**annexe 4**. Le relevé de désordres a permis de décomposer les investigations en plusieurs zones, selon leur état de dégradation. Permettant une comparaison de l'altération des massifs entre des zones visuellement saines et dégradées. Leur répartition est décrite dans le tableau suivant :

Bassin	Massif	Mesures d'enrobages (Radar, Ferroskan)	Corrosimétrie	Sondages / Carbonatation	Prélèvements carottés	Mesures aux ultrasons
1	M1.1	Face A	Face A	Face A (SD1, SD2)	Face A et B (C1, C2)	En surface de chaque platine (3 points)
	M1.3	Face B et surface	Face A et B	Face B (SD3, SD4)	Face supérieure (C3)	
2	M2.1	Face D	Face D	Face D (SD1, SD2)	Face supérieure (C1)	
	M2.3	Face B et C	Face B et C	Face C (SD3, SD4)	Face C et D (C2, C3)	
	M2.4	Face B et surface	Face B	Face B (SD5, SD6)	Face C (C4)	

Tableau 1 : Localisation des zones d'investigations

### VII.2 - Résultats des investigations in-situ

#### VII.2.1 - Synthèse des résultats de mesures d'enrobages

Afin d'apprécier la qualité générale de l'enrobage des armatures, des mesures ont été menées au droit des zones de prélèvement. Elles permettent de corréler la pénétration des agents agressifs (ions chlorures libres) et la carbonatation du béton avec la position des armatures.

L'ensemble des passages radar ont permis d'obtenir les planches techniques présentées en **annexe 4** du document. Elles regroupent toutes les informations sur les enrobages, espacements, diamètres et constats visuels des armatures sur tous les massifs étudiés (5 massifs).

- Pour le bassin 1 :

Il a été déterminé un **enrobage moyen des aciers horizontaux de 63 mm** avec un minimum d'enrobage repéré à 37 mm. Puis pour les **aciers verticaux un enrobage moyen de 76 mm** et un enrobage minimum de 46 mm. Le maillage des aciers correspond à des espacements de 200 mm verticalement par 150 mm horizontalement.

- Pour le bassin 2 :

Il a été déterminé un **enrobage moyen des aciers horizontaux de 53 mm** avec un minimum d'enrobage repéré à 33 mm. Puis pour les **aciers verticaux un enrobage moyen de 60 mm** et un enrobage minimum de 5 mm. Le maillage des aciers correspond à des espacements de 200 mm verticalement par 150 mm horizontalement.

Le tableau suivant synthétise la distribution des enrobages des aciers des 5 massifs investigués, ainsi que les profondeurs de carbonatation et de pénétration des chlorures :

Zone et élément concerné	Aciers repérés	Espacements moyens	Diamètre	Enrobage (mm)			Hyp. XS3 % < 45 mm
				Min	Max	Moy	
<b>Massif 1.1</b> Face A <b>Visuellement sain</b>	Horizontaux	226	12	<b>45</b>	<b>105</b>	<b>68</b>	<b>6%</b>
	Verticaux	155	12	<b>61</b>	<b>105</b>	<b>82</b>	<b>0%</b>
<b>Massif 1.3</b> Face A et B <b>Etat dégradé</b>	Horizontaux	231	12	<b>37</b>	<b>94</b>	<b>58</b>	<b>21%</b>
	Verticaux	142	12	<b>46</b>	<b>111</b>	<b>72</b>	<b>0%</b>
<b>Massif 2.1</b> Face D <b>Etat dégradé</b>	Horizontaux	196	12	<b>33</b>	<b>74</b>	<b>50</b>	<b>62%</b>
	Verticaux	145	12	<b>34</b>	<b>74</b>	<b>50</b>	<b>4%</b>
<b>Massif 2.3</b> Face B et C <b>Moyennement dégradé</b>	Horizontaux	201	12	<b>39</b>	<b>105</b>	<b>60</b>	<b>16%</b>
	Verticaux	153	12	<b>5</b>	<b>89</b>	<b>66</b>	<b>5%</b>
<b>Massif 2.4</b> Face B <b>Etat dégradé</b>	Horizontaux	207	12	<b>33</b>	<b>81</b>	<b>49</b>	<b>58%</b>
	Verticaux	140	12	<b>38</b>	<b>81</b>	<b>61</b>	<b>6%</b>

Tableau 2 : Synthèse des résultats de mesures d'enrobages

#### Commentaires :

Le relevé d'enrobage des armatures des massifs montre que le positionnement du ferrailage est globalement conforme au minimum d'enrobage requis par la classe d'exposition du béton (XS3 : enrobage > 45 mm).

Il semble que l'état de dégradation externe des massifs (coulures d'oxyde, fissurations...) soit corrélé avec le pourcentage d'armatures avec un enrobage inférieur à 45 mm. Les aciers horizontaux des massifs 1.3, 2.1 et 2.4 présentent jusqu'à 62% d'armatures pour un même massif avec une profondeur inférieure aux recommandations. Ces massifs montrent par ailleurs une dégradation visible depuis leur surface plus prononcée.

Les enrobages des faces étudiées présentent un défaut d'enrobage modéré, les massifs des deux bassins ont un ferrailage conforme à leur classe d'exposition.

## VII.2.2 - Examen visuel de l'état de conservation des armatures sondées

Des sondages destructifs ponctuels ont été réalisés à différents points de la structure afin d'évaluer visuellement le degré d'altération des armatures en place. Un total de 2 sondages par massif a été réalisé, soit un total de **10 sondages** destructifs.

### Illustrations photographiques



Photographie 13 : Sondage SD1 sur massif 1.1 face A, aciers sains et absence de carbonatation



Photographie 14 : Sondage SD5 sur massif 2.4 face B, aciers sains et absence de carbonatation

### Commentaires :

Sur l'ensemble des zones investiguées, les sondages réalisés ont mis en lumière l'absence de corrosion des aciers. Les armatures sont visuellement saines sur les différents types de dégradation de l'ensemble des massifs.

L'enrobage minimum des aciers observés sur sondages est de 55 mm dans le bassin 1 et 37 mm dans le bassin 2.

Le relevé des armatures dégagées indique des caractéristiques similaires de celles-ci :

- Ferrailage de type haute adhérence (HA),
- Diamètre de 12 mm,
- Espacements entre éléments verticaux de 150 mm et horizontaux de 200 mm.

Nota : les aciers pris en photo sur les planches technique montrent des piqûres de corrosion dû au piquage du béton et apparu le jour suivant l'ouverture. Les aciers apparaissent tous sains au moment de leur mise à jour.

### VII.2.3 - Synthèse des mesures du potentiel de corrosion des armatures

Les résultats des mesures de potentiels sont présentés en **annexe 4**, sous forme de cartographies d'iso-potentiels illustrées par les principaux désordres affectant les parements. Le principe de la méthode est présenté en **annexe 3**. Le tableau suivant synthétise les investigations réalisées et leurs résultats :

Bassins	Zone et élément concerné	Données de potentiels (mV)		Observations / Interprétations
N°1	M1.1 – F. A Massif <i>Visuellement sain</i>	Min.	<b>-689</b>	Les mesures de potentiel réalisées montrent l'absence de différence de potentiels sur la zone (< 200 mV) traduisant vraisemblablement une très faible activité de corrosion de cette face du massif. Les constats réalisés sur sondages confirment ce point avec des aciers visuellement sains identifiés au droit du sondage réalisé en zone cathodique (branchement) et du sondage en zone anodique (le plus électronégatif).
		Max.	<b>-599</b>	
		Ecart	<b>90</b>	
	M1.3 – F. A et B Massif <i>Etat dégradé</i>	Min.	<b>-694</b>	Les mesures de potentiels montrent des différences de potentiels inférieures à 200 mV, l'activité de corrosion est négligeable dans cette zone. Les constats réalisés sur sondages confirment ce point avec une absence de dégradation des aciers, aucune corrosion détectée sur les aciers mis à jour.
		Max.	<b>-633</b>	
		Ecart	<b>61</b>	
N°2	M2.1 – F. A Massif <i>Etat dégradé</i>	Min.	<b>-588</b>	Même constats que pour le bassin 1. La faible différence de potentiels mesuré indique l'absence d'activité corrosive des aciers. Les constats réalisés sur sondages confirment ce point avec une absence de dégradation des aciers, aucune corrosion détectée sur les aciers mis à jour.
		Max.	<b>-486</b>	
		Ecart	<b>102</b>	
	M2.3 – F. B et C Massif <i>Moyennement dégradé</i>	Min.	<b>-611</b>	Même constats que pour le massif 2.1.
		Max.	<b>-518</b>	
		Ecart	<b>93</b>	
	M2.4 – F. B Massif <i>Etat dégradé</i>	Min.	<b>-634</b>	Même constats que pour le massif 2.1.
		Max.	<b>-525</b>	
		Ecart	<b>109</b>	

Tableau 3 : Synthèse des mesures de potentiel d'électrodes réalisées

#### Commentaires :

Les mesures de potentiels réalisées mettent en lumière l'absence d'une activité de corrosion des aciers sur les zones étudiées, pour les deux bassins. Ce constat est corroboré par l'examen visuel des armatures dégagées en zones cathodiques et anodiques et par la mise à jour d'aciers en zone dégradée ne présentant aucune trace de corrosion.

Il conviendra de noter que les potentiels relevés sont globalement très électronégatifs et peuvent traduire de la circulation des eaux et/ou de la présence de pollution des bétons par les chlorures. Cette pollution importante des bétons pourrait influencer sur les mesures de potentiels réalisées.

Les mêmes constats (absence d'activité anodique et potentiels élevés liés aux fortes teneurs en ions chlorures) avaient été faits lors du diagnostic matériaux de 2014.



#### VII.2.4 - Mesure de l'épaisseur résiduelle des platines métalliques

Les mesures de l'épaisseur résiduelle des platines ont été réalisées à l'aide d'un appareil de mesures ultrasonores. Plusieurs points de mesures ont été réalisés sur chaque platine (3 par platines) afin d'obtenir une moyenne de l'épaisseur relevée. L'ensemble de ces mesures est présenté en **annexe 6**.

La préparation de la platine métallique est nécessaire afin de garantir le bon contact de la sonde de mesure avec l'élément métallique à mesurer (photographie 15 et 16).

Ci-dessous un schéma de la prise de mesure in-situ :

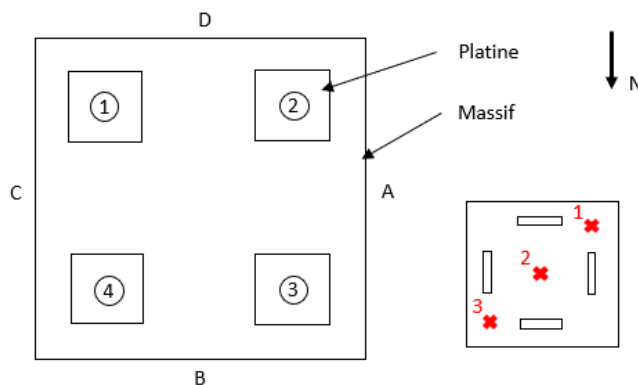
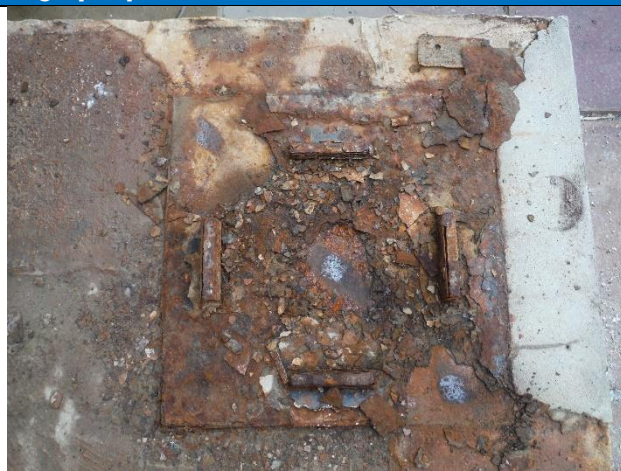


Figure 7 : Schéma de prises de mesures ultrasonores

#### Illustrations photographiques



Photographie 15 : Mesures ultrasonores avant préparation de la platine métallique



Photographie 16 : Mesures ultrasonores après préparation de la platine métallique

#### Commentaires :

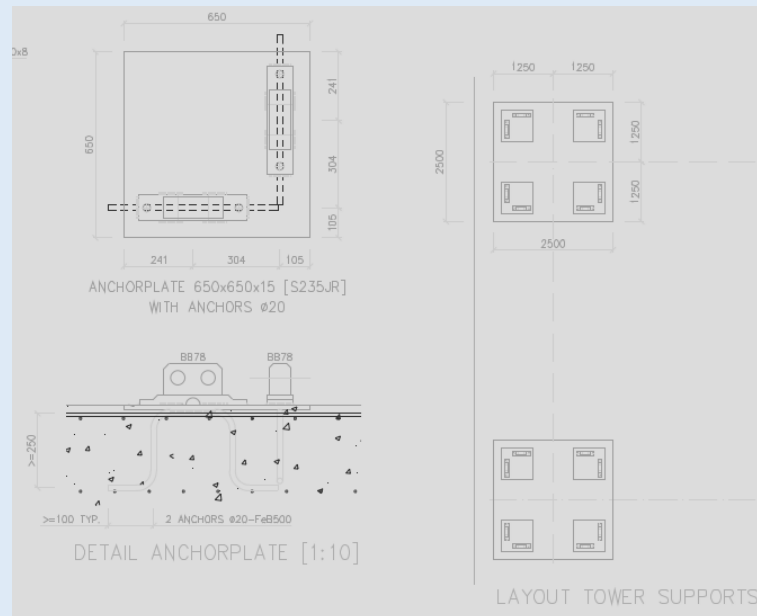
Les mesures réalisées sur les différentes platines ont permis de constater que :

- Les valeurs des épaisseurs des platines de l'ensemble des massifs sont comprises entre 7,2 mm et 13,2 mm.
- L'épaisseur moyenne des platines est égale à 10 mm dans le bassin 1.
- L'épaisseur moyenne des platines est égale à 11,6 mm dans le bassin 2.

Les éléments du DOE indique la mise en place de platine de 650x650x15 mm. Les dimensions trouvées sur site correspondent donc à ce type de platine, néanmoins une forte diminution de l'épaisseur est constatée :

épaisseur nominale de 15 mm et épaisseur résiduelle d'environ 11 mm, soit une perte de section de 4 mm en moyenne.

De plus la typologie des platines semble avoir été modifiée. Elles comptent 2 goussets par platine sur plans alors qu'il est constaté 4 goussets par platines sur site. Un changement des plaques métalliques semble avoir été mené, sans information complémentaire dans le DOE de l'ouvrage.



*Ferrailage des massifs – Extrait de plan du DOE*



### VII.3 - Résultats des essais et mesures laboratoire

Les principes de chaque essai sont présentés en **annexe 3** du rapport. Les prélèvements carottés et les mesures de front de carbonatation sont disponibles en **annexe 5**.

#### VII.3.1 - Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau

Les deux échantillons de béton prélevés sur site spécifiquement pour l'analyse des matériaux constitutifs des massifs présentent les caractéristiques suivantes :

Echantillon	Localisation	Profondeur (mm)	Masse volumique apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosité accessible à l'eau [%]
C2 - 1.1	Bassin 1 - Massif M1.1	190 - 275	<b>2224</b>	<b>14,1</b>
C3 - 2.3	Bassin 2 - Massif M2.3	140 - 260	<b>2252</b>	<b>14,6</b>

Tableau 4 : Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau

#### Rappel :

- La masse volumique d'un béton normal est comprise entre **2000 et 2600 kg/m<sup>3</sup>** (selon la norme NF EN 206-1),
- La masse volumique communément admise pour un béton standard est de **2300 kg/m<sup>3</sup>**,
- Les valeurs de porosité communément admises pour un béton standard sont de l'ordre de **11 à 13 % (béton d'ouvrage d'art)**.

#### Commentaires :

Les masses volumiques mesurées sont cohérentes avec les valeurs attendues pour un béton standard de génie civil.

Les porosités identifiées sont supérieures au regard des valeurs communément admises pour un béton d'ouvrage d'art. Et pouvant favoriser la pénétration d'agents pathogènes (carbonatation, chlorures ...) à l'intérieur de la matrice cimentaire.

Il est remarqué de plus sur les échantillons prélevés un bullage du béton, synonyme d'une mauvaise mise en œuvre du béton lors du coulage.

#### VII.3.2 - Estimation de la teneur en liant hydraulique

Les teneurs en liant hydraulique des bétons ont été calculées pour les différents types de ciments suivants (données fournies par le GranDuBé, 2007) :

- Ciment de type CEM I : teneur en silice de  $20,5 \pm 2$  %,
- Ciment de type CEM II/A-S (laitiers de haut fourneau) : teneur en silice de  $23,0 \pm 1,5$  %,
- Ciment de type CEM III/A (laitiers de haut fourneau) : teneur en silice de  $26,0 \pm 3$  %,
- Ciment de type CEM III/B (laitiers de haut fourneau) : teneur en silice de  $27,5 \pm 1,5$  %,
- Ciment de type CEM III/C (laitiers de haut fourneau) : teneur en silice de  $31,5 \pm 1,5$  %.

Un écart inférieur à 10% de la moyenne des 2 méthodes (silice soluble et inertes) est validé pour le dosage en ciment présenté dans le tableau ci-dessus (cf. GranDuBé, 2007). L'hypothèse de la teneur en silice du ciment retenue est de 24,5% (CEM II/A-S). Cette hypothèse a notamment été motivée par les rapports SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inférieures à 3 compatibles avec ce type de ciment.

Les paramètres obtenus par les méthodes de la silice soluble et des inertes sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Echantillon	Zone	Profondeur (mm)	Teneur en ciment d'après la silice soluble (%)	Teneur en ciment d'après les inertes (%)	Moyenne des 2 méthodes (%)	Teneur en liant hydraulique (kg/m <sup>3</sup> )
C2 - 1.1	Face B	275 - 330	13,4	12,2	12,8	<b>284 ± 30</b>
C3 - 2.3	Face C	260 - 320	17,0	16,1	16,5	<b>372 ± 35</b>

Tableau 5 : Teneur en liant hydraulique du béton

#### Commentaires :

Les teneurs en ciment obtenues sont hétérogènes et paraissent inadaptées aux attentes actuelles pour un béton de classe d'exposition XS3 (350 kg/m<sup>3</sup>).

#### VII.3.3 - Mesures de profondeur de carbonatation du béton

La carbonatation du béton devient préjudiciable dès qu'elle atteint la profondeur des armatures. Il est donc impératif de la comparer à l'enrobage des armatures de façon à évaluer la proportion d'armatures situées dans le domaine carbonaté (armatures dépourvues de la pellicule d'oxydes passifs les protégeant de la corrosion).

Les résultats des mesures et corrélation enrobage-carbonatation sont disponible ci-dessous :

Echantillon		Profondeur moyenne de carbonatation (mm)	Enrobage des armatures (mm)	% d'armature situé dans le domaine carbonaté
Zone	Référence échantillon			
Face A	C1-1.1	<1	85	0 %
Face supérieure	C3-1.3	22	120	0 %
	C1-2.1	2	135	0 %
Face D	C2-2.3	<1	45	0 %
Face C	C4-2.4	<1	40	0 %

Tableau 6 : Synthèse des corrélations - enrobage / mesures de carbonatation du béton

#### Commentaires :

Les mesures de carbonatation indiquent l'absence de front de carbonatation pour l'ensemble des zones investiguées.

Au regard des faibles profondeurs de carbonatation, les corrélations avec l'enrobage soulignent d'une manière générale que la proportion d'armatures potentiellement situées dans le domaine carbonaté est faible voire nulle sur l'ensemble des massifs des deux bassins.

Depuis le précédent diagnostic réalisé en 2014, il est constaté l'absence d'évolution du front de carbonatation.

### VII.3.4 - Dosage des ions solubles (chlorures libres et chlorures totaux)

Les teneurs en ions chlorures libres et totaux données en % par rapport à la **masse de ciment** ont été calculées en prenant en compte les masses volumiques et les dosages en ciment obtenues pour :

- L'échantillon C2-1.1 : dosage en ciment de 284 kg/m<sup>3</sup> (pour le bassin 1).
- L'échantillon C3-2.3 : dosage en ciment de 372 kg/m<sup>3</sup> (pour le bassin 2).

Il est réalisé 5 tranches de 10 mm d'épaisseur dans les carottes de façon à connaître la répartition des teneurs en chlorures avant, autour et après les armatures. De la même façon, les mesures de pH sont réalisées sur 5 tranches de 10 mm et sont présentées dans le même tableau de synthèse.

Les valeurs présentées **en rouge** dans le tableau ci-après dépassent le seuil de dépassement des aciers (0,4 % d'ions chlorures en masse de ciment pour un béton contenant des armatures et composé d'un ciment CEM I ou CEM II) ou de risque d'amorçage de la corrosion (rapport Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> = 0,6).

Echantillon			Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse béton		Paramètres pris en compte pour le calcul en masse ciment		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse ciment		pH	Rapport [Cl <sup>-</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]
Zone	Référence échantillon	Profondeur (mm)	Totaux	Libres	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Dosage ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Totaux	Libres		
Face A	C1-1.1	10 - 20	/	<b>0,112</b>	2224	284	/	<b>0,87</b>	12,9	<b>1,0</b>
		20 - 30	0,142	<b>0,101</b>	2224	284	1,11	<b>0,79</b>	12,9	<b>0,8</b>
		60 - 70	/	0,041	2224	284	/	0,32	12,8	0,4
		80 - 90	0,038	0,028	2224	284	0,29	0,22	13,1	0,1
		200 - 210	/	0,007	2224	284	/	0,05	12,8	0,1
Face supérieure	C3-1.3	10 - 20	/	<b>0,433</b>	2224	284	/	<b>3,39</b>	12,9	<b>3,1</b>
		20 - 30	0,461	<b>0,327</b>	2224	284	3,61	<b>2,56</b>	13,0	<b>2,1</b>
		110 - 120	0,126	<b>0,087</b>	2224	284	0,99	<b>0,68</b>	13,0	0,5
		150 - 160	/	0,044	2224	284	/	0,35	12,8	0,4
		400 - 410	/	0,005	2224	284	/	0,04	12,8	<0,1
Face supérieure	C1-2.1	10 - 20	/	<b>0,269</b>	2252	372	/	<b>1,63</b>	12,6	<b>4,1</b>
		20 - 30	0,305	<b>0,211</b>	2252	372	1,85	<b>1,28</b>	12,8	<b>2,1</b>
		115 - 125	/	<b>0,103</b>	2252	372	/	<b>0,62</b>	13,1	<b>0,6</b>
		125 - 135	0,161	<b>0,110</b>	2252	372	0,97	<b>0,66</b>	13,1	<b>0,6</b>
		335 - 345	/	0,005	2252	372	/	0,03	12,9	<0,1
Face D	C2-2.3	10 - 20	/	<b>0,151</b>	2252	372	/	<b>0,91</b>	13,0	<b>0,9</b>
		20 - 30	0,218	<b>0,155</b>	2252	372	1,32	<b>0,94</b>	13,0	<b>0,9</b>
		40 - 50	0,218	<b>0,156</b>	2252	372	1,32	<b>0,94</b>	13,0	<b>0,9</b>
		200 - 210	/	<b>0,060</b>	2252	372	/	0,36	12,8	0,5
		420 - 430	/	0,015	2252	372	/	0,09	12,9	0,1
Face C	C4-2.4	10 - 20	/	<b>0,139</b>	2252	372	/	<b>0,84</b>	12,9	<b>1,1</b>
		20 - 30	0,184	<b>0,131</b>	2252	372	1,11	<b>0,79</b>	13,0	<b>0,8</b>
		30 - 40	0,172	/	2252	372	1,04	/	/	/
		40 - 50	/	<b>0,120</b>	2252	372	/	<b>0,73</b>	13,1	<b>0,6</b>
		110 - 120	/	<b>0,065</b>	2252	372	/	0,39	12,8	<b>0,6</b>
		320 - 330	/	0,023	2252	372	/	0,14	12,9	0,2

Tableau 7 : Synthèse des mesures en ions chlorure et mesure de pH

### Commentaires :

On observe un gradient de concentration en ions chlorures avec des teneurs plus élevées sur les premiers centimètres traduisant l'existence d'une pollution exogène. Sur l'ensemble des zones étudiées, sur les faces supérieure et latérales, les profondeurs de pollution dépassent les armatures.

En considérant le pH du béton (pH de 12,6 à 13,1), les valeurs des plages testées pour les prélèvements dépassent le seuil de risque d'amorçage de la corrosion (rapport  $Cl^-/OH^- = 0,5$  à  $4,1$ ) excepté pour la plage à cœur de l'échantillon C1-1.1. Ainsi, les teneurs en ions chlorures peuvent être suffisantes pour amorcer la corrosion au regard du pH des bétons.

A la lumière de ces résultats, l'ensemble des **prélèvements** réalisés sur les faces latérales et supérieures des massifs présentent donc **une pollution avérée des bétons par les chlorures**.

Enfin, il est relevé sur certains échantillons (C3-1.3 et C1-2.1), une teneur importante en chlorure total qui suggère que les ions chlorures présents dans le béton ne sont pas essentiellement des ions libres.

### VII.3.5 - Corrélation enrobage des armatures – Pénétration des chlorures libres

Les teneurs en ions chlorures libres et totaux sont présentées dans le tableau de synthèse dans le paragraphe précédent et la présentation des seuils limites de dépassement des armatures sont disponibles en **annexe 3**.

Le tableau suivant permet d'estimer la proportion d'armatures située dans le domaine pollué par les chlorures sur les zones où le seuil de concentration en ions chlorures est supérieur ou égal à 0,4% d'ions chlorures libres en masse par rapport au ciment :

Élément de structure	Prélèvement	Etat de la zone	Profondeur de pénétration des chlorures (mm)	Proportion d'armatures situées dans le domaine pollué par les chlorures (%)
<b>M1.1 – F. A</b> Massif	<b>C1 – 1.1</b>	<i>Zone visuellement saine</i>	30	<b>0%</b>
<b>M1.3 – F. sup</b> Massif	<b>C3 – 1.3</b>	<i>Etat dégradé</i>	> 120	<b>100%</b>
<b>M2.1 – F. sup</b> Massif	<b>C1 – 2.1</b>	<i>Etat dégradé</i>	> 135	<b>100%</b>
<b>M2.3 – F. D</b> Massif	<b>C2 – 2.3</b>	<i>Moyennement dégradé</i>	> 50	<b>30%</b>
<b>M2.4 – F. C</b> Massif	<b>C4 – 2.4</b>	<i>Etat dégradé</i>	> 50	<b>75%</b>

Tableau 8 : Synthèse corrélation enrobages des armatures – pénétration des chlorures libres

### Commentaires :

Sur les cinq zones présentant une pollution avérée par les chlorures, au moins 30% des armatures de quatre zones se trouvent dans le domaine pollué par les chlorures. La profondeur de pollution par les chlorures (teneurs en chlorures supérieurs au seuil) n'a pas été identifiée pour l'ensemble des prélèvements (excepté pour C1 - 1.1). Les profondeurs de pénétration sont plus importantes au niveau de la face supérieure qu'au niveau des faces latérales.

### VII.3.6 - Mesures de résistivité

Les mesures de résistivité peuvent être utilisées pour estimer la probabilité de corrosion dans un environnement donné. Plus la résistivité électrique mesurée est faible, plus le risque de voir se développer une cinétique de corrosion est important.

Les valeurs de résistivités s'interprètent en s'appuyant sur les seuils définis ci-après :

- $R \geq 100 \text{ k}\Omega\text{cm}$  : risque négligeable de corrosion,
- $R = 50 \text{ à } 100 \text{ k}\Omega\text{cm}$  : environnement peu propice à la corrosion,
- $R = 10 \text{ à } 50 \text{ k}\Omega\text{cm}$  : risque modéré de corrosion,
- $R \leq 10 \text{ k}\Omega\text{cm}$  : risque élevé de corrosion.

Le tableau suivant synthétise les résultats obtenus :

Echantillon	Localisation	Profondeur d'essai (mm)	Mesures de résistivité [ $\text{k}\Omega\text{.cm}$ ]
C2 - 1.1	Bassin 1 - Massif M1.1 - Face B	140 - 190	<b>20</b>
C3 - 2.3	Bassin 2 - Massif M2.3 - Face C	80 - 130	<b>19</b>

Tableau 9 : Mesures de résistivité du béton

#### Commentaires :

Les valeurs obtenues sont homogènes et indiquent l'existence d'un risque de corrosion modéré (situées dans la gamme 10 à 50  $\text{k}\Omega\text{cm}$ ). La faible résistivité du béton pourrait entraîner une cinétique de corrosion plus rapide si elle venait à se manifester.

## VIII - SYNTHÈSE DES INVESTIGATIONS

Les investigations réalisées sur les massifs d'appuis de la structure métallique situés dans le fond des bassins Vauban amènent les principales observations suivantes :

- Les relevés de désordres des massifs montrent au droit des platines métalliques des traces de coulures d'oxydes, des fissurations dans les angles avec éclats du béton. L'ouverture maximale des fissures relevé est de 0,8 mm.
- Il est constaté une évolution des fissurations et des fractures en surface des massifs par rapport à la précédente inspection.
- Les mesures d'enrobage effectuées sur les parements traduisent une bonne qualité d'enrobage des armatures (supérieur à 50 mm). Les massifs des deux bassins ont un ferrailage conforme à leur classe d'exposition.
- L'examen visuel des aciers sur les sondages destructifs montrent que les armatures sont saines et ne révèlent aucun signe d'amorce d'un phénomène de corrosion. Les diamètres et espacements des armatures relevés correspondent aux plans et DOE de l'ouvrage.
- Les mesures de potentiels confirment une absence d'activité corrosive pour l'ensemble des zones étudiées. Les valeurs très électro négatives montrent le caractère général de la pollution des bétons par les chlorures.
- Les épaisseurs de platines relevées indiquent la perte de section et l'impact de la corrosion sur leur épaisseur résiduelle.
- Les masses volumiques sont conformes aux valeurs attendues pour un béton standard de génie civil.
- L'examen macroscopique des prélèvements indique la présence de bulles d'air des échantillons. Les analyses réalisées en laboratoire mettent en évidence un béton de porosité légèrement élevée.
- Il est constaté une hétérogénéité des teneurs en liant hydraulique, celles-ci diffèrent de la teneur attendue pour un béton de classe d'exposition XS3.
- Les mesures de carbonatation des bétons mettent en évidence de faibles fronts de carbonatation sur l'ensemble des éléments et ne s'approchent pas de l'enrobage minimum des armatures sur l'ensemble des zones.
- Les fronts de pénétration des chlorures et leurs teneurs indiquent la présence avérée d'une pollution exogène des bétons par les ions chlorures. Ces pollutions sont supérieures au seuil de dépassivation des aciers sur l'ensemble des éléments investigués. Cette pollution s'étend jusqu'à des profondeurs supérieures à 135 mm (au-delà des aciers les plus enrobés). Plus de 60% des aciers des massifs se trouvent en zone polluées par les chlorures.
- Les mesures de résistivité du béton mettent en évidence une faible résistivité du béton, propice à la propagation de la corrosion dans le milieu.

## IX - ETUDE DE LA CAPACITE DES MASSIFS A REPENDRE LES CHARGES INDUITES PAR LA MISE EN PLACE DES PASSERELLES

Dans cette section sont présentés les calculs de capacité portante des massifs comprenant : la présentation des documents de référence, la méthodologie et les hypothèses utilisées pour le calcul. Puis, la vérification des massifs des bassins 1 et 2 (Ouest et Est), avec la conclusion de leur capacité à reprendre les charges induites par la mise en place des passerelles.

### IX.1 - Documents de référence

#### IX.1.1 - Normes et règlements

- [1] Règles BAEL 91 révisé 99 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites
- [2] Règles BPEL 91 révisé 99 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint selon les méthodes des états limites

#### IX.1.2 - Dossier d'ouvrage

- [3] IOA – ESID – Base navale de Toulon – Zone des grands bassins Vauban – Fourniture de passerelles routières provisoires pour le franchissement de bassins de radoub – Passerelle Est – Descente de charges – 440116-NCA-IOA-21211-00003-20 – 25/08/2017
- [4] IOA – ESID – Base navale de Toulon – Zone des grands bassins Vauban – Fourniture de passerelles routières provisoires pour le franchissement de bassins de radoub – Passerelle Est – Piles métalliques – Vérifications – 440116-NCA-IOA-21211-00011-20 – 16/10/2017
- [5] IOA – ESID – Base navale de Toulon – Zone des grands bassins Vauban – Fourniture de passerelles routières provisoires pour le franchissement de bassins de radoub – Passerelle Ouest – Descente de charges – 440116-NCA-IOA-21212-00003-20 – 27/02/2016
- [6] IOA – ESID – Base navale de Toulon – Zone des grands bassins Vauban – Fourniture de passerelles routières provisoires pour le franchissement de bassins de radoub – Passerelle Ouest – Piles métalliques – Vérifications – 440116-NCA-IOA-21212-00011-20 – 16/10/2017
- [7] Bureau Veritas – Avis N°6 sur documents d'exécution – 20/07/2007
- [8] Janson Bridging – Heavy girder bridge (length 38100) with steel deck – Vehicular live load : 84 Tons – Toulon France – General arrangement HG-Bridge (TSR) – North West dock [Bridge-2] – (AS BUILT version 3 HG Bridge2 North-West Dock.pdf) – 4777/1 - P02-E – 16/01/2008

### IX.2 - Méthodologie

Sur la base des descentes de charges calculées lors de l'étude réalisée en 2016/2017 pour la fourniture de passerelles routières provisoires pour le franchissement de bassins de radoub (voir [3], [4], [5] et [6]) nous proposons d'étudier la capacité des massifs à reprendre les charges induites par la mise en place des passerelles en réalisant les vérifications suivantes :

- Comparaison des armatures en place avec les armatures requises d'une pièce en béton soumise à des pressions localisées calculées selon l'annexe E.8 du BAEL,
- Vérification de l'équilibre du coin selon l'annexe 4 du BPEL,
- Vérification de la portance du sol.



## IX.3 - Hypothèses

### IX.3.1 - Géométrie et ferrailage

Les dimensions des massifs sont détaillées en II.2 - .

Le ferrailage des massifs est détaillé sur le plan [8].

Note : les armatures relevées sont conformes aux indications du plan [8].

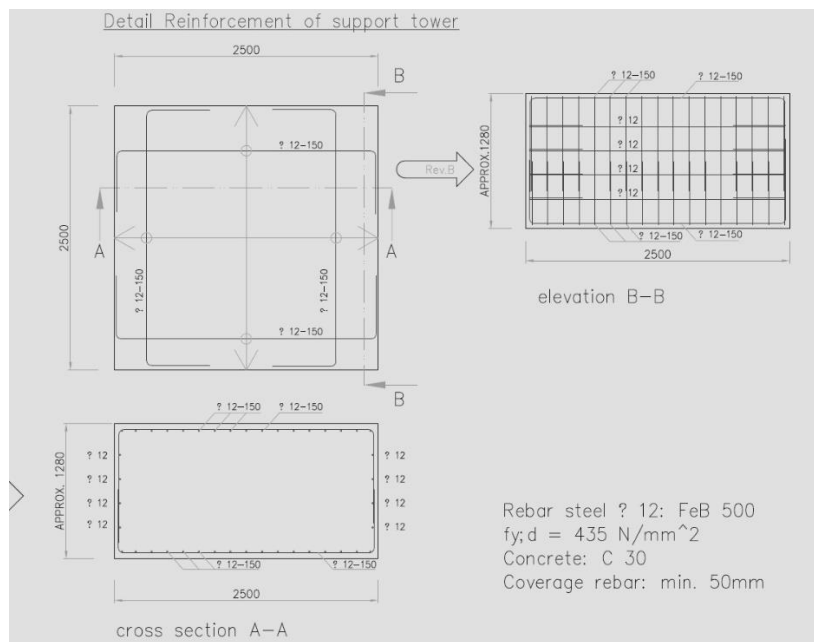


Figure 3 : Ferrailage des massifs - Extrait de [8]

### IX.3.2 - Matériaux

#### IX.3.2.1 - Béton

Comme indiqué sur le plan [8], le béton des massifs est de type C30.

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c =$$

situation durable et transitoire : 1,5

situation accidentelle : 1,0

Nota : Le diagnostic de 2014 indique une résistance à la compression du béton d'environ 45 MPa. Une hypothèse de résistance défavorable du béton (30 MPa) a été considérée au vu de l'évolution des désordres sur les massifs.

#### IX.3.2.2 - Armatures passives

Comme indiqué sur le plan [8], les armatures sont de type FeB500.

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

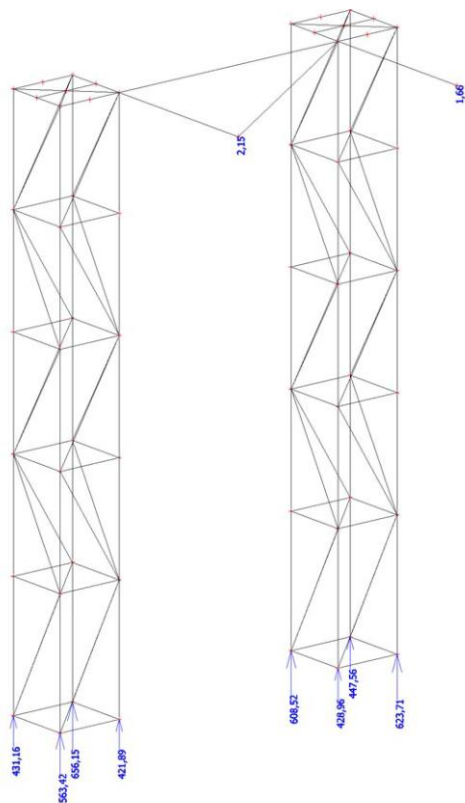
$$\gamma_s = 1,15$$

Classe acier B

### IX.3.3 - Charges

#### IX.3.3.1 - Passerelle Est (Bassin 2)

Comme détaillé dans [4], la réaction maximale d'un plot de fondation (d'une platine métallique) est de 656,15 kN.



#### 2.5.4. Réactions

Calcul linéaire, Extrême : Nd.

Sél. : Tout

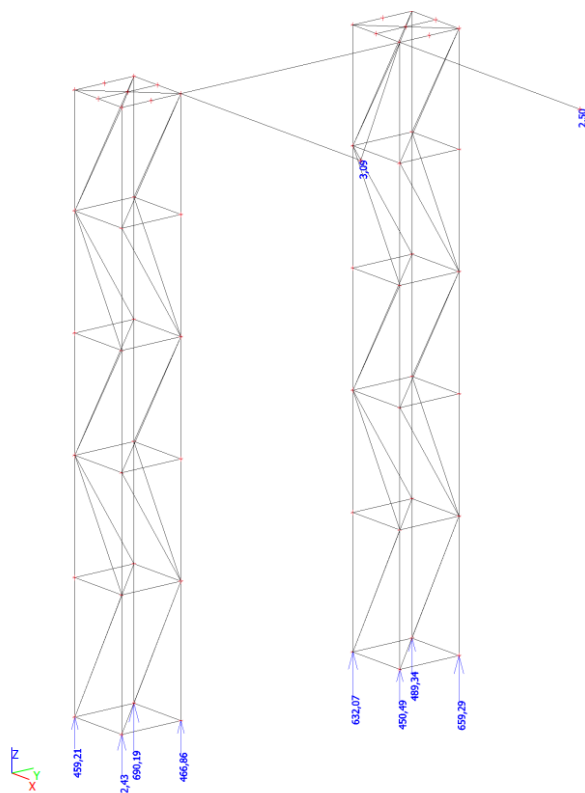
Classe : CR1

Appuis	Cas	Rz [kN]
Sn1/N4	CO1/3	<b>19,75</b>
Sn1/N4	CO8/4	<b>563,42</b>
Sn2/N8	CO1/3	<b>18,82</b>
Sn2/N8	CO8/4	<b>421,89</b>
Sn3/N6	CO1/3	<b>19,95</b>
Sn3/N6	CO8/1	<b>656,15</b>
Sn4/N1	CO1/3	<b>20,82</b>
Sn4/N1	CO8/1	<b>431,16</b>
Sn11/N30	CO1/3	<b>21,41</b>
Sn11/N30	CO11/5	<b>608,52</b>
Sn13/N33	CO1/3	<b>19,65</b>
Sn13/N33	CO11/2	<b>428,96</b>

Figure 3 : Passerelle Est – Réactions d'appui plots de fondation – Extrait de [4]

### IX.3.3.2 - Passerelle Ouest (Bassin 1)

Comme détaillé dans [6], la réaction maximale d'un plot de fondation est de 690,19 kN.



### 2.5.4. Réactions

Calcul linéaire, Extrême : Nd.

Sél. : Tout

Classe : CR1

Appuis	Cas	Rz [kN]
Sn1/N4	CO4/7	<b>5,97</b>
Sn1/N4	CO8/5	<b>582,43</b>
Sn2/N8	CO1/2	<b>19,12</b>
Sn2/N8	CO8/5	<b>466,86</b>
Sn3/N6	CO1/2	<b>20,26</b>
Sn3/N6	CO8/1	<b>690,19</b>
Sn4/N1	CO1/2	<b>20,92</b>
Sn4/N1	CO8/1	<b>459,21</b>
Sn11/N30	CO4/7	<b>2,57</b>
Sn11/N30	CO11/4	<b>632,07</b>
Sn13/N33	CO1/2	<b>19,72</b>
Sn13/N33	CO11/3	<b>450,49</b>
Sn15/N35	CO1/2	<b>20,58</b>
Sn15/N35	CO11/4	<b>489,34</b>
Sn16/N37	CO1/2	<b>18,64</b>

Figure 3 : Passerelle Est - Réactions d'appui plots de fondation - Extrait de [6][4]

### IX.3.4 - Géotechnique

Conformément à [3], [5] et [6] la contrainte admissible de compression en fond de bassin est de 10bars soit 1 MPa pour les deux bassins (Est et Ouest).

## IX.4 - Massifs de la passerelle Est

### IX.4.1 - Vérification des armatures en place selon l'annexe E.8 du BAEL

Nous calculons ci-dessous les armatures requises d'une pièce en béton soumise à des pressions localisées calculées selon l'annexe E.8 du BAEL.

**Calcul des armatures d'une pièce en béton soumise à des pressions localisées selon l'annexe E.8 du BAEL**

**Dimensions du rectangle d'impact**  
 $a_0 = 600 \text{ mm}$   
 $b_0 = 600 \text{ mm}$   
 présence d'un bossage ? **non**

**Dimensions de la pile ou du massif supportant la charge**  
 $A = 2500 \text{ mm}$   
 $B = 2500 \text{ mm}$

**Position de la charge**  
 $c = 425 \text{ mm}$   
 $d = 425 \text{ mm}$

**Dimensions du rectangle d'impact retenu**  
 $A' = 850 \text{ mm}$   
 $B' = 850 \text{ mm}$

**Vérification des conditions de débord minimal :**  
 $A/a = 1,42$  **OK**  
 $B/b = 1,42$  **OK**

Les rectangles sont-ils homothétiques ? oui  
 Si non homothétiques :  
 $K = 1,07$   
 Si homothétiques :  
 $s = a \times b = 360\,000 \text{ mm}^2$   
 $S = A \times B = 722\,500 \text{ mm}^2$   
 $K = 1,07$

**K retenu = 1,07** nota : il est possible d'admettre un K plus élevé (dans la limite imposée par le §A.8.4.3) si l'équilibre de coin est satisfait (cf. onglet "Equilibre du coin")

**Vérification de la pression localisée**  
 $R_{vj} = 656 \text{ kN}$  réaction verticale totale ELLU sur la surface  $a \times b$   
 $f_{cj} = 30 \text{ MPa}$   
 $\gamma_b = 1,50$   
 $\Theta = 1,00$   
 $f_{bu} = 17 \text{ MPa}$   
 $f_{tj} = 2,4 \text{ MPa}$   
 $\sigma_b = 1,8 \text{ MPa} < 18 \text{ MPa OK}$  La vérification de l'équilibre de coin n'est pas nécessaire

**Définition des prismes symétriques**  
 $d_1 = 850 \text{ mm}$   
 $d_2 = 850 \text{ mm}$

**- Frettage de surface**  
 $f_e = 500 \text{ MPa}$  limite élastique des aciers de frettage et anti-éclatement  
 $\gamma_s = 1,15$   
 $f_{su} = 435 \text{ MPa}$   
 $A_s = 0,60 \text{ cm}^2$  à placer sous la surface  $a_0 \times b_0$  (ou  $a \times b$  si bossage)

**- Anti éclatement**  
 Prise en compte de la résistance en traction du béton ? **oui**

position extrême ?	kj	Rj (kN)	Aej (cm²)	A total (cm²)	Téq [kN]	Tbéton,max [kN]	Béton suffisant ?	A total (cm²)	à placer sur au maximum :
direction A <b>oui</b>	1	48,2	1,11	1,11	48,2	694	<b>OK</b>	<b>0,00</b>	850 mm
direction B <b>oui</b>	1	48,2	1,11	1,11	48,2	694	<b>OK</b>	<b>0,00</b>	850 mm

#### Equilibre général de diffusion pure

$f_e = 500 \text{ MPa}$  limite élastique des aciers pour équilibre générale de diffusion pure

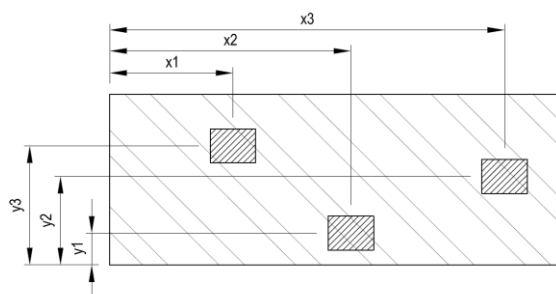
$f_{su} = 435 \text{ MPa}$

$L = 2\,500 \text{ mm}$  longueur totale du massif selon la dimension B

#### Diffusion selon plan // à B :

Réactions R<sub>ui</sub> Abscisse x<sub>i</sub> (m) Ordonnée y<sub>i</sub> (m)

1	656 kN	0,43	0,43
2	656 kN	0,43	2,08
3	656 kN	2,08	0,43
4	656 kN	2,08	2,08
5			
6			
7			
8			
9			
10			



#### Torseur total :

$N_u = 2\,625 \text{ kN}$

axe x :  
diffusion // A

axe y : diffusion  
// B

$M_u = [\text{kN.m}]$  0,0 0,0  $M_{uy} > 0$  comprime côté gauche ;  $M_{ux} > 0$  comprime côté inf

Longueur de régularisation  $l_r = [\text{mm}]$  2500 2500

charges linéiques à la base du volume de régularisation :

axe x	axe y
$p^- = [\text{kN/m}]$ 1049,8	1049,8
$p^+ = [\text{kN/m}]$ 1049,8	1049,8

Diffusion selon axe x (// à la dimension B) :

Ag à prévoir = 0,00 cm<sup>2</sup> à placer sur 2/3 x  $l_r = 1,67 \text{ m}$

Diffusion selon axe y (// à la dimension A) :

Ag à prévoir = 0,00 cm<sup>2</sup> à placer sur 2/3 x  $l_r = 1,67 \text{ m}$

### Les armatures en place sont suffisantes.

Nota : Les dimensions des platines métalliques sont considérées de 600x600 mm puisque les réactions d'appui des passerelles ne s'appliquent pas sur l'entièreté des platines (goussets situés au centre des platines).

## IX.4.2 - Vérification de l'équilibre du coin selon l'annexe 4 du BPEL

L'équilibre du coin est vérifié selon l'annexe 4 du BPEL.

**Vérification de l'équilibre du coin (BPEL Annexe 4)**

Ouvrage étudié : **longrine**

$\phi = 33,7^\circ$  angle de frottement interne béton  
 $\gamma_s = 1,15$   
 $f_e = 500$  MPa  
 $f_{cj} = 25$  MPa  
 $\tau_{u, \text{lim}} = 1,00$  MPa §BAEL A.5.1.1

**Surface d'application de la charge =**  
longueur = **1,25** m  
largeur totale massif = **2,50** m  
largeur a = **0,75** m  
auteur totale du massif considérée H totale = **0,92** m  
angle du parement ext  $\gamma = 90,0^\circ$

$R_u = 656,2$  kN  
 $H_u = 0,0$  kN >0 si dirigé vers parement

**Armatures disponibles :**  
horizontales  
1  
diamètre [mm] **12**  
nombre de barres **8,00**  
distance au parement sup [m] **0,05**  
distance extrémité au parement latéral gauche [m] **0,05**  
distance extrémité au parement latéral droite [m] **0,05**  
type d'ancrage à gauche **lancrage=0**  
type d'ancrage à droite **lancrage=0**  
type barre **nervurée**  
longueur d'ancrage à gauche [mm] 0  
longueur d'ancrage à droite [mm] 0  
section [cm²] 9,05  
prise en compte des barres comprimées ? **non**  
parallèles au parement extérieur  
1  
diamètre [mm] **12**  
nombre de barres **8,00**  
distance au parement latéral [m] **0,05**  
distance biaise extrémité au parement sup [m] **0,05**  
distance biaise extrémité au parement inf [m] **0,05**  
type d'ancrages sup **lancrage=0**  
type d'ancrages inf **lancrage=0**  
type barre **nervurée**  
longueur d'ancrage sup [mm] 0  
longueur d'ancrage inf [mm] 0  
section [cm²] 9,05  
prise en compte des barres comprimées ? **non**  
Statut vérifications = **OK**  $\tau_{\text{max}} = 0,35$  MPa

														Contibution des armatures [kN]						Statut	Taux de travail
				Torseur dans plan de rupture [kN]				Effort à reprendre par armatures [kN]		Section disponible [cm²]		Angle armatures avec plan de rupture (°)		Tangentielle			Normale				
Θ (°)	Hauteur du coin [m]	Longueur du plan de rupture [m]	Angle entre plan de rupture et vertical [°]	N (>0 si compression)	T (>0 si dirigé vers parement latéral)	Contrainte de cisaillement sur le plan de rupture [MPa]	Armatures nécessaires pour reprendre T ?	T (>0 si dirigé vers parement latéral)	N (>0 si traction)	horiz.	paral.	horiz.	paral.	horiz.	paral.	Total	horiz.	paral.	Total		
5																					
10																					
15																					
20																					
25																					
30																					
35																					
40	0,89	1,17	40,0	421,8	502,6	0,34	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	50	40	0,0	132,8	132,8	301,3	252,9	554,2	OK	0%
45	0,75	1,06	45,0	464,0	464,0	0,35	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	45	45	0,0	92,7	92,7	278,2	278,2	556,3	OK	0%
50	0,63	0,98	50,0	502,6	421,8	0,34	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	40	50	0,0	52,0	52,0	252,9	301,3	554,2	OK	0%
55	0,53	0,92	55,0	537,5	376,4	0,33	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	35	55	0,0	10,8	10,8	225,6	322,2	547,9	OK	0%
60	0,43	0,87	60,0	568,2	328,1	0,30	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	30	60	0,0	-30,4	-30,4	196,7	340,7	537,4	OK	0%
65	0,35	0,83	65,0	594,7	277,3	0,27	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	25	65	0,0	-71,4	-71,4	166,3	356,5	522,8	OK	0%
70	0,27	0,80	70,0	616,6	224,4	0,22	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	20	70	0,0	#####	#####	134,5	369,7	504,2	OK	0%
75	0,20	0,78	75,0	633,8	169,8	0,17	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	15	75	0,0	#####	#####	101,8	380,0	481,8	OK	0%
80	0,13	0,76	80,0	646,2	113,9	0,12	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	10	80	0,0	#####	#####	68,3	387,4	455,7	OK	0%
85	0,07	0,75	85,0	653,7	57,2	0,06	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	5	85	0,0	#####	#####	34,3	391,9	426,2	OK	0%

L'équilibre du coin est vérifié.

#### IX.4.3 - Vérification de la portance du sol.

Réaction maximale d'un plot de fondation = 656,15 kN

Chaque massif reprend 4 plots de fondation (platines métalliques).

L'effort normal maximal repris est ainsi de 2624,6 kN (en considérant de manière défavorable que les 4 plots de fondation reprennent simultanément la charge maximale).

La hauteur du massif (0,92 m) étant suffisante pour diffuser la charge sur toute sa surface, la pression exercée sur le sol est ainsi de 0.42 MPa < 1 MPa admissible.

**La portance du sol est suffisante pour reprendre les charges induites par la mise en place de la passerelle.**

### **IX.5 - Massifs de la passerelle Ouest**

#### IX.5.1 - Vérification des armatures en place selon l'annexe E.8 du BAEL

Nous calculons ci-dessous les armatures requises d'une pièce en béton soumise à des pressions localisées calculées selon l'annexe E.8 du BAEL.



Calcul des armatures d'une pièce en béton soumise à des pressions localisées selon l'annexe E.8 du BAEL

Dimensions du rectangle d'impact

$a_0 = 600 \text{ mm}$

$b_0 = 600 \text{ mm}$

présence d'un bossage ? **non**

$a \text{ retenu} = 600 \text{ mm}$

$b \text{ retenu} = 600 \text{ mm}$

Dimensions de la pile ou du massif supportant la charge

$A = 2500 \text{ mm}$

$B = 2500 \text{ mm}$

Position de la charge

$c = 425 \text{ mm}$

$d = 425 \text{ mm}$

Dimensions du rectangle d'impact retenu

$A' = 850 \text{ mm}$

$B' = 850 \text{ mm}$

Vérification des conditions de débord minimal :

$A/a = 1,42$

**OK**

$B/b = 1,42$

**OK**

Les rectangles sont-ils homothétiques ? oui

Si non homothétiques :

$K = 1,07$

Si homothétiques :

$s = a \times b = 360\,000 \text{ mm}^2$

$S = A \times B = 722\,500 \text{ mm}^2$

$K = 1,07$

**K retenu = 1,07**

nota : il est possible d'admettre un K plus élevé (dans la limite imposée par le §A.8.4.3) si l'équilibre de coin est satisfait (cf. onglet "Equilibre du coin")

Vérification de la pression localisée

$R_d = 690 \text{ kN}$

réaction verticale totale ELU sur la surface  $a \times b$

$f_{cj} = 30 \text{ MPa}$

$\gamma_b = 1,50$

$\Theta = 1,00$

$f_{bu} = 17 \text{ MPa}$

$f_{tj} = 2,4 \text{ MPa}$

$\sigma_b = 1,9 \text{ MPa} < 18 \text{ MPa OK}$

La vérification de l'équilibre de coin n'est pas nécessaire

Définition des prismes symétriques

$d_1 = 850 \text{ mm}$

$d_2 = 850 \text{ mm}$

- Frettage de surface

$f_e = 500 \text{ MPa}$

limite élastique des aciers de frettage et anti-éclatement

$\gamma_s = 1,15$

$f_{su} = 435 \text{ MPa}$

$A_s = 0,63 \text{ cm}^2$

à placer sous la surface  $a_0 \times b_0$  (ou  $a \times b$  si bossage)

- Anti éclatement

Prise en compte de la résistance en traction du béton ? **oui**

position extrême ?	kj	Rj (kN)	Aej (cm²)	A total (cm²)	Téq [kN]	Tbéton,max [kN]	Béton suffisant ?	A total (cm²)	à placer sur au maximum :
direction A	<b>oui</b>	1	50,7	1,17	50,7	694	<b>OK</b>	<b>0,00</b>	850 mm
direction B	<b>oui</b>	1	50,7	1,17	50,7	694	<b>OK</b>	<b>0,00</b>	850 mm

Equilibre général de diffusion pure

$f_e = 500 \text{ MPa}$

limite élastique des aciers pour équilibre générale de diffusion pure

$f_{su} = 435 \text{ MPa}$

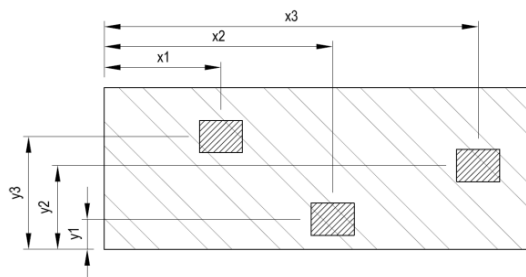
$L = 2500 \text{ mm}$

longueur totale du massif selon la dimension B

Diffusion selon plan // à B :

Réactions Rui Abscisse xi (m) Ordonnée yi (m)

1	<b>690 kN</b>	<b>0,43</b>	<b>0,43</b>
2	<b>690 kN</b>	<b>0,43</b>	<b>2,08</b>
3	<b>690 kN</b>	<b>2,08</b>	<b>0,43</b>
4	<b>690 kN</b>	<b>2,08</b>	<b>2,08</b>
5			
6			
7			
8			
9			
10			



Torseur total :

$N_u = 2\,761 \text{ kN}$

axe x : axe y : diffusion

diffusion // A // B

$M_u = [kN.m] \quad 0,0 \quad 0,0 \quad M_{uy}>0 \text{ comprime côté gauche ; } M_{ux}>0 \text{ comprime côté inf}$

Longueur de régularisation  $l_r = [mm] \quad 2500 \quad 2500$

charges linéiques à la base du volume de régularisation :

axe x	axe y
$p^- = [kN/ml] \quad 1104,3$	$1104,3$
$p^+ = [kN/ml] \quad 1104,3$	$1104,3$

Diffusion selon axe x (// à la dimension B) :

**Ag à prévoir = 0,00 cm²** à placer sur  $2/3 \times l_r = 1,67m$

Diffusion selon axe y (// à la dimension A) :

**Ag à prévoir = 0,00 cm²** à placer sur  $2/3 \times l_r = 1,67m$

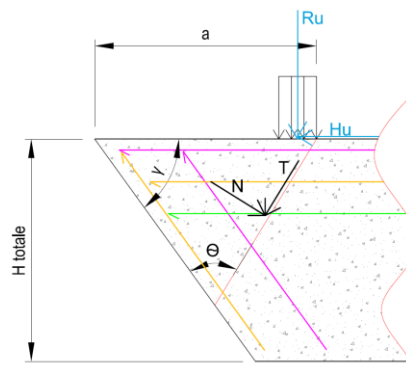
## Les armatures en place sont suffisantes.

Nota : Les dimensions des platines métalliques sont considérées de 600x600 mm puisque les réactions d'appui des passerelles ne s'appliquent pas sur l'entièreté des platines (goussets situés au centre des platines).

### IX.5.2 - Vérification de l'équilibre du coin selon l'annexe 4 du BPEL

L'équilibre du coin est vérifié selon l'annexe 4 du BPEL.

Vérification de l'équilibre du coin (BPEL Annexe 4)			
Ouvrage étudié : <b>longrine</b>			
$\phi =$	33,7 °	angle de frottement interne béton	
$\gamma_s =$	<b>1,15</b>		
$f_e =$	<b>500</b> MPa		
$f_{cj} =$	<b>25</b> MPa		
$\tau_{u, lim}$	1,00 MPa	§BAEL A.5.1.1	
<b>Surface d'application de la charge =</b>			
longueur =	<b>1,25</b> m		
largeur totale massif =	<b>2,50</b> m		
largeur a =	<b>0,75</b> m		
hauteur totale du massif considérée H totale=	<b>1,28</b> m		
angle du parement ext $\gamma =$	<b>90,0 °</b>		
$R_u =$	<b>690,2</b> kN		
$H_u =$	<b>0,0</b> kN	>0 si dirigé vers parement	
<b>Armatures disponibles :</b>			
horizontales			
1	1		
diamètre [mm]	<b>12</b>		
nombre de barres	<b>8,00</b>		
distance au parement sup [m]	<b>0,05</b>		
distance extrémité au parement latéral gauche [m]	<b>0,05</b>		
distance extrémité au parement latéral droite [m]	<b>0,05</b>		
type d'ancrage à gauche	<b>lancrage=0</b>		
type d'ancrage à droite	<b>lancrage=0</b>		
type barre	<b>nervurée</b>		
longueur d'ancrage à gauche [mm]	0		
longueur d'ancrage à droite [mm]	0		
section [cm²]	9,05		
prise en compte des barres comprimées ?	<b>non</b>		
parallèles au parement extérieur			
1	1		
diamètre [mm]	<b>12</b>		
nombre de barres	<b>8,00</b>		
distance au parement latéral [m]	<b>0,05</b>		
distance biaise extrémité au parement sup [m]	<b>0,05</b>		
distance biaise extrémité au parement inf [m]	<b>0,05</b>		
type d'ancrages sup	<b>lancrage=0</b>		
type d'ancrages inf	<b>lancrage=0</b>		
type barre	<b>nervurée</b>		
longueur d'ancrage sup [mm]	0		
longueur d'ancrage inf [mm]	0		
section [cm²]	9,05		
prise en compte des barres comprimées ?	<b>non</b>		
Statut vérifications = <b>OK</b>			
<b><math>\tau_{umax} = 0,37</math> MPa</b>			



														Contibution des armatures [kN]						Statut	Taux de travail
Torseur dans plan de rupture [kN]							Effort à reprendre par armatures [kN]		Section disponible [cm²]		Angle armatures avec plan de rupture (°)		Tangentielle			Normale					
Θ (°)	Hauteur du coin [m]	Longueur du plan de rupture [m]	Angle entre plan de rupture et vertical [°]	N (>0 si compression)	T (>0 si dirigé vers parement latéral)	Contrainte de cisaillement sur le plan de rupture [MPa]	Armatures nécessaires pour reprendre T ?	T (>0 si dirigé vers parement latéral)	N (>0 si traction)	horiz.	paral.	horiz.	paral.	horiz.	paral.	Total	horiz.	paral.	Total		
5																					
10																					
15																					
20																					
25																					
30																					
35	1,07	1,31	35,0	395,9	565,4	0,35	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	55	35	0,0	171,8	171,8	322,2	225,6	547,9	OK	0%
40	0,89	1,17	40,0	443,6	528,7	0,36	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	50	40	0,0	132,8	132,8	301,3	252,9	554,2	OK	0%
45	0,75	1,06	45,0	488,0	488,0	0,37	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	45	45	0,0	92,7	92,7	278,2	278,2	556,3	OK	0%
50	0,63	0,98	50,0	528,7	443,6	0,36	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	40	50	0,0	52,0	52,0	252,9	301,3	554,2	OK	0%
55	0,53	0,92	55,0	565,4	395,9	0,35	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	35	55	0,0	10,8	10,8	225,6	322,2	547,9	OK	0%
60	0,43	0,87	60,0	597,7	345,1	0,32	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	30	60	0,0	-30,4	-30,4	196,7	340,7	537,4	OK	0%
65	0,35	0,83	65,0	625,5	291,7	0,28	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	25	65	0,0	-71,4	-71,4	166,3	356,5	522,8	OK	0%
70	0,27	0,80	70,0	648,6	236,1	0,24	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	20	70	0,0	#####	#####	134,5	369,7	504,2	OK	0%
75	0,20	0,78	75,0	666,7	178,6	0,18	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	15	75	0,0	#####	#####	101,8	380,0	481,8	OK	0%
80	0,13	0,76	80,0	679,7	119,9	0,13	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	10	80	0,0	#####	#####	68,3	387,4	455,7	OK	0%
85	0,07	0,75	85,0	687,6	60,2	0,06	Non	0,0	0,0	9,05	9,05	5	85	0,0	#####	#####	34,3	391,9	426,2	OK	0%

**L'équilibre du coin est vérifié.****IX.5.3 - Vérification de la portance du sol.**

Réaction maximale d'un plot de fondation = 690,19 kN

Chaque massif reprend 4 plots de fondation.

L'effort normal maximal repris est ainsi de 2760,76 kN (en considérant de manière défavorable que les 4 plots de fondation reprennent simultanément la charge maximale).

La hauteur du massif (1,28 m) étant suffisante pour diffuser la charge sur toute sa surface, la pression exercée sur le sol est ainsi de 0.442 MPa < 1 MPa admissible.

**La portance du sol est suffisante pour reprendre les charges induites par la mise en place de la passerelle.**

**IX.6 - Synthèses des calculs**

Les hypothèses pour les calculs de portance des massifs ont été prises selon les plans disponibles dans le DOE de l'ouvrage complété par les observations sur site (vérification des dimensions, des positionnements, des épaisseurs, des désordres...).

Certaines hypothèses défavorables ont été prises de manière à prendre en compte l'altération des matériaux (résistance du béton plus faible, dimensions des platines inférieures). Ces hypothèses montrent de plus que l'ensemble des vérifications sont satisfaisantes même dans ces conditions.

**Les massifs d'appui des bassins Est et Ouest sont suffisamment résistants pour reprendre les charges induites par la mise en place de la passerelle.**

## X - CONCLUSION

### X.1 - Avis sur l'état général des ouvrages

Les massifs sont dans un **mauvais état général** d'un point de vue pathologie des matériaux et dans un **état correct** d'un point de vue structurel.

L'appréciation pathologique est due aux désordres identifiés sur les surfaces de bétons, qui apparaissent essentiellement liés à la dégradation des platines, dont on observe le caractère évolutif ainsi que les résultats du diagnostic mené et du potentiel de développement élevé de la corrosion à moyen terme (en condition émergée).

En effet, ce développement découle de la concomitance d'une pollution exogène par les chlorures et d'une pénétration très profonde de ces mêmes chlorures sur l'ensemble des éléments investigués.

A l'heure actuelle, les armatures sont exposées en forte proportion (jusqu'à 100 % des aciers détectés) à un potentiel développement généralisé du phénomène de corrosion piloté par les ions chlorures. On constate également une teneur plus concentrée depuis la face supérieure en raison vraisemblablement de la présence de fissures sur ces faces, favorisant la pénétration d'agents pathogènes.

Cependant, les constats réalisés sur les aciers signalent qu'à l'heure actuelle, le développement ne s'est pas initié en raison de l'absence d'une émergence suffisante des massifs pour la pénétration d'oxygène dans le béton. L'absence de corrosion au droit des sondages réalisés ne peut exclure la présence de piqûres de corrosion dans les zones non investiguées.

**Le constat de la pollution des bétons par les chlorures mis en lumière par les analyses chimiques indique un fort potentiel de développement de la corrosion des armatures sur la surface totale de l'ouvrage.** Le risque de développement d'une corrosion par dissolution des armatures à moyen terme est donc important en raison de la forte teneur actuelle en ions chlorures sur l'ensemble des éléments investigués et par l'environnement agressif auquel est soumis l'ouvrage (alternance d'immersion chargées en saumure / émergence avec oxygène, apport éventuel de chlorures par voie aérienne etc...).

Les platines présentent un état très dégradé avec des pertes de sections allant jusqu'à 4 mm d'épaisseur. Les goussets servant de butée pour les passerelles métalliques présentent également des pertes de section ne leur permettant plus de remplir leur rôle. Les désordres observés, tels que les coulures de rouilles et le faïençage en surface, sur les massifs pourraient trouver leur origine dans la corrosion des ancrages des platines.

Enfin, le calcul des massifs montre que le ferrailage mis en place et la résistance du béton est suffisante pour supporter les charges apportées par les passerelles, **la capacité portante des massifs est vérifiée.**

## X.2 - Préconisations de travaux

### X.2.1 - Remplacement des platines métalliques

Compte tenu de leur état de dégradation les platines devront faire l'objet d'un remplacement y compris de leur ancrage. Ces travaux nécessiteront une purge d'au moins 25 cm, au droit des ancrages, depuis la surface des massifs d'après les plans DOE.

### X.2.2 - Traitement des bétons

#### X.2.2.1 - Rappel des stratégies de réparations

Sur la base du **cadre normatif** de la NF EN 1504, sur les produits et les systèmes utilisés pour la réparation, la maintenance et la protection, la restauration et le renforcement des structures en béton, deux **stratégies de réparation sur un ouvrage existant peuvent être bâties** :

- Une stratégie dite « **classique** »,
- Une stratégie dite « **renforcée** ».

La stratégie de réparation dite « classique » doit être adaptée en fonction des données du diagnostic (corrosion initiée par les chlorures ou uniquement carbonatation), de l'historique de l'ouvrage, de son exposition et de leur capacité portante.

En cas d'exposition courante aux sels marins et en présence de chlorures à des taux significatifs, la stratégie de réparation doit être renforcée et inclure un traitement de fond de la corrosion.

Plusieurs solutions sont alors possibles :

<b>Solution 1.</b>	Purger l'ensemble des bétons pollués par les chlorures (stratégie dite classique).
<b>Solution 2.</b>	Extraire les ions chlorures du béton au moyen d'un procédé de déchloruration.
<b>Solution 3.</b>	Protéger les armatures au moyen d'un inhibiteur de corrosion.
<b>Solution 4.</b>	Mettre en œuvre une protection cathodique des armatures par courant imposé.
<b>Solution 5.</b>	Mettre en œuvre une protection galvanique des armatures.

La **solution 1**, au regard des profondeurs de pénétrations des ions chlorures, de l'environnement marin auquel il est exposé et de la durabilité de vie de l'ouvrage souhaité par le maître d'ouvrage (4 ans supplémentaires), les purges et réparations conventionnelles des bétons pourraient être suffisantes, moyennant une purge complète des bétons pollués. Une purge étendue des bétons au regard des épaisseurs considérées (jusqu'à 135 mm minimum suivant l'élément considéré) est nécessaire et peut avoir un impact structurel sur les massifs, cela reviendrait à démolir une grande partie des plots.

La **solution 2** consiste par l'application d'un courant forcé (via la mise en place d'anodes) à faire migrer les espèces polluantes (chlorures) vers la surface des bétons. Techniquement, elle pourrait être adaptée au cas par cas à certains éléments dont la profondeur de pollution est inférieure ou égale à l'enrobage des aciers. Néanmoins, la présence récurrente de pollution au-delà de certains aciers et qui ne serait pas traité conduisent à écarter d'ores et déjà cette solution.

La **solution 3** peut être envisagée dans des cas très particuliers de bétons poreux, fortement carbonatés et présentant des teneurs en chlorures faibles. Dans le cas des massifs des bassins Vauban, cette solution apparaît donc inadaptée.

Les **solutions 4 et 5** peuvent être adaptées dans le cas de bétons pollués par les ions chlorures. La mise en œuvre d'un système de protection cathodique suivant la norme EN ISO 12696 :2022 permettrait de limiter les travaux de purge et de traitement des aciers aux seules zones de désordres déclaré tout en protégeant l'ensemble des structures. Elle consiste à disposer des anodes au sein du béton pollué, par anodes galvaniques (protection galvanique) ou connectées à un générateur de courant (protection par courant imposé), pour abaisser le potentiel de l'acier. La tension imposée rend alors l'acier cathodique et le protège.

Notamment, le dimensionnement et la réalisation des travaux de protection cathodique sont régis par la norme à performance EN ISO 12696 :2022 et doivent être réalisés par du personnel formé et certifié suivant la norme EN ISO 15257. Le nombre, le type, la taille et la localisation des anodes à mettre en œuvre, ainsi que la densité de courant de protection doivent être déterminés par une étude de dimensionnement préalable. Elle est fonction :

- De la durée de vie souhaitée.
- De la résistivité des bétons en place.
- De la surface d'acier à protéger.
- De la densité du courant de corrosion existant dans les éléments de structure.

Compte tenu de l'importance des travaux de purges liés aux remplacement platines, de la typologie des ouvrages et de la durée de vie souhaitée des massifs, cette solution ne semble pas être la plus adaptée.



### X.3 - Stratégie de démolition / reconstruction

Compte tenu de l'importance des travaux de purges liés au remplacement des platines et du fort potentiel d'évolution des désordres liés à la pollution des chlorures, il est opportun d'étudier la solution de démolition / reconstruction des massifs.

En effet une solution de démolition totale des massifs peut être envisagée afin de les remplacer soit par des éléments similaires (coulés en place ou préfabriqués), soit par une structure différente. Les conditions d'accès au site pour les engins de manutention et de fichage du système devront être bien étudiées.

Les différentes solutions de démolition/reconstruction pourront être étudiées plus en détail selon les orientations et choix du maître d'ouvrage, dans le cadre des études d'avant-projet.

### X.4 - Stratégie intermédiaire – réparation partielle

Compte tenu de la durée de vie souhaitée des ouvrages (4 ans), une solution intermédiaire de réparation peut être envisagée.

Celle-ci consisterait à purger le béton de surface afin de remplacer les platines et leurs ancrages et découvrir la première nappe d'armatures des massifs. La purge s'étendra sur la profondeur de béton pollué par les chlorures, soit environ 15 cm. Un point d'arrêt devra être réalisé à ce stade afin d'observer s'il y a présence d'une corrosion au niveau des ancrages des platines et sur les armatures.

Nota : La corrosion des armatures liées aux chlorures peut prendre la forme de piquûration. Un examen visuel minutieux sera à réaliser. En effet, les techniques de démolition telle que l'hydrodémolition, supprime toutes traces de corrosion sur les armatures. Un examen et des mesures de section résiduelle seront donc à prévoir.

Si des aciers sont découverts avec une présence de corrosion et/ou une perte de section, le remplacement complet des massifs sera à reconsidérer. Dans le cas contraire, le béton purgé devra être remis en état avec un enrobage suffisant des armatures.

Les désordres présents sur les autres faces des massifs feront l'objet d'une purge et d'une réparation partielle en surface.

Dans le cadre de cette solution, les aciers situés en face latérale, ne faisant pas l'objet d'une purge complète, resteront dans le domaine pollué par les chlorures, un risque d'amorce de la corrosion dans le temps est alors possible. Ainsi, il est conseillé de réaliser une inspection régulière des massifs, à raison de tous les 6 mois, de manière à vérifier une potentielle évolution des désordres depuis les dernières réparations et dans l'attente de la mise en place des passerelles.

Les massifs pourront ainsi être sauvegardés et réutilisés lors de la prochaine mise en place des passerelles métalliques dans 2 ans.

Rapport établi le 10/02/2025

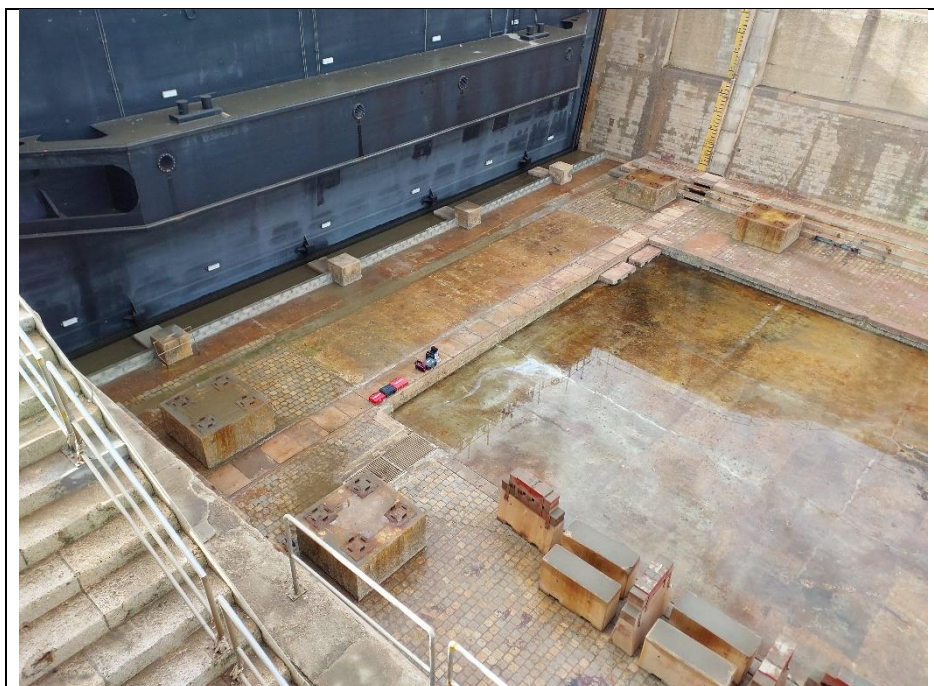
Agent chargé de la visite	Rédacteur du présent rapport	Responsable de l'étude
A. CARREAU F. COLLAS A. VIENNE	A. VIENNE	B. BOISSET

## Annexe 1

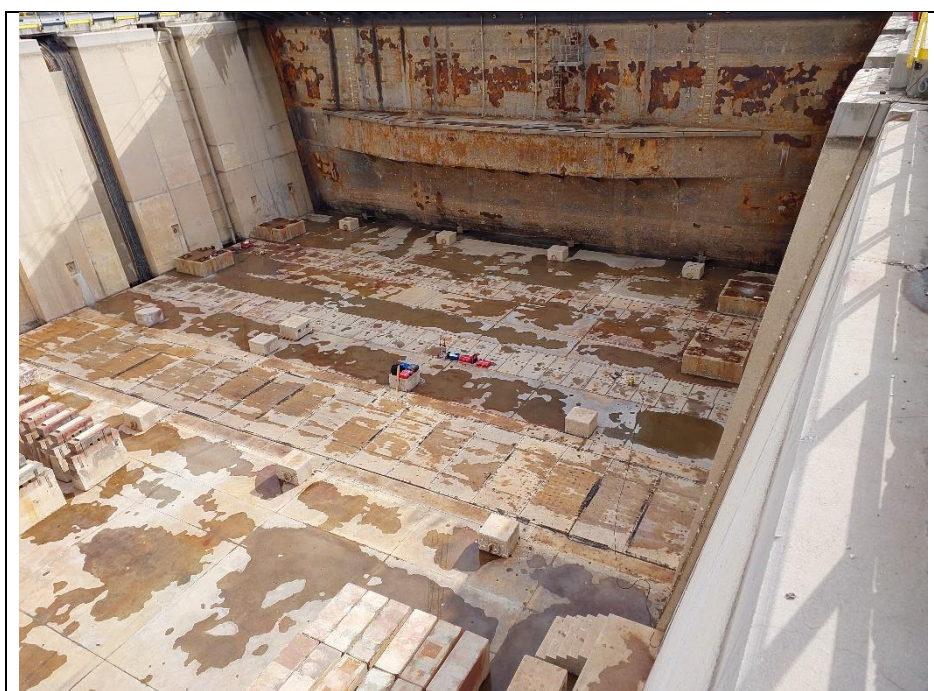
# Reportage photographique



SIXENSE



N° Photo	Localisation	Constats
1	Bassin 1	Vue générale du bassin 1 (Ouest)



N° Photo	Localisation	Constats
2	Bassin 2	Vue générale du bassin 2 (Est)





N° Photo	Localisation	Constats
3	M1.4	Vue générale d'une face d'un massif



N° Photo	Localisation	Constats
4	M1.2	Vue générale de la surface latérale d'un massif





N° Photo	Localisation	Constats
5	M2.2	Vue générale d'une face latérale d'un massif



N° Photo	Localisation	Constats
6	M1.2	Vue générale de la surface d'un massif





N° Photo	Localisation	Constats
5	M1.2 angle face C	Fissuration rectiligne depuis l'angle du massif

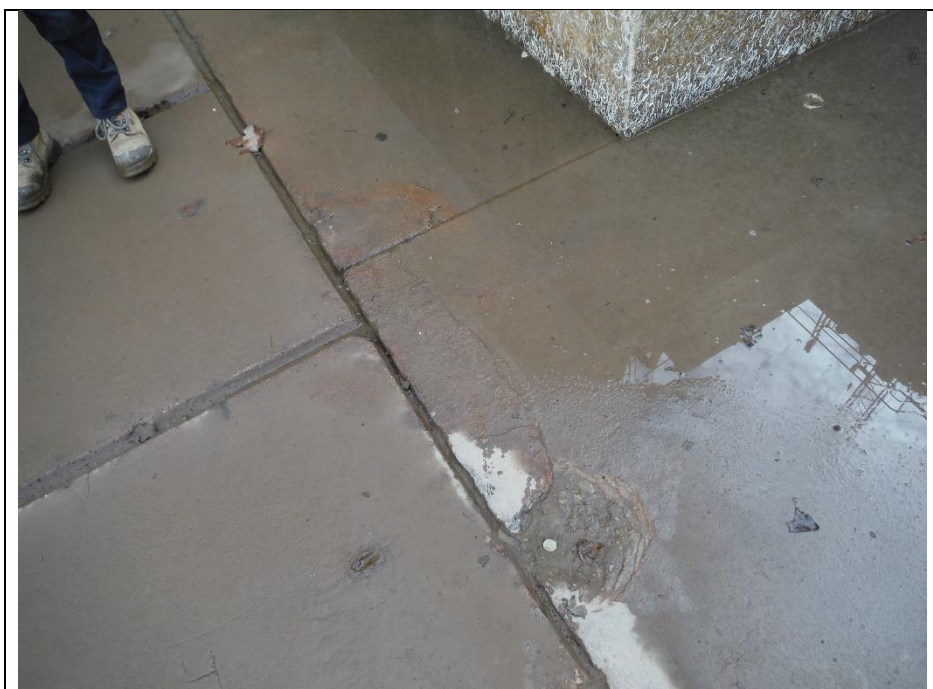


N° Photo	Localisation	Constats
6	M2.4	Fissuration rectiligne de la dalle béton armé à proximité du massif





N° Photo	Localisation	Constats
7	M1.3 face C	Décalage entre éléments de maçonnerie depuis la face d'un massif



N° Photo	Localisation	Constats
8	M1.3	Eclat en formation d'une dalle en béton





N° Photo	Localisation	Constats
9	M1.4	Stagnation d'eau généralisée sur le radier



N° Photo	Localisation	Constats
10	M2.3 face C	Fissures verticale calcitées ouv. Maxi 0,6 mm





N° Photo	Localisation	Constats
11	M1.4 face A	Coulure d'oxyde depuis la surface du massif et fissure horizontale calcifiée



N° Photo	Localisation	Constats
12	M2.3 face A	Fissure verticale avec coulures d'oxyde ouv. Maxi 0.8 mm sur toute la hauteur du plot





N° Photo	Localisation	Constats
13	M2.1 face B	Eclat en formation dans l'angle d'un massif



N° Photo	Localisation	Constats
14	M2.4 face C	Eclat dans l'angle du massif depuis la platine métallique





N° Photo	Localisation	Constats
15	Surface M1.2	Faiénçage généralisée de la surface du plot



N° Photo	Localisation	Constats
16	Généralisé en face latérale	Ségrégation du béton





N° Photo	Localisation	Constats
17	Angle massifs	Ragréage fissuré avec formation d'éclat



N° Photo	Localisation	Constats
18	M1.2	Stagnation d'eau en surface des plots





N° Photo	Localisation	Constats
21	Généralisée	Couche de crustacés sur toutes les surface des massifs



N° Photo	Localisation	Constats
22	Généralisé	Décollement du mortier de liaison massifs/platines





N° Photo	Localisation	Constats
23	Bassin 1	Corrosion feuilletante des platines métalliques



N° Photo	Localisation	Constats
24	Bassin 1	Corrosion feuilletante des platines métalliques





N° Photo	Localisation	Constats
25	Bassin 2	Corrosion feuilletante des platines métalliques



N° Photo	Localisation	Constats
26	Bassin 2	Corrosion feuilletante des platines métalliques

## Annexe 2

# Cartographie des désordres

- LEGENDE DES DESORDRES -

<div>Ec°</div> <div></div>	: Eclat de béton d'angle
<div>Ec</div> <div></div>	: Eclat de béton de parement
<div>F-Ec°</div> <div></div>	: Eclat de béton d'angle en formation
<div>AA</div> <div></div>	: Acier apparent
<div>μF</div> <div></div>	: Microfissure (ouverture indiquée en mm)
<div>F</div> <div></div>	: Fissure (ouverture indiquée en mm)
<div>F r</div> <div></div>	: Fracture (ouverture indiquée en mm)
<div>Fc</div> <div></div>	: Fissure calcitée
<div>Seg</div> <div></div>	: Ségrégation du beton (nid de cailloux)
<div>Eff</div> <div></div>	: Efflorescence blanche
<div>Ca</div> <div></div>	: Calcites, Stalactites
<div>Veg</div> <div></div>	: Végétation
<div></div> <div></div>	: Humidité de parement
<div></div> <div></div>	: Humidité ponctuelle
<div>C.Ox</div> <div></div>	: Coulure d'oxyde, rouille

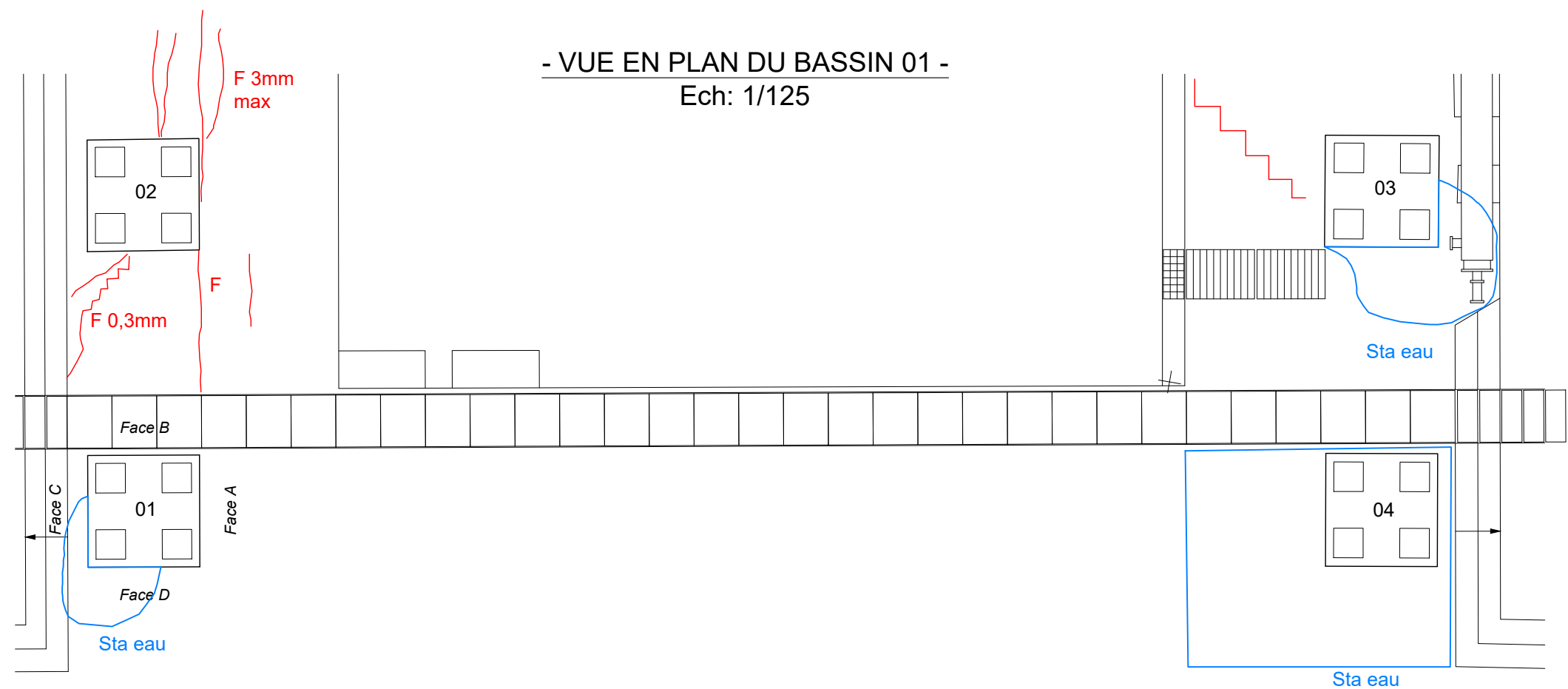
<div>R</div> <div></div>	: Ragréage
<div>R+f</div> <div></div>	: Ragréage fissuré
<div>R+Ox</div> <div></div>	: Ragréage avec traces de rouilles (Oxydation)
<div>R+Dec</div> <div></div>	: Ragréage décollé "sonnant creux"
<div></div> <div>Ph 16</div>	: Photographie n° 16

Anciens désordres 2014 (gris)

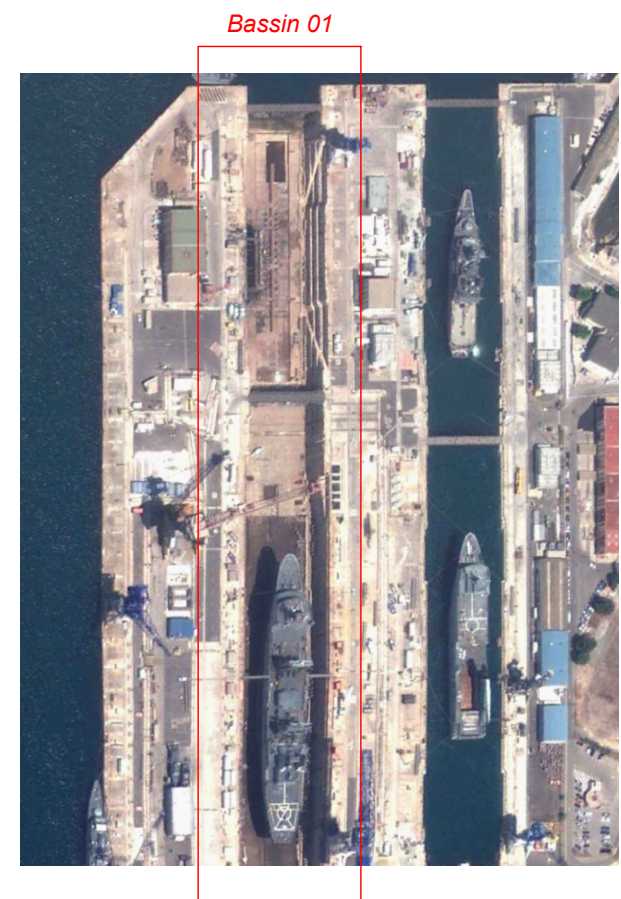
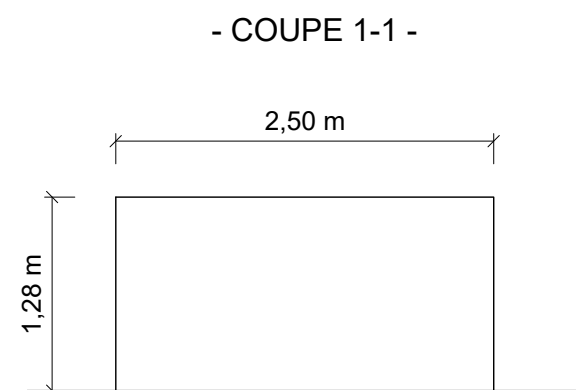
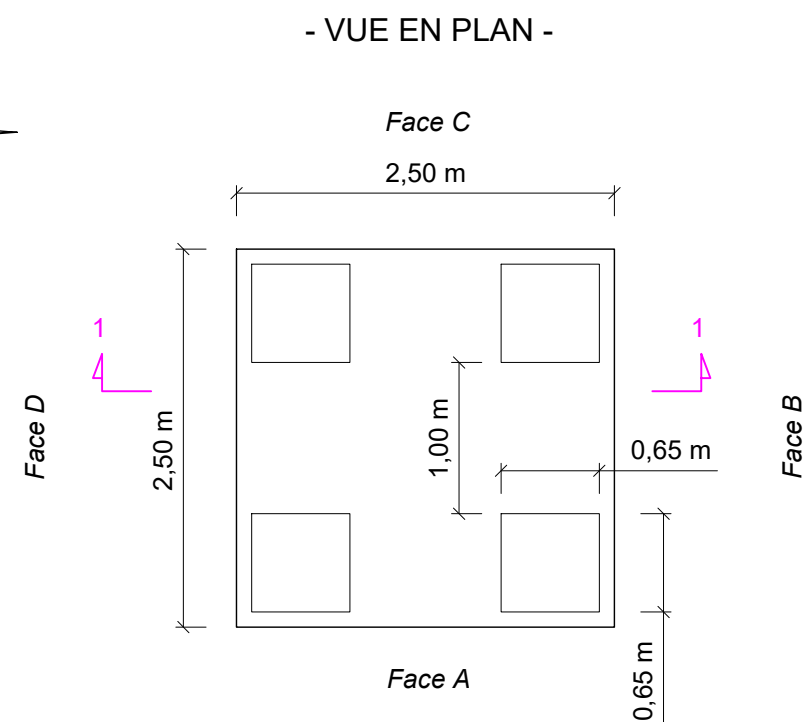
<div>0,1</div> <div></div>	: Fissure (ouverture indiquée en mm)
<div>Fc</div> <div></div>	: Fissure calcitée
<div>AA</div> <div></div>	: Acier apparent
<div>Ec</div> <div></div>	: Eclat de béton
<div>Alt</div> <div></div>	: Altération superficielle
<div>F-Ec</div> <div></div>	: Eclat en cours de formation
<div>Fai</div> <div></div>	: Faïençage
<div>Hum</div> <div></div>	: Humidité
<div>C.Ox</div> <div></div>	: Coulure oxydée
<div>Ca</div> <div></div>	: Coulure de calcite
<div>R+dec</div> <div></div>	: Ragréage décollé
<div>R+f</div> <div></div>	: Ragréage fissuré



Phase RAPPORT	ESID - BASE NAVALE DE TOULON (83) BASSINS VAUBAN	Annexe 3 Indice A
Affaire n° A24 11870 BEI	LEGENDE DES DESORDRES	12/11/2024 Page 1 / 5
Dessiné par: FLCO	Vérifié par: AYVI	



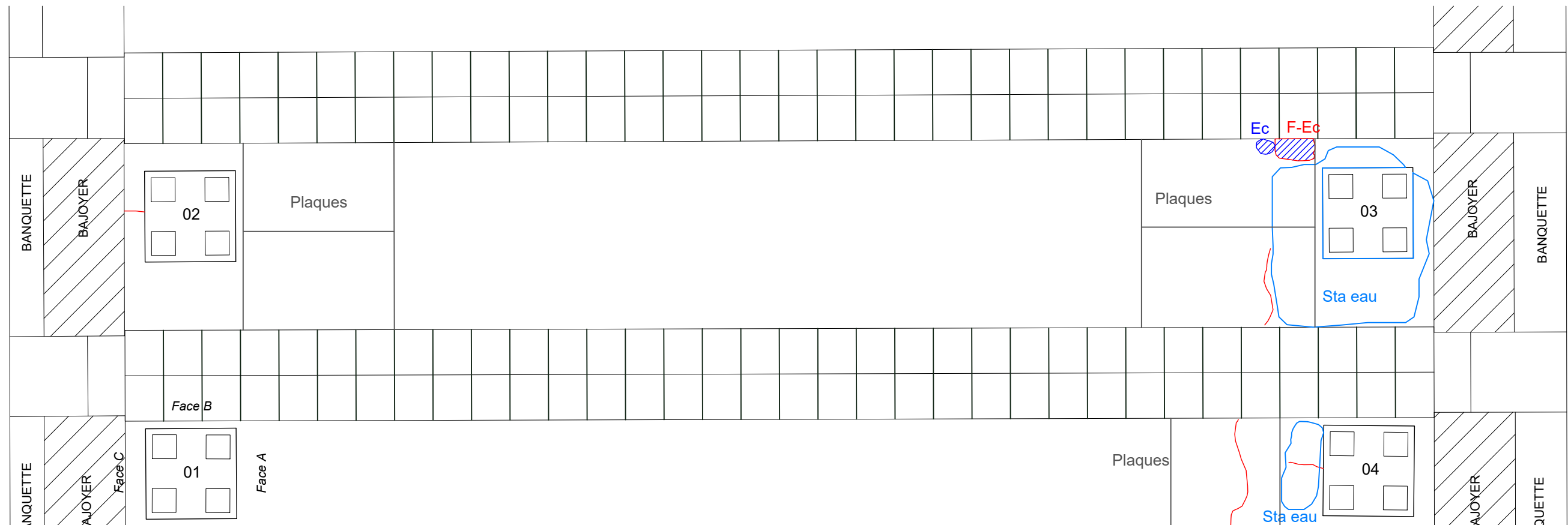
- GEOMETRIE DES MASSIFS DU BASSIN 01 -  
Ech: 1/50



Phase RAPPORT	ESID - BASE NAVALE DE TOULON (83) BASSINS VAUBAN	Annexe 3 Indice A
Affaire n° A24 11870 BEI	RELEVÉ DE DESORDRES BASSIN 01 - DEVELOPPE DES MASSIFS 1 à 4	12/11/2024 Page 2 / 5
Dessiné par: FLCO		Vérifié par: AYYI

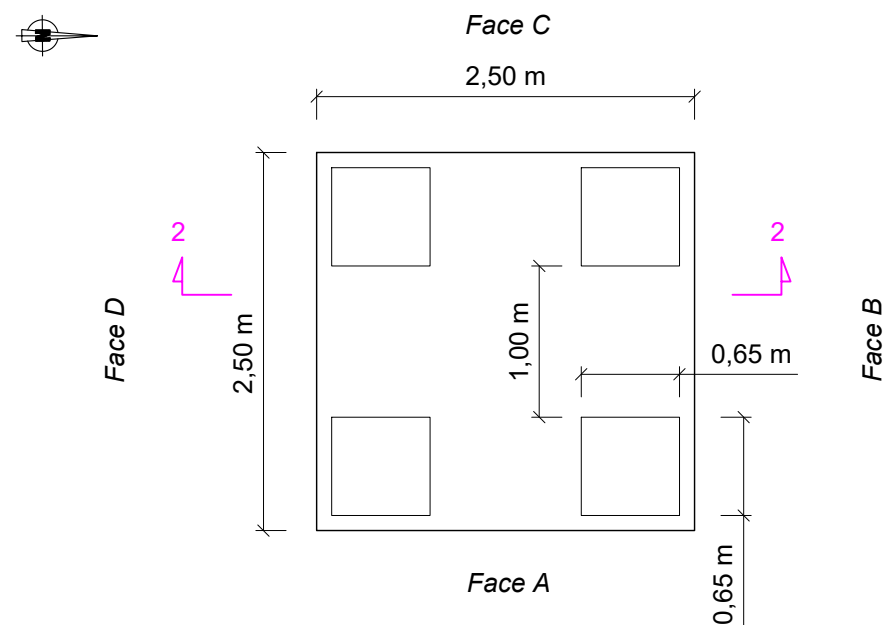


- VUE EN PLAN DU BASSIN 02 -  
Ech: 1/125

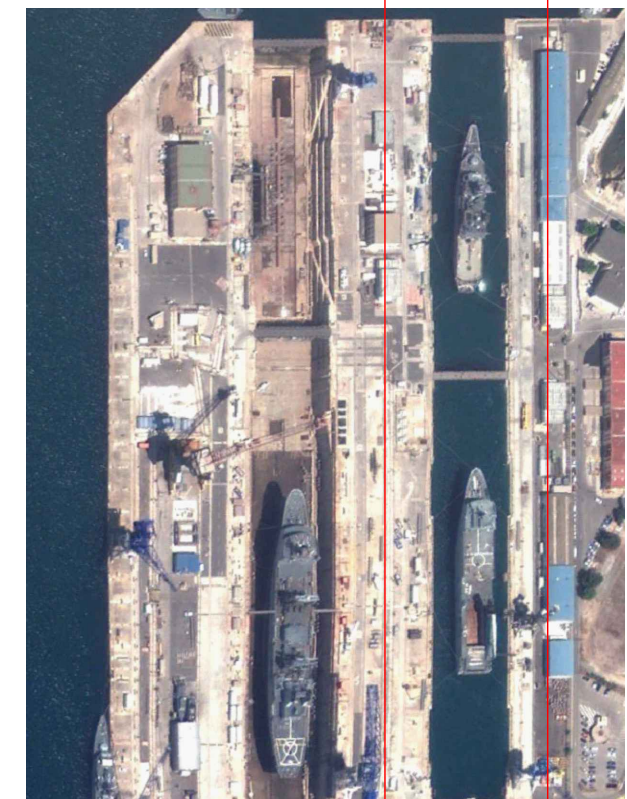
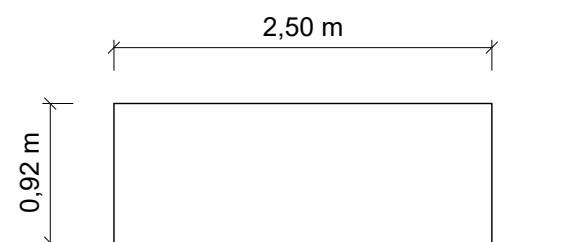


- GEOMETRIE DES MASSIFS DU BASSIN 02 -  
Ech: 1/50

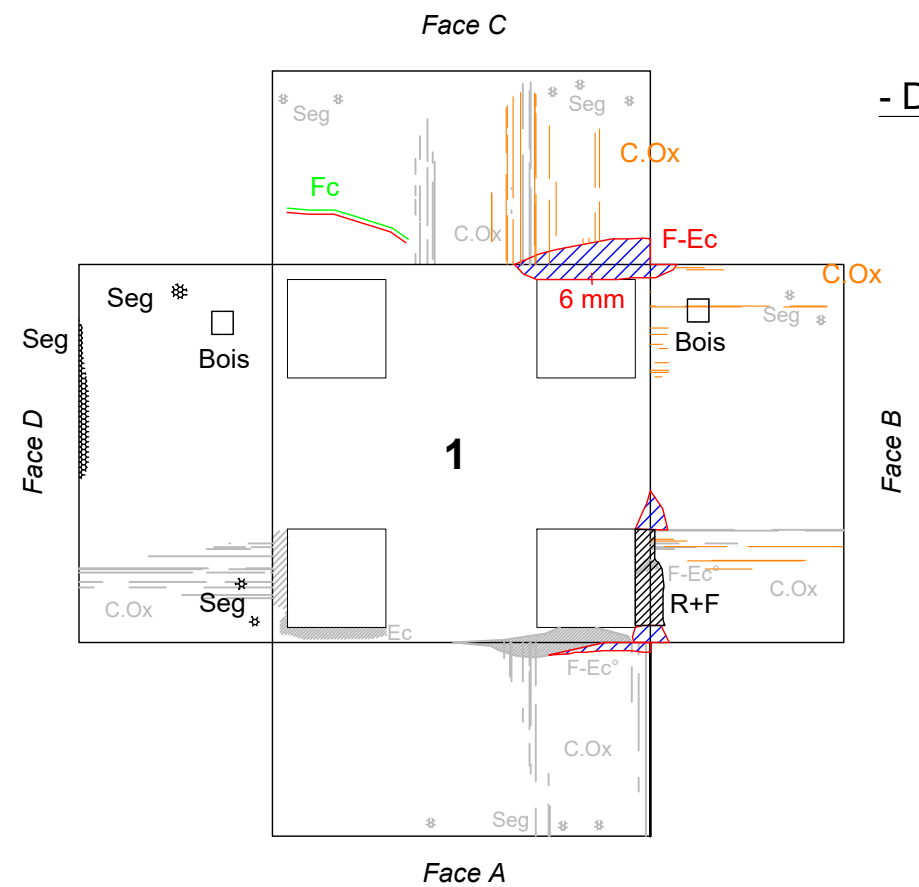
- VUE EN PLAN -



- COUPE 2-2 -

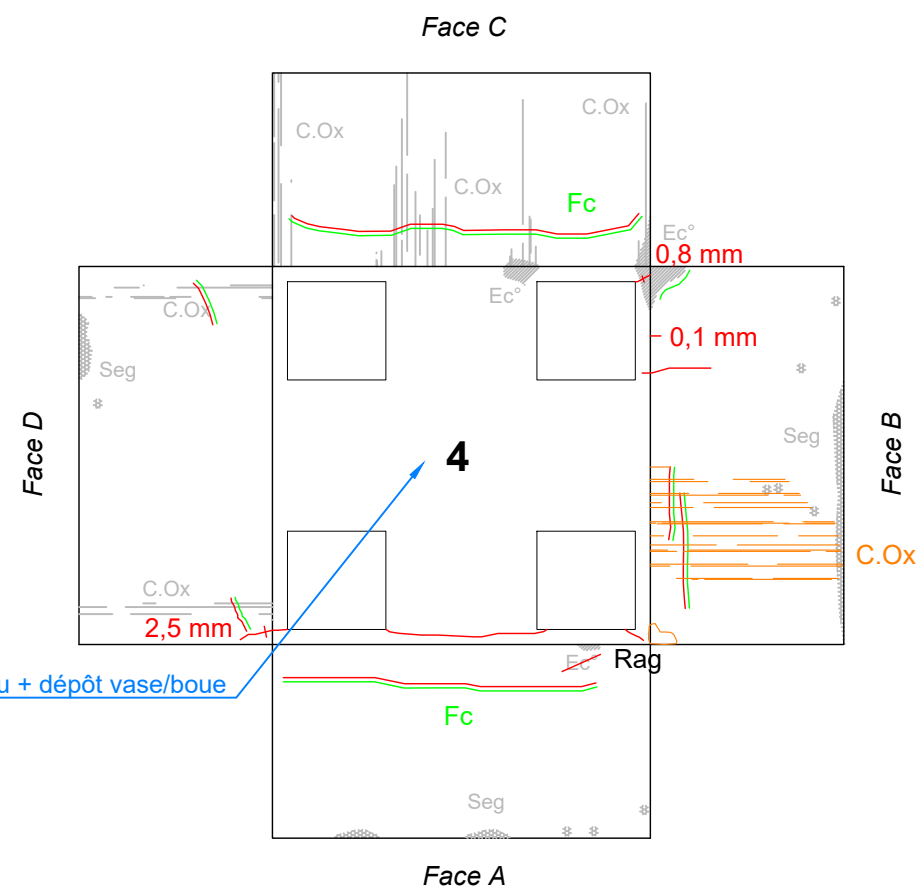
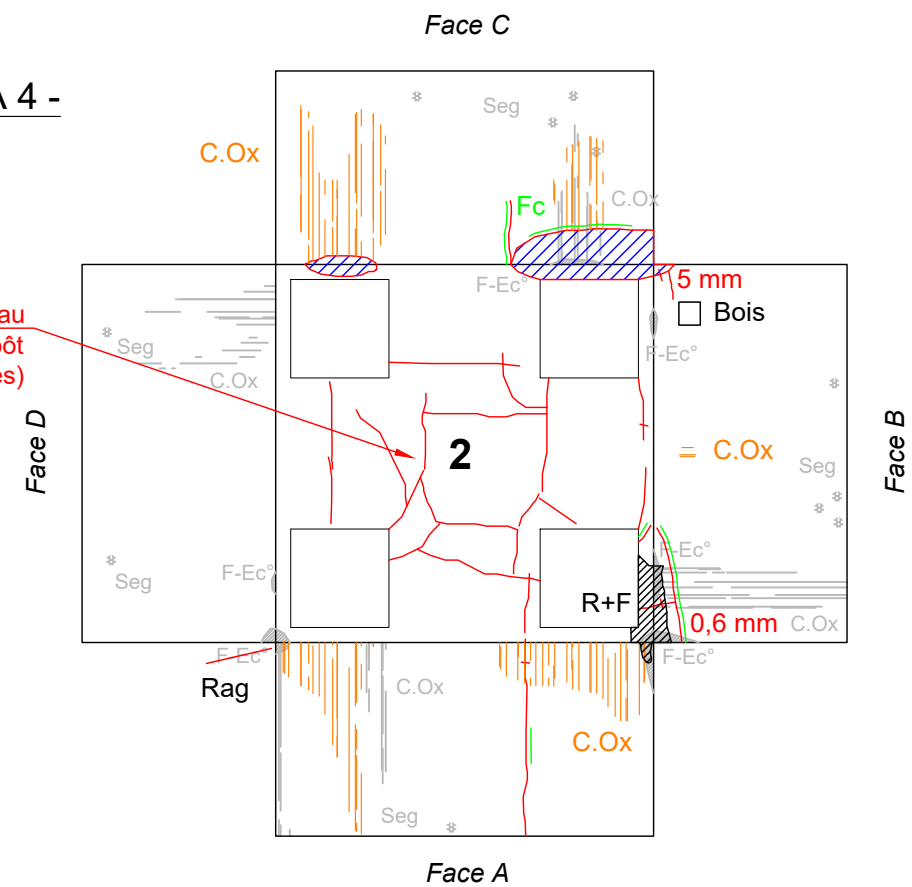




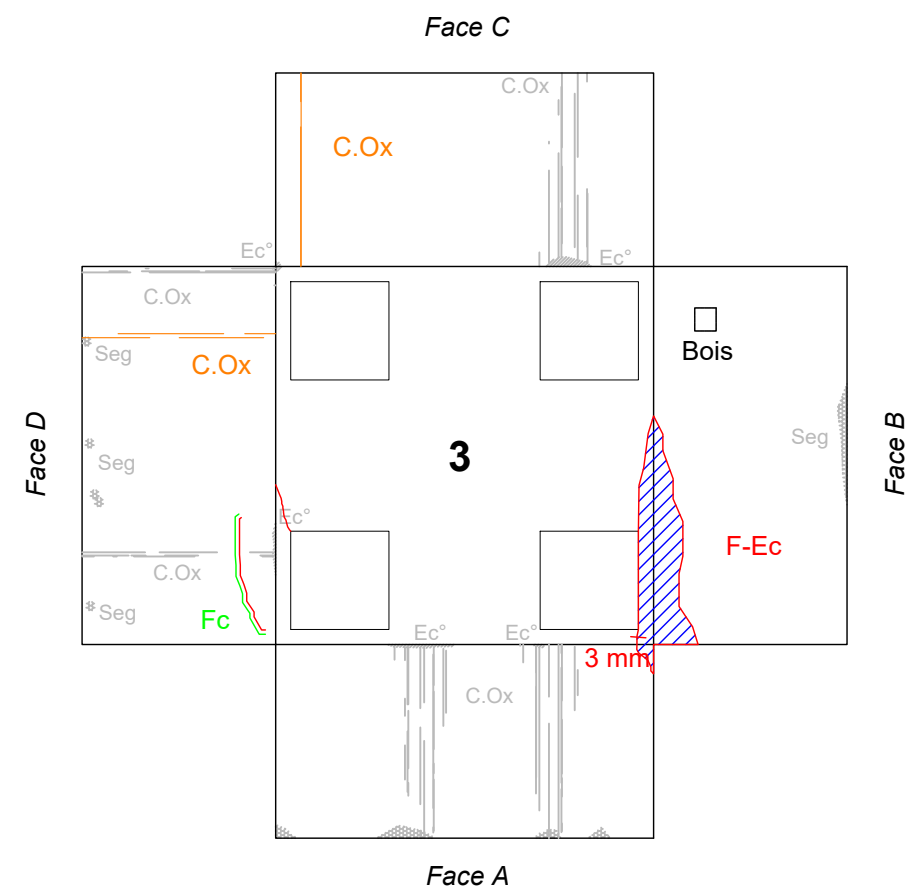


**BASSIN 01**  
**- DEVELOPPE DES MASSIFS 1 A 4 -**  
 Ech: 1/50

Stagnation d'eau + Faïençage + Réseau  
 de fissures entre platines avec dépôt  
 (Ouvertures non déterminées)



Stagnation d'eau + dépôt vase/boue



VERS  
 BASSIN 02

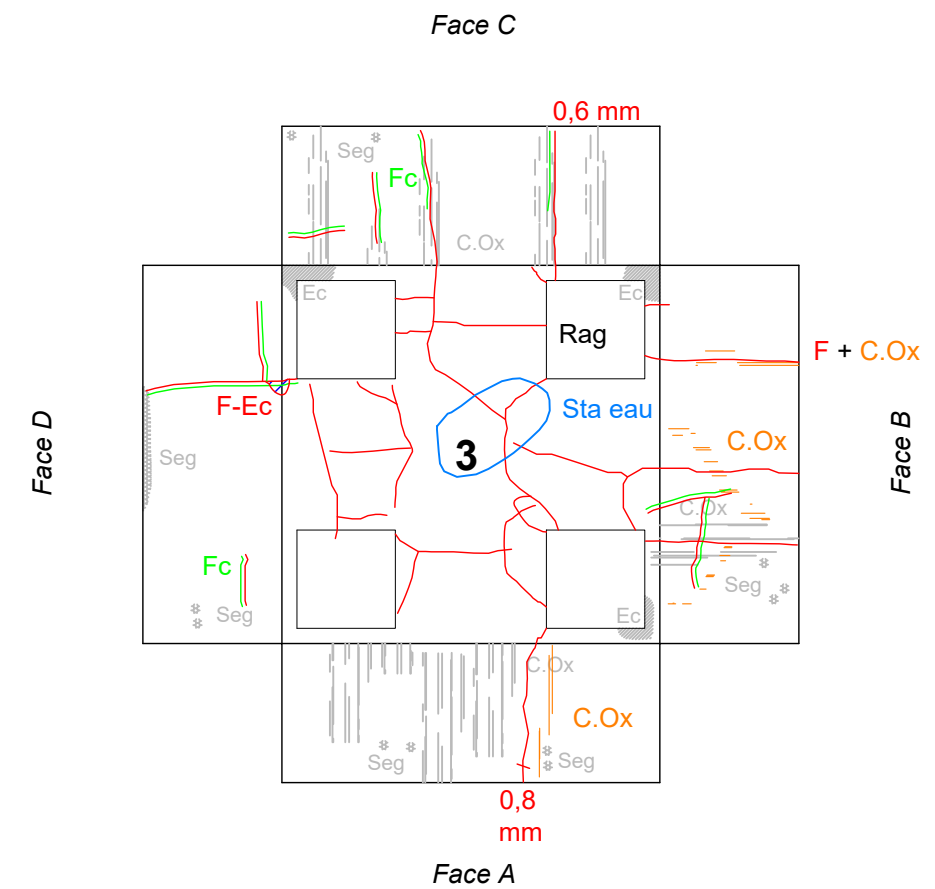
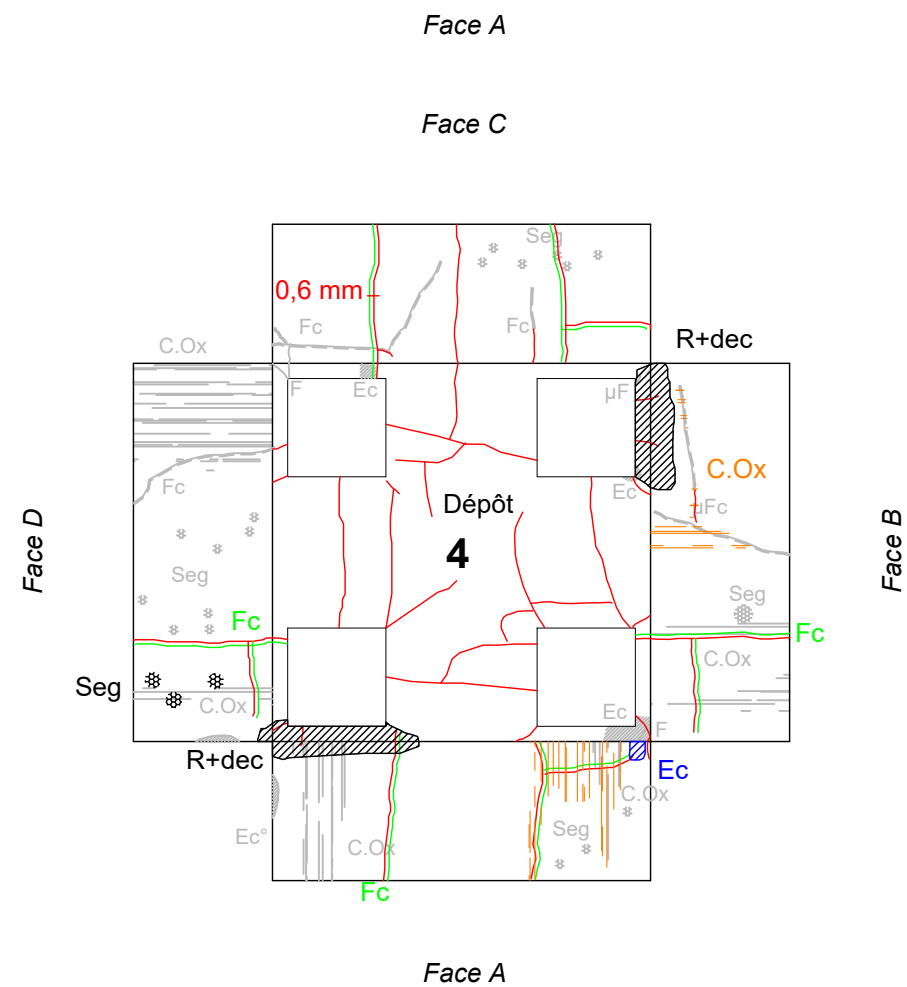
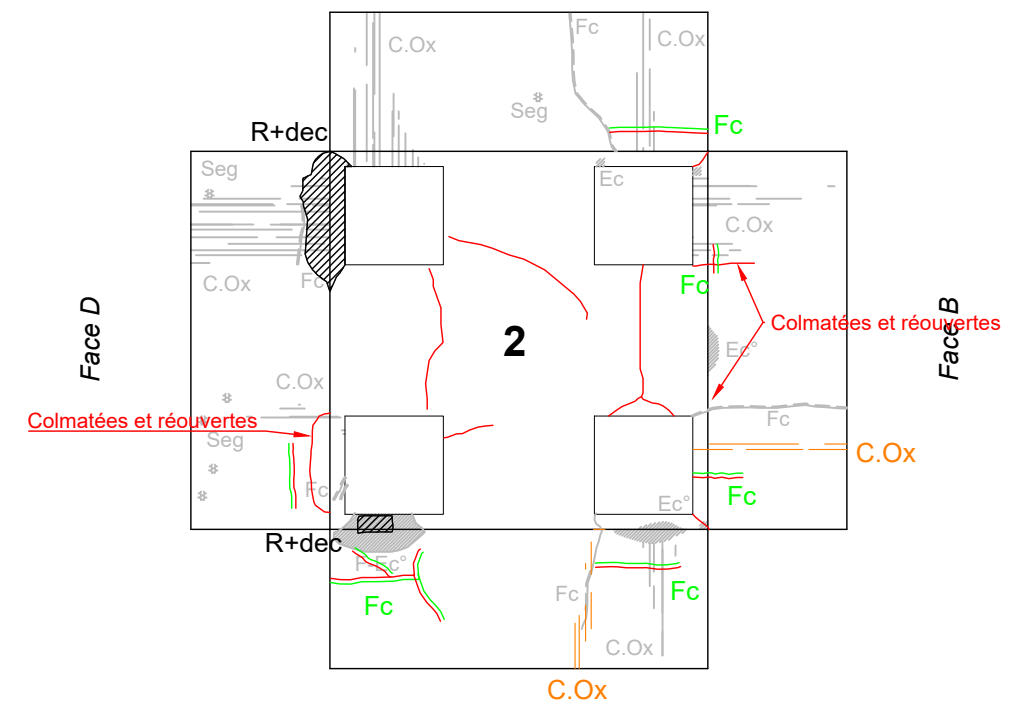
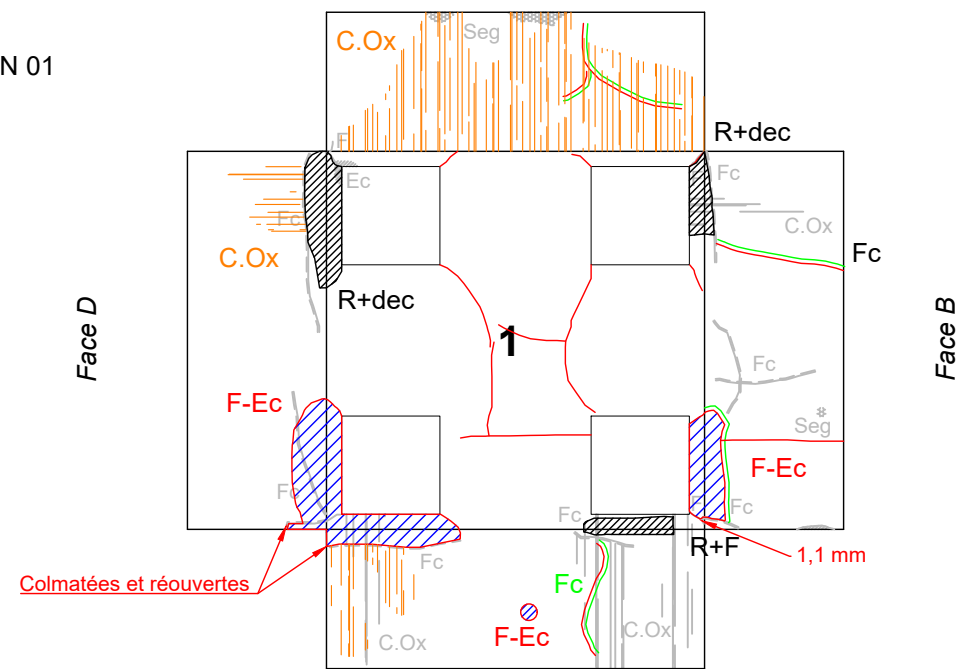
Remarque générale: Eléments métalliques sur les têtes des massifs  
 fortement corrodés, feuilletage et perte de section.  
 Ensemble des massifs recouverts de fossiles de crustacés.  
 Mortier de liaison platines/massifs décollés généralisés.



Phase RAPPORT	ESID - BASE NAVALE DE TOULON (83) BASSINS VAUBAN	Annexe 3 Indice A
Affaire n° A24 11870 BEI	RELEVÉ DE DESORDRES BASSIN 01 - DEVELOPPE DES MASSIFS 1 à 4	12/11/2024 Page 4 / 5
Dessiné par: FLCO	Vérifié par: AYYI	

Ech: 1/50

4 VERS  
BASSIN 01



Remarque générale: Eléments métalliques sur les têtes des massifs fortement corrodés, feuilletage et perte de section.

Ensemble des massifs recouverts de fossiles de crustacés.  
Mortier de liaison platines/massifs décollés généralisés.

## Annexe 3

# Principes et méthodologie des essais

## EVALUATION DE LA QUALITE D'ENROBAGE DES ARMATURES

Les enrobages des armatures sur les différents éléments de structure ont été mesurés de façon à déterminer la vulnérabilité des aciers vis-à-vis de la pénétration des agents pathogènes (chlorures et front de carbonatation). Les structures diagnostiquées ont été construites à des époques et années différentes suivant des modalités / règles de construction différentes. Toutefois, en termes de durabilité, l'analyse des enrobages est réalisée en comparant les enrobages avec les classes d'exposition attendues pour de tels ouvrages actuellement.

Les Eurocodes définissent actuellement un enrobage minimum requis, déterminé en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale de l'ouvrage.

Dans le cas présent, nous prenons pour hypothèse que l'ouvrage est de classe structurale **S4** (« Ouvrage de génie civil courant »). Dans le cas de bétons de massifs en béton armé le plus souvent immergés dans l'eau de mer, il serait à considérer que le béton est soumis à un risque de corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer (**XS3** : Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer et situé en zone de marnage, subissant des cycles d'immersion et de séchage).

Voir classe d'exposition : NF EN 206+A2 (mars 2021)

Classe structurale	Classe d'exposition						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1 XS1 XA1	XD2 XS2 XA2	XD3 XS3 XA3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Figure 1 : tableau des valeurs  $c_{min,dur}$  (en mm) en fonction de la classe d'exposition

En considérant cette classe d'exposition, il en découle que les enrobages réels relevés sur site seront comparés à titre indicatif à l'enrobage suivant afin d'évaluer la durabilité des bétons investigués :

- › Classe d'exposition XS3 : **enrobage min. 45 mm**

Les mesures ont été réalisées grâce à un radar et un Ferroskan. L'un permettant d'apprécier les enrobages des armatures et de déterminer leur position et leurs espacements, tandis que l'autre permet d'obtenir des statistiques sur l'enrobage moyen des aciers et leurs espacements. Le diamètre du ferrailage mis en place ne pourra quant à lui pas être déterminé via ces éléments, c'est pour cela que des examens visuels après sondage sont réalisés (cf VII.2.2).

## MESURE DU POTENTIEL DE CORROSION DES ARMATURES

---

L'activité corrosive est évaluée au sein du béton par mesure du potentiel d'électrode des armatures. Ces mesures permettent d'établir une cartographie de potentiels afin d'estimer l'étendue et la probabilité d'évolution des zones de corrosion d'armatures au sein du milieu environnant.

L'appareillage de mesure est constitué d'un multimètre haute résolution couplé à une électrode de référence calibrée à un potentiel stable, qui se compose :

- D'une douille CEI 1010 reliée à un fil de cuivre,
- D'une solution électrolytique de sulfate de cuivre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ),
- D'un étage de filtration permettant de filtrer les impuretés pouvant remonter dans l'électrode et de faire le contact électrique sans perdre de liquide.

Les mesures de potentiels de corrosion sont interprétées selon les dernières directives et conclusions du rapport final COST 509 (European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research) dont le premier principe d'interprétation est le suivant :

*« Une première estimation de l'état de corrosion peut être faite à partir de l'observation des gradients de potentiels ; au sein d'une même zone, des différences de potentiel de l'ordre de 150 à 200 mV laissent supposer une corrosion des armatures présentant les potentiels les plus bas ». Des sondages destructifs de vérification sont systématiquement réalisés, en général, au droit de la zone présentant le potentiel le plus bas, de façon à vérifier directement l'état de dégradation de l'armature.*

Dans le cadre du rapport, il est distingué :

- › Sondage de branchement : sondage où est réalisé le branchement sur la cage d'armature lors de la prise de mesure du potentiel d'électrode des armatures
- › Sondage anodique : sondage réalisé au droit des valeurs les plus électronégatives
- › Sondage cathodique : sondage réalisé au droit des valeurs les plus électropositives

## MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET DE LA POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU

---

Cet essai est effectué selon le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM (1997).

Le protocole de cet essai est le suivant :

- L'échantillon est placé dans une cloche à vide pendant 4h,
- L'échantillon est imbibé d'eau sous vide pendant 44h,
- L'échantillon est pesé dans l'eau (pesée hydrostatique) et dans l'air,
- Étuvage de l'échantillon à 105°C pendant 24h,
- Pesée de l'échantillon dans l'air après 3h de refroidissement.

La masse volumique et la porosité sont calculées à partir des formules suivantes :

$$\text{Masse volumique apparente : } d = \frac{M_s}{M_a - M_{a'}} \text{ (en kg/m}^3\text{)}$$

Avec :

- $M_s$  = masse sèche après étuvage
- $M_a$  = masse dans l'air après imbibition sous vide
- $M_{a'}$  = masse dans l'eau après imbibition sous vide

$$\text{Porosité accessible à l'eau : } P(\%) = \frac{Ma - Ms}{Ma - Ma'} * 100 \text{ (en \%)}$$

Avec :

- Ms = masse sèche après étuvage
- Ma = masse dans l'air après imbibition sous vide
- Ma' = masse dans l'eau après imbibition sous vide

## ESTIMATION DE LA TENEUR EN LIANT HYDRAULIQUE

Le dosage en ciment est calculé à partir de :

- La masse volumique apparente (selon le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM, 1997),
- La teneur en silice soluble de la pâte de ciment (selon les recommandations du GranDuBé, 2007),
- La méthode des inertes (selon les recommandations du GranDuBé, 2007).

Le dosage en ciment correspond à la moyenne entre les méthodes de dosage par la silice soluble et de dosage par la méthode des inertes.

La mise en solution pour le dosage de la silice soluble est le suivant (selon les recommandations du GranDuBé, 2007) :

- Broyage d'une quantité de béton suffisante pour ne pas avoir d'erreur liée à une concentration trop faible ou trop forte de granulats,
- Mise en solution de 1 g d'échantillon (broyé et tamisé à 315 µm) dans 100 ml d'eau déionisée,
- Agitation magnétique pendant 2 min,
- Ajout de 40 ml d'acide nitrique dilué (1,2 mol/l) et 60 ml d'eau déionisée,
- Reprise de l'agitation pendant 30 min,
- Filtrage de la solution et transfert dans une fiole jaugée de 250 ml,
- Dosage de **la silice soluble** dans la fraction liquide par spectrométrie ICP.

La teneur en ciment C1 est ensuite obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$C1 = \frac{SiO_2solB}{SiO_2solC} \times 100$$

Avec :

- C1 : teneur en ciment en %,
- SiO<sub>2</sub>solB : silice soluble du béton en %,
- SiO<sub>2</sub>solC : silice soluble du ciment en %.

SiO<sub>2</sub>solC est soit connue soit choisie parmi les teneurs en silice proposées par le GranDuBé (2007) et dans les fiches produits des cimentiers en fonction du type de ciment supposé (CEM I, CEM II/A au laitier ou CEM III/A, /B ou /C)

La méthode des inertes comprend :

- Une mesure du pourcentage d'insolubles dans le béton obtenue par calcination à 975°C du résidu insoluble après mise en solution de l'échantillon dans de l'acide nitrique dilué),
- La perte au feu entre 80 et 550°C (teneur en eau liée),
- La teneur en CaO liée à l'anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>) obtenue par calcination et différence entre la perte au feu à 975°C et la teneur en eau liée.

En fonction de la teneur en CO<sub>2</sub>, 2 formules de calcul peuvent être envisagées :

**si CO<sub>2</sub> > 1 % :**



$$C2 (\%) = 100 - [\text{insoluble} + \text{perte au feu} + ((CO_2 - 1) \times 1,27)] \quad (1)$$

OU

si  $CO_2 < 1 \%$  :

$$C2 (\%) = 100 - [\text{insoluble} + \text{perte au feu}] \quad (2)$$

La formule de calcul de la perte au feu (=eau d'hydratation +  $CO_2$  des granulats calcaires +  $CO_2$  de carbonatation) est la suivante :

$$PAF = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100$$

avec :

- $m_3$  : masse de la prise d'essai,
- $m_4$  : masse après calcination à  $975^\circ C$ .

La teneur en  $CO_2$  correspond à la perte de masse entre  $550^\circ C$  et  $975^\circ C$  soit :

$$\% CO_2 = \frac{m_5 - m_4}{m_3} \times 100$$

avec :

- $m_3$  : masse de la prise d'essai,
- $m_4$  : masse après calcination à  $975^\circ C$ ,
- $m_5$  : masse après calcination à  $550^\circ C$ .

Le dosage en ciment est ensuite obtenu à l'aide de la formule suivante :

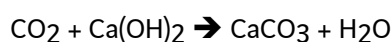
$$D = \frac{C \times \rho \times 1000}{100}$$

avec :

- $D$  : dosage en ciment en  $kg/m^3$ ,
- $C$  : moyenne de  $C1 + C2$ ,
- $\rho$  : masse volumique apparente du béton en  $g/cm^3$ .

## MESURE DE LA CARBONATATION

La carbonatation des composés hydratés du ciment par le dioxyde de carbone de l'air réduit le pH de la solution interstitielle à une valeur telle que la pellicule d'oxyde passive protégeant l'acier n'est plus stable. Le film passif se détruit et la corrosion peut alors se développer en milieu aéré et humide. Le dioxyde de carbone atmosphérique réagit sur les différents hydrates, et principalement avec la portlandite, pour donner du carbonate de calcium comme produit final :



Pour le suivi de l'évolution de la carbonatation à l'intérieur du béton, on utilise une solution alcoolique de thymolphthaléine (changement de couleur à des pH entre 9,3 et 10,5). La partie carbonatée du béton reste incolore et la partie non carbonatée prend une coloration bleue. L'essai est réalisé selon la procédure suivante :

- Fendage ou sciage de l'échantillon dans le sens de sa longueur,
- Application de la solution de thymolphthaléine,
- Mesure de la profondeur de carbonatation.

Les profondeurs de carbonatation sont mesurées en 5 points.

## DOSAGE EN IONS CHLORURE ET MESURE DE PH

Au même titre que la carbonatation, les ions chlorures libres ( $\text{Cl}^-$ ) jouent un rôle important dans le processus de dépassement et de corrosion des armatures. Ce sont ces chlorures libres qui migrent et qui sont responsables de la dépassement des armatures, par opposition aux chlorures totaux (chlorures libres + chlorures piégés). De la même façon pour les mesures de pH, une baisse du pH d'un béton entraîne la dépassement des armatures présentes dans cette tranche et donne lieu à l'amorce de la corrosion des aciers.

Au sein d'un béton, les ions chlorures libres ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- Diminution de la résistivité de l'enrobage de béton, ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre,
- Amorçage plus rapide de la corrosion par dépassement de la couche d'oxydes protectrice de l'acier. Plus la concentration en ions chlorures libres au niveau des armatures est élevée, plus la vitesse de corrosion est importante.

En termes de concentration en ions chlorures libres, il existe un seuil au-delà duquel la corrosion s'accélère. Lorsque ce seuil, égal à **0,4 % d'ions chlorures libres** en poids par rapport au ciment (soit **0,06 %** en poids par rapport à un béton « standard » dosé à 350 kg de ciment par  $\text{m}^3$ ), est atteint, la couche de passivation des aciers disparaît, et la corrosion peut se propager. La quantité d'ions nécessaire à l'amorçage de la corrosion est d'autant plus importante que le pH (concentration en  $\text{OH}^-$ ) du béton est élevé. Le seuil critique de dépassement des armatures, prenant en compte à la fois la teneur en  $\text{Cl}^-$  et le pH, correspond alors à un rapport  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  de **0,6** pour le béton.

La mesure du pH des bétons permet elle aussi, conjointement avec les mesures précédentes, de déterminer l'altération des couches de béton. Pour éviter la corrosion des armatures en acier, le pH du béton ne doit pas descendre en dessous de **9,5**. En-dessous de ce seuil, la protection passivée des aciers se dégrade et la corrosion peut se déclencher.

## MESURE DE LA RESISTIVITE DU BETON

Les données obtenues lors des mesures de résistivité (indicateurs de durabilité généraux) sont reportées dans le tableau de référence ci-après (Baroghel-Bouny, 2004<sup>1</sup>), afin de définir la durabilité potentielle des bétons testés.

*Tableau 9 : Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux (G) ou de substitution (S) : porosité, résistivité électrique, coefficient de diffusion et perméabilité. Les valeurs indiquées correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites dans ce guide sur des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 3 mois après le coulage.*

Le type de béton est donné également à titre indicatif et pour des formules simples.  
Se reporter au tableau 8 pour la précision de la mesure relative à chaque méthode d'essai.

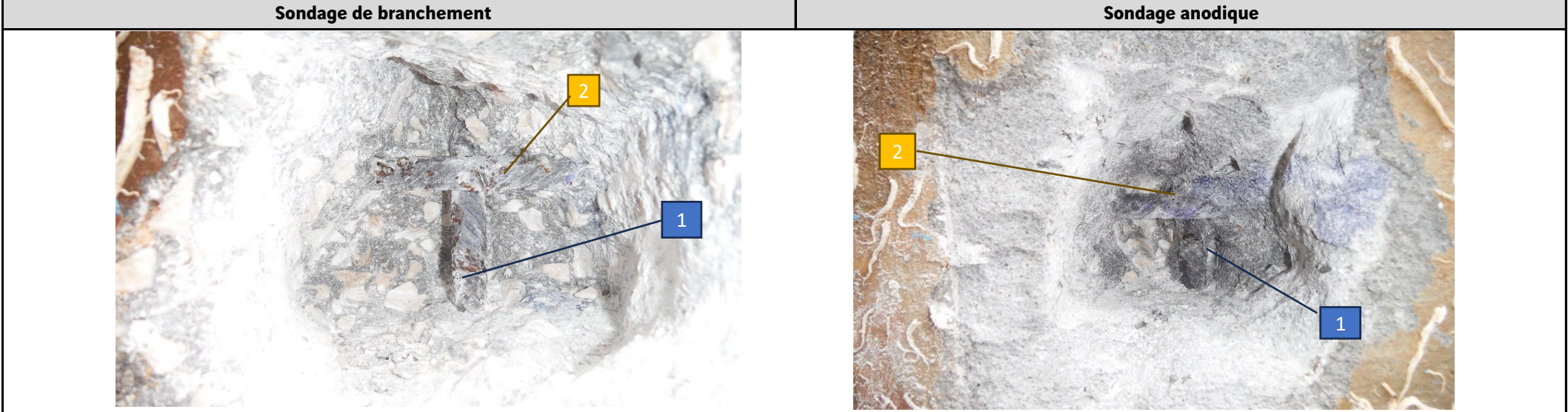
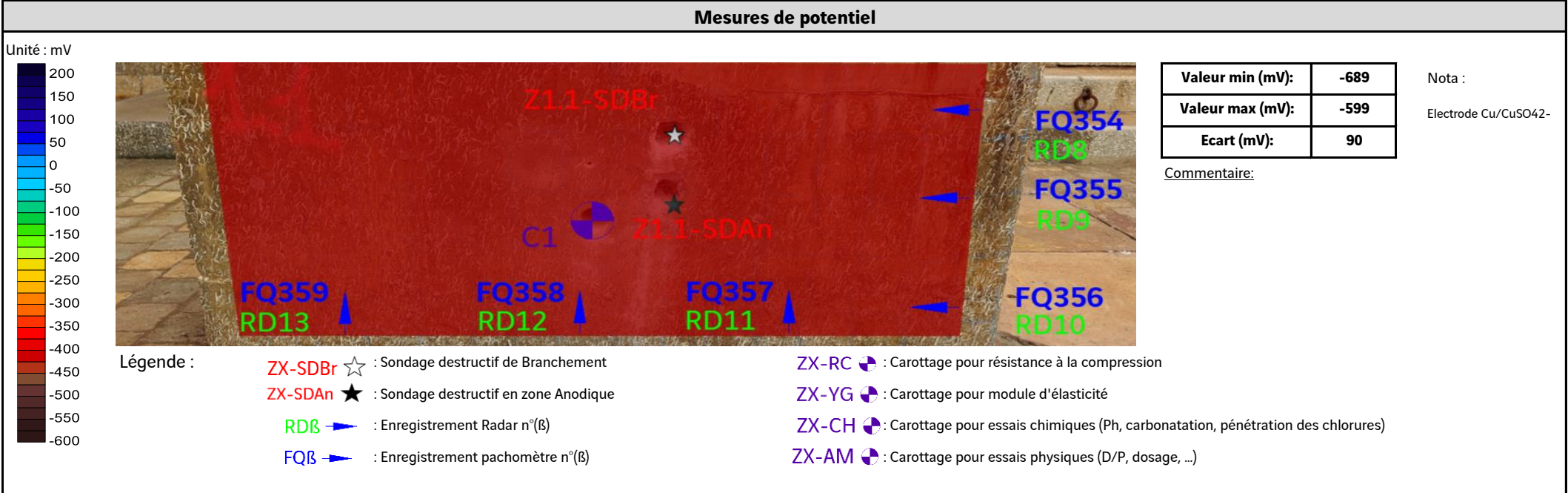
Durabilité potentielle →		Classes et valeurs limites				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
G	Porosité accessible à l'eau (%) $P_{\text{acc}}$		14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
S	Porosité mesurée par intrusion de mercure ( $P_{\text{acc}}$ mes. = 400 MPa et prétraitement par étuvage à $T = 45^\circ\text{C}$ pendant 14 jours en présence de gel de silice) (%) $P_{\text{Hg}}$	> 16	13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
S	Résistivité électrique ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) $\rho$	< 50	50 à 100	100 à 250*	250 à 1000	> 1000
G	Coefficient de diffusion effectif des chlorures ( $10^{-12}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) $D_{\text{eff}}$	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
G	Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de migration) ( $10^{-12}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) $D_{\text{appmigr}}$				1 à 5	< 1
G	Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de diffusion) ( $10^{-12}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) $D_{\text{appdiff}}$	> 50	10 à 50	5 à 10	< 5	
G	Perméabilité apparente aux gaz (à $P_{\text{exterieur}} = 0,2\text{ MPa}$ et après étuvage à $T = 105^\circ\text{C}$ ) ( $10^{-18}\text{ m}^3$ ) $K_{\text{gaz}}$	> 1000	300 à 1000	100 à 300	10 à 100	< 10
G	Perméabilité à l'eau liquide (à $P_{\text{acc}}$ , par mesure directe du flux, après saturation, cf. § 7.2.4.1 et 7.2.4.2) ( $10^{-18}\text{ m}^3$ ) $K_{\text{eau}}$	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
Type de béton (indicatif et pour des formules simples)			B25 à B40	B30 à B60	B55 à B80	> B80

<sup>1</sup> « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Documents scientifiques et techniques de l'Association Française de Génie Civil (AFGC). Baroghel-Bouny, V. (2004).

## Annexe 4

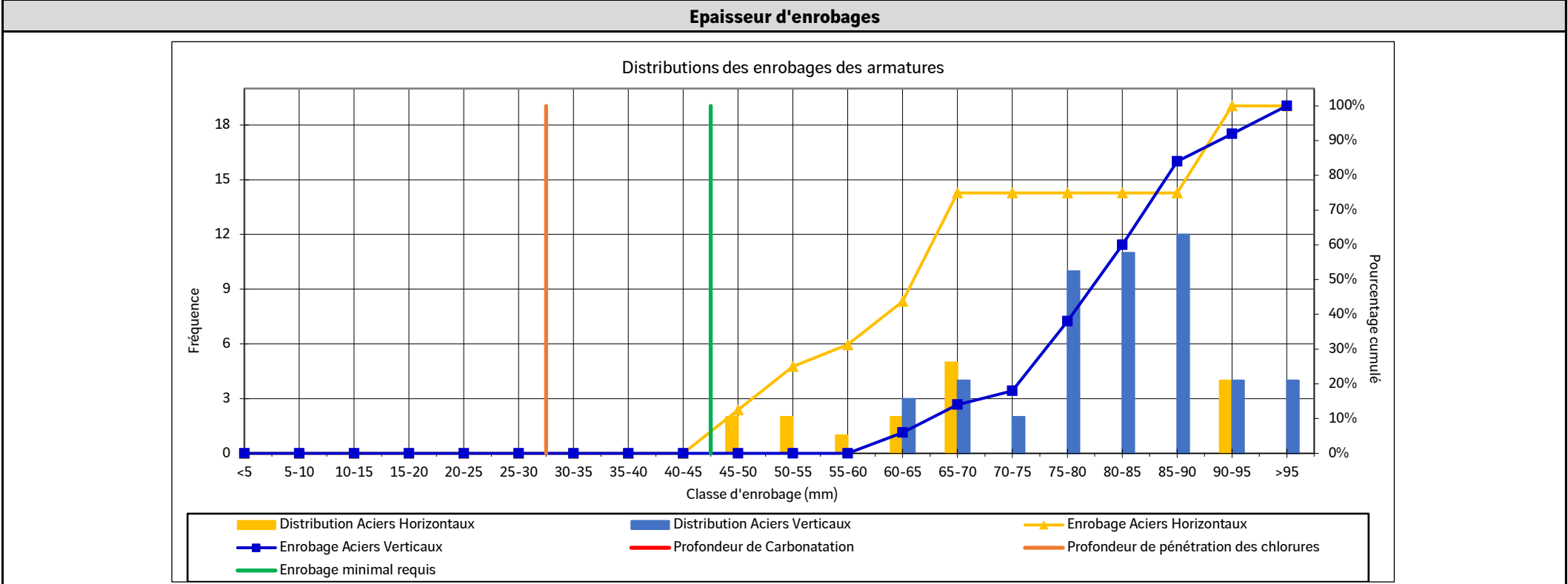
# Planches techniques

Zone	Elément investigué	Etat de la zone	Commentaires
Z1.1	Massif 1.1 Face A	Visuellement saine	-



N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Verticaux	HA	12	1	SAIN	100	150
2	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	80	200

N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Verticaux	HA	12	1	SAIN	95	150
2	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	75	200



Direction	Nb d'aciers détectés	Ø (mm)	Enrobage (mm)				Espacement moyen (mm)	Enrobage minimal requis (mm)	% d'aciers < à classe d'expo.	Prof. de carbo. (mm)	% d'aciers dans domaine carbonaté	Prof. de chlorures (mm)	% d'aciers dans domaine chloré
			Min	Max	Moy	Ecart-type							
Aciers Horizontaux	16	12	45	105	68	16	226	45	6%	0	0%	30	0%
Aciers Verticaux	50	12	61	105	82	10	155		0%		0%		0%

Zone	Elément investigué	Etat de la zone	Commentaires
Z1.1	Massif 1.1 Face A	Visuellement saine	-

Résultats laboratoire

Echantillon		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse béton		Paramètres pris en compte pour le calcul en masse ciment :		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse ciment		Rapport [Cl <sup>-</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Dosage ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	
C1-1.1	10 - 20	0,112	/	2224	284	0,87	/	1,0
	20 - 30	0,101	0,142	2224	284	0,79	1,11	0,8
	80 - 90	0,028	0,038	2224	284	0,22	0,29	0,1

Echantillon		Teneur en ciment d'après la silice soluble (%)	Teneur en ciment d'après les inertes (%)	Moyenne des 2 méthodes (%)	Teneur en liant hydraulique (kg/m <sup>3</sup> )
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)				
C2 - 1.1	275 - 330	13,4	12,2	12,8	284 ± 30

Référence échantillon	Profondeur de carbonatation (mm)					Profondeur moyenne (mm)	Enrobage (mm)
C1-1.1	<1	<1	1	<1	1	<1	85

Echantillon		Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité accessible à l'eau (%)
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)		
C2 - 1.1	190 - 275	2224	14,1



Mesures de potentiel

Sondage de branchement

Unité : mV

Face A

Face B

valeur min (mV):	-694
valeur max (mV):	-633
Ecart (mV):	61

Nota :  
Electrode Cu/CuSO4-

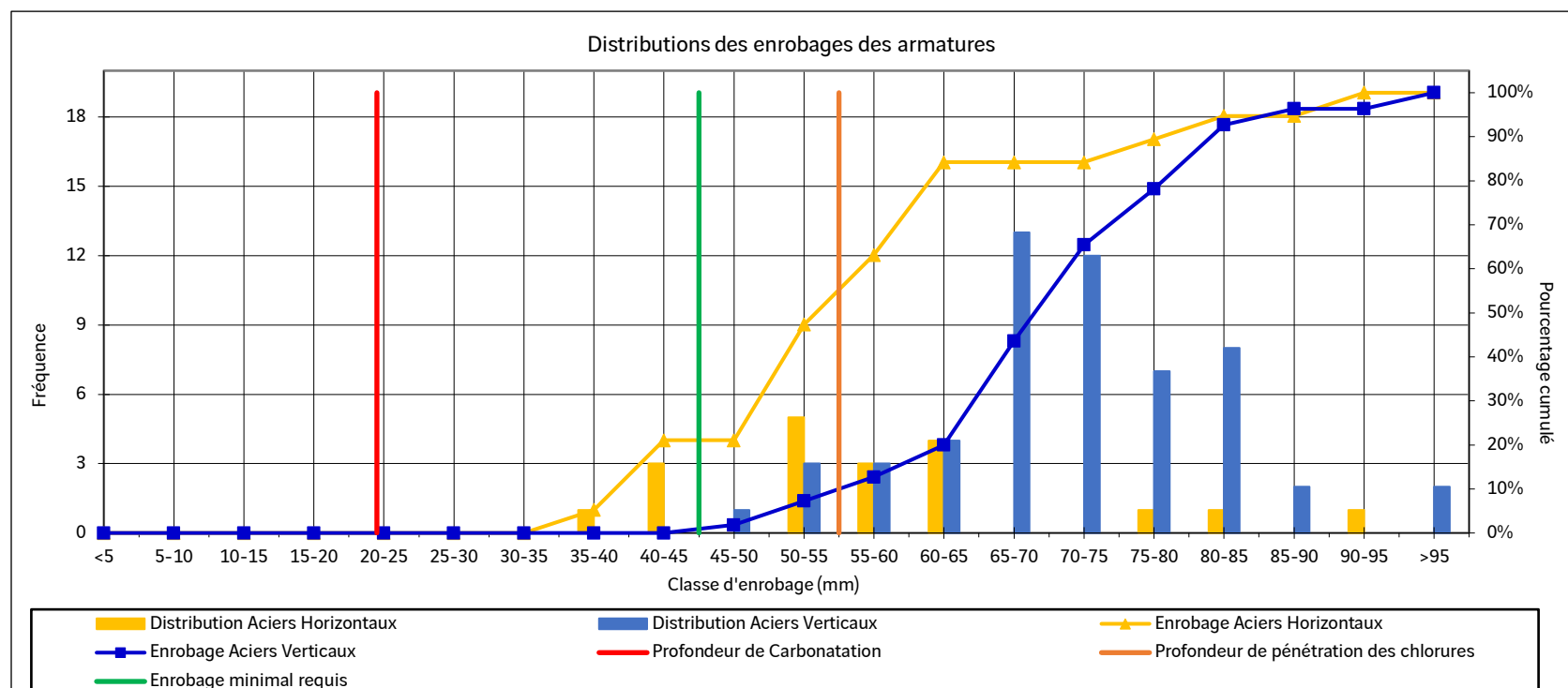
Légende :

- ZX-SDBr ☆ : Sondage destructif de Branchement
- ZX-SDAn ★ : Sondage destructif en zone Anodique
- RDβ ➡ : Enregistrement Radar n°(β)
- FQβ ➡ : Enregistrement pachomètre n°(β)
- ZX-RC 🌀 : Carottage pour résistance à la compression
- ZX-YG 🌀 : Carottage pour module d'élasticité
- ZX-CH 🌀 : Carottage pour essais chimiques (Ph, carbonatation, pénétration des chlorures)
- ZX-AM 🌀 : Carottage pour essais physiques (D/P, dosage, ...)

N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Verticaux	HA	12	1	SAIN	80	150
2	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	55	200




Sondage anodique

N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Verticaux	HA	12	1	SAIN	70	150
2	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	55	200



Direction	Nb d'aciers détectés	Ø (mm)	Enrobage (mm)				Espacement moyen (mm)	Enrobage minimal requis (mm)	% d'aciers < à classe d'expo.	Prof. de carbo. (mm)	% d'aciers dans domaine carbonaté	Prof. de chlorures (mm)	% d'aciers dans domaine chloré
			Min	Max	Moy	Ecart-type							
Aciers Horizontaux	19	12	37	94	58	15	231	45	21%	22	0%	120	100%
Aciers Verticaux	55	12	46	111	72	12	142		0%		0%		100%



		<div>ESID</div> <div>DIAGNOSTIC DES MASSIFS DE VAUBAN</div>						 		
Zone	Elément investigué			Etat de la zone			Commentaires			
Z1.3	Massif 1.3 Face A et B			Dégradée			-			

Résultats laboratoire

Echantillon		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse béton		Paramètres pris en compte pour le calcul en masse ciment :		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse ciment		Rapport [Cl <sup>-</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Dosage ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	
C3 - 1.3	10 - 20	0,433	/	2224	284	3,39	/	3,1
	20 - 30	0,327	0,461	2224	284	2,56	3,61	2,1
	110 - 120	0,087	0,126	2224	284	0,68	0,99	0,5

Echantillon		Teneur en ciment d'après la silice soluble (%)	Teneur en ciment d'après les inertes (%)	Moyenne des 2 méthodes (%)	Teneur en liant hydraulique (kg/m <sup>3</sup> )
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)				
C2 - 1.1	275 - 330	13,4	12,2	12,8	284 ± 30

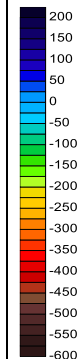
Référence échantillon	Profondeur de carbonatation (mm)					Profondeur moyenne (mm)	Enrobage (mm)
C3 - 1.3	20	18	25	25	23	22	120

Echantillon		Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité accessible à l'eau (%)
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)		
C2 - 1.1	190 - 275	2224	14,1

Zone	Élément investigué	Etat de la zone	Commentaires
Z2.1	Massif 2.1 Face D	Dégradée	-

#### Mesures de potentiel

Unité : mV



Valeur min (mV):	-588
Valeur max (mV):	-486
Ecart (mV):	102

Nota :  
Electrode Cu/CuSO42-

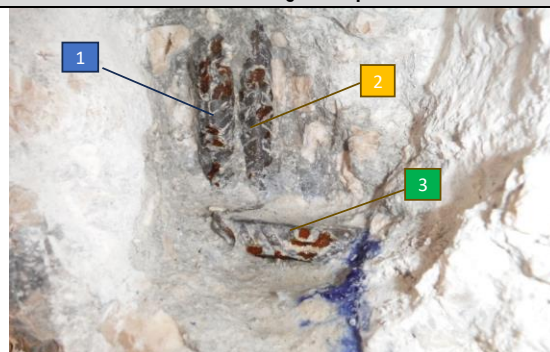
Commentaire:

Légende :	ZX-SDBr ☆ : Sondage destructif de Branchement	ZX-RC ⚡ : Carottage pour résistance à la compression
	ZX-SDAn ★ : Sondage destructif en zone Anodique	ZX-YG ⚡ : Carottage pour module d'élasticité
	RD ⚡ : Enregistrement Radar n°(B)	ZX-CH ⚡ : Carottage pour essais chimiques (Ph, carbonatation, pénétration des chlorures)
	FQ ⚡ : Enregistrement pachomètre n°(B)	ZX-AM ⚡ : Carottage pour essais physiques (D/P, dosage, ...)

#### Sondage de branchement



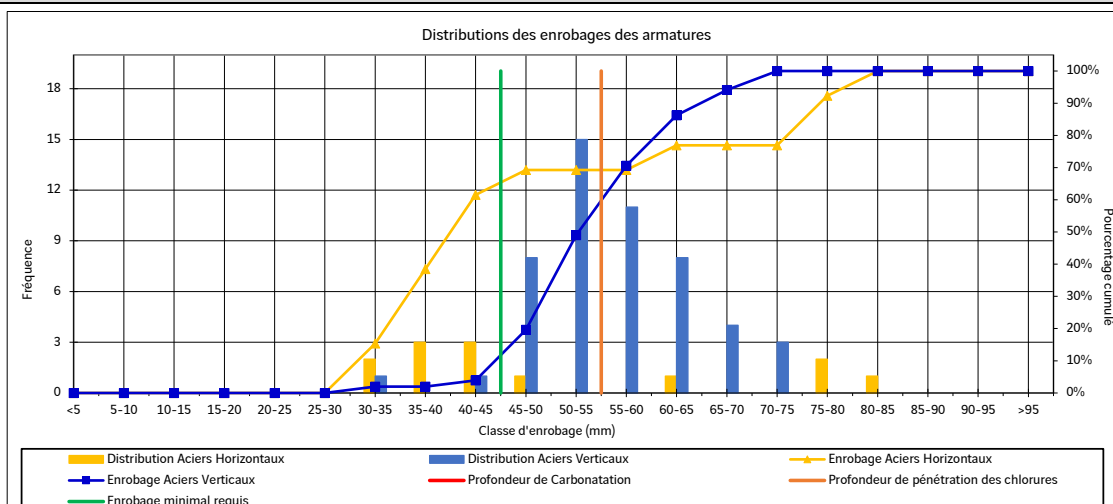
#### Sondage anodique



N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Verticaux	HA	12	1	SAIN	60	150
2	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	45	200

N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Verticaux	HA	12	1	SAIN	80	150
2	Verticaux	HA	12	1	SAIN	85	150
3	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	62	200

#### Epaisseur d'enrobages



Direction	Nb d'aciers détectés	Ø (mm)	Enrobage (mm)				Espacement moyen (mm)	Enrobage minimal requis (mm)	% d'aciers < à classe d'expo.	Prof. de carbo. (mm)	% d'aciers dans domaine carbonaté	Prof. de chlorures (mm)	% d'aciers dans domaine chloré
			Min	Max	Moy	Ecart-type							
Aciers Horizontaux	13	12	33	74	50	18	196	45	62%	2	0%	135	100%
Aciers Verticaux	51	12	34	74	56	8	145		4%		0%		100%

Zone	Elément investigué	Etat de la zone	Commentaires
Z2.1	Massif 2.1 Face D	Dégradée	-

### Résultats laboratoire

Echantillon		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse béton		Paramètres pris en compte pour le calcul en masse ciment :		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse ciment		Rapport Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Dosage ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	
C1 - 2.1	10 - 20	0,269	/	2252	372	1,63	/	4,1
	20 - 30	0,211	0,305	2252	372	1,28	1,85	2,1
	115 - 125	0,103	/	2252	372	0,62	/	0,6
	125 - 135	0,161	0,161	2252	372	0,66	0,97	0,6

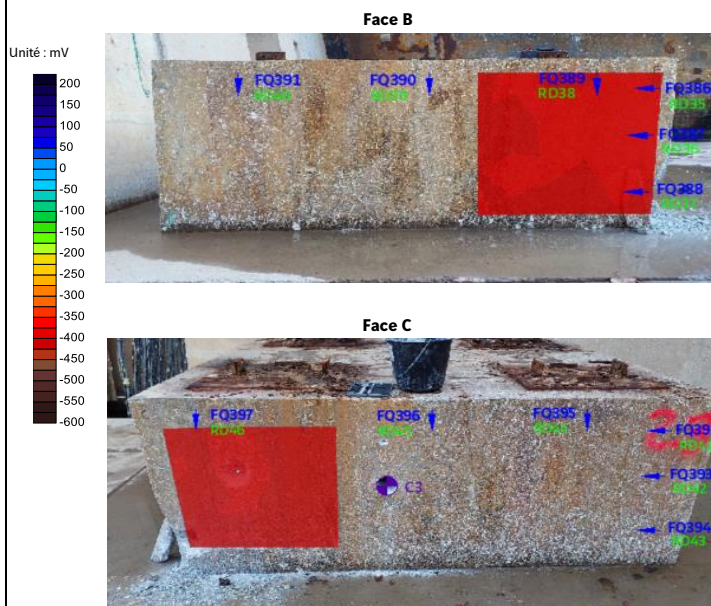
Echantillon		Teneur en ciment d'après la silice soluble (%)	Teneur en ciment d'après les inertes (%)	Moyenne des 2 méthodes (%)	Teneur en liant hydraulique (kg/m <sup>3</sup> )
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)				
C3 - 2.3	260 - 320	17	16,1	16,5	372 ± 35

Référence échantillon	Profondeur de carbonatation (mm)					Profondeur moyenne (mm)	Enrobage (mm)
	3	2	<1	2	1		
C1 - 2.1						2	135

Echantillon		Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité accessible à l'eau (%)
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)		
C3 - 2.3	140 - 260	2252	14,6

Zone	Elément investigué	Etat de la zone	Commentaires
Z2.3	Massif 2.3 Face B et C	Dégradée	-

#### Mesures de potentiel



Valeur min (mV):	-611
Valeur max (mV):	-518
Ecart (mV):	93

Nota : Electrode Cu/CuSO42-

#### Légende :

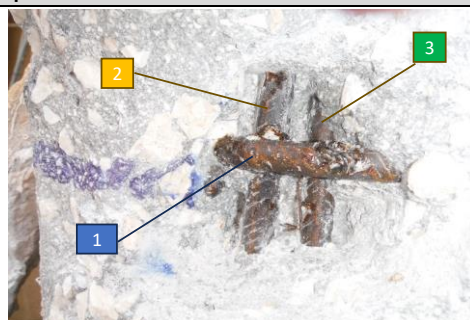
- ZX-SDBr ☆ : Sondage destructif de Branchement
- ZX-SDAn ★ : Sondage destructif en zone Anodique
- RDB ➡ : Enregistrement Radar n°(B)
- FQB ➡ : Enregistrement pachomètre n°(B)
- ZX-RC ➡ : Carottage pour résistance à la compression
- ZX-YG ➡ : Carottage pour module d'élasticité
- ZX-CH ➡ : Carottage pour essais chimiques (Ph, carbonatation, pénétration des chlorures)
- ZX-AM ➡ : Carottage pour essais physiques (D/P, dosage, ...)

#### Sondage de branchement



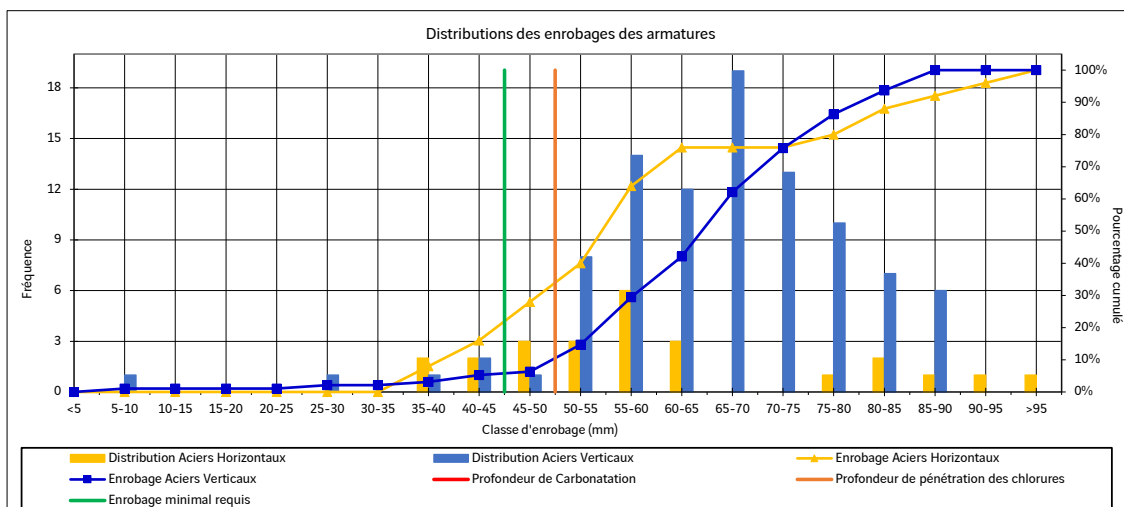
N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Verticaux	HA	12	1	SAIN	57	150
2	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	37	200

#### Sondage anodique



N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Horizontaux	HA	12	2	LOX	65	200
1	Verticaux	HA	12	2	LOX	85	150
1	Verticaux	HA	12	2	LOX	85	150

#### Epaisseur d'enrobages



Direction	Nb d'aciers détectés	Ø (mm)	Enrobage (mm)				Espacement moyen (mm)	Enrobage minimal requis (mm)	% d'aciers < à classe d'expo.	Prof. de carbo. (mm)	% d'aciers dans domaine carbonaté	Prof. de chlorures (mm)	% d'aciers dans domaine chloré
			Min	Max	Moy	Ecart-type							
Aciers Horizontaux	25	12	39	105	60	17	201	45	16%	0	0%	50	28%
Aciers Verticaux	95	12	5	89	66	13	153		5%				8%



Zone	Elément investigué	Etat de la zone	Commentaires
Z2.3	Massif 2.3 Face B et C	Dégradée	-

### Résultats laboratoire

Echantillon		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse béton		Paramètres pris en compte pour le calcul en masse ciment :		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse ciment		Rapport Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Dosage ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	
C2 - 2.3	10 - 20	0,151	/	2252	372	0,91	/	0,9
	20 - 30	0,155	0,218	2252	372	0,91	1,32	0,9
	40 - 50	0,156	0,218	2252	372	0,94	1,32	0,9

Echantillon		Teneur en ciment d'après la silice soluble (%)	Teneur en ciment d'après les inerts (%)	Moyenne des 2 méthodes (%)	Teneur en liant hydraulique (kg/m <sup>3</sup> )
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)				
C3 - 2.3	260 - 320	17	16,1	16,5	372 ± 35

Référence échantillon	Profondeur de carbonatation (mm)					Profondeur moyenne (mm)	Enrobage (mm)
	<1	<1	<1	<1	1		
C2 - 2.3	<1	<1	<1	<1	1	<1	45

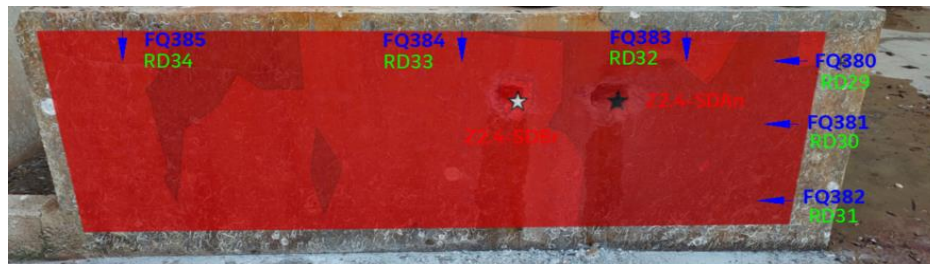
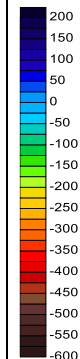
Echantillon		Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité accessible à l'eau (%)
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)		
C3 - 2.3	140 - 260	2252	14,6

Commentaire:

Zone	Elément investigué	Etat de la zone	Commentaires
Z2.4	Massif 2.4 Face B	Dégradée	-

#### Mesures de potentiel

Unité : mV



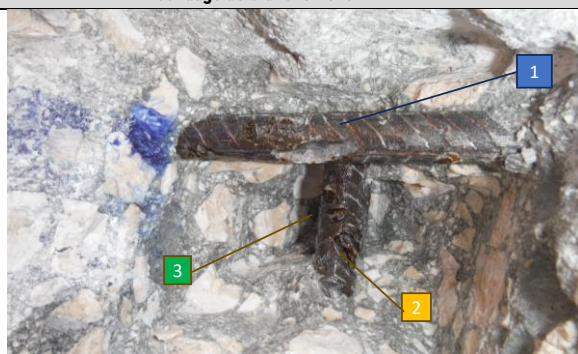
Valeur min (mV):	-634
Valeur max (mV):	-525
Ecart (mV):	109

Nota :  
Electrode Cu/CuSO42-

Commentaire:

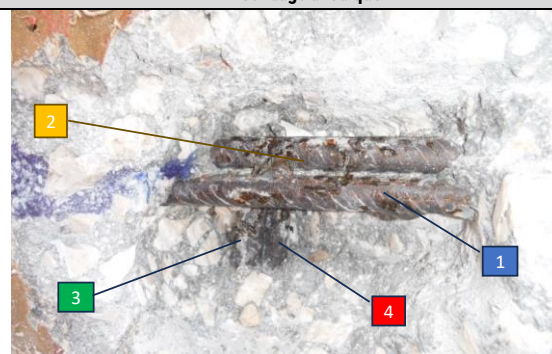
Légende :	ZX-SDBr ☆ : Sondage destructif de Branchement	ZX-RC ⚡ : Carottage pour résistance à la compression
	ZX-SDAn ★ : Sondage destructif en zone Anodique	ZX-YG ⚡ : Carottage pour module d'élasticité
	RD ⚡ : Enregistrement Radar n°(B)	ZX-CH ⚡ : Carottage pour essais chimiques (Ph, carbonatation, pénétration des chlorures)
	FQ ⚡ : Enregistrement pachomètre n°(B)	ZX-AM ⚡ : Carottage pour essais physiques (D/P, dosage, ...)

#### Sondage de branchement



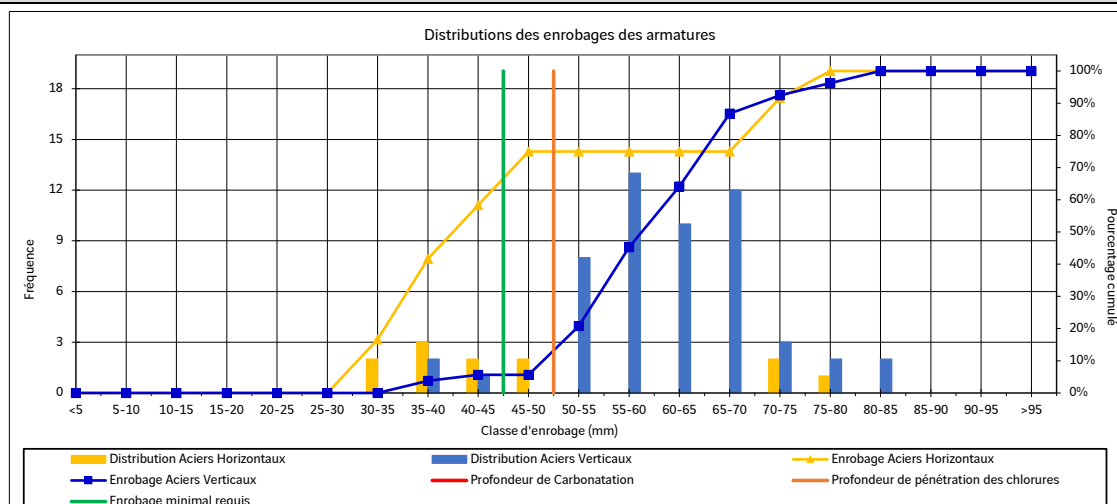
N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	47	200
2	Verticaux	HA	12	1	SAIN	68	150
3	Verticaux	HA	12	1	SAIN	85	150

#### Sondage anodique



N°	Direction	Type	Ø (mm)	Niv.	Etat	Enr. (mm)	Esp. (mm)
1	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	40	200
2	Horizontaux	HA	12	1	SAIN	45	200
3	Verticaux	HA	12	1	SAIN	67	150
4	Verticaux	HA	12	1	SAIN	78	150

#### Epaisseur d'enrobages



Direction	Nb d'aciers détectés	Ø (mm)	Enrobage (mm)				Espace- ment moyen (mm)	Enrobage minimal requis (mm)	% d'aciers < à classe d'expo.	Prof. de carbo. (mm)	% d'aciers dans domaine carbonaté	Prof. de chlorures (mm)	% d'aciers dans domaine chloré
			Min	Max	Moy	Ecart-type							
Aciers Horizontaux	12	12	33	81	49	16	207	45	58%	0	0%	50	75%
Aciers Verticaux	53	12	38	81	61	9	140		6%		0%		11%

Zone	Elément investigué	Etat de la zone	Commentaires
Z2.4	Massif 2.4 Face B	Dégradée	-

### Résultats laboratoire

Echantillon		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse béton		Paramètres pris en compte pour le calcul en masse ciment :		Concentration Cl <sup>-</sup> en % masse ciment		Rapport Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Dosage ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Libres (solubles dans l'eau)	Totaux (solubles dans l'acide)	
C4 - 2.4	10 - 20	0,139	/	2252	372	0,84	/	1,1
	20 - 30	0,131	0,184	2252	372	0,79	1,11	0,8
	30 - 40	/	0,172	2252	372	/	1,04	/
	40 - 50	0,12	/	2252	372	0,73	/	0,6

Echantillon		Teneur en ciment d'après la silice soluble (%)	Teneur en ciment d'après les inertes (%)	Moyenne des 2 méthodes (%)	Teneur en liant hydraulique (kg/m <sup>3</sup> )
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)				
C3 - 2.3	260 - 320	17	16,1	16,5	372 ± 35

Référence échantillon	Profondeur de carbonatation (mm)					Profondeur moyenne (mm)	Enrobage (mm)
	<1	<1	<1	<1	1		
C4 - 2.4	<1	<1	<1	<1	1	0	40

Echantillon		Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité accessible à l'eau (%)
Référence échantillon	Profondeur d'essai (mm)		
C3 - 2.3	140 - 260	2252	14,6

## Annexe 5

# Prélèvements



➤ **Bassin n°1 :**



Photo 27

*Bassin 1 – Massif 1.1 – Face A – Echantillon C1*

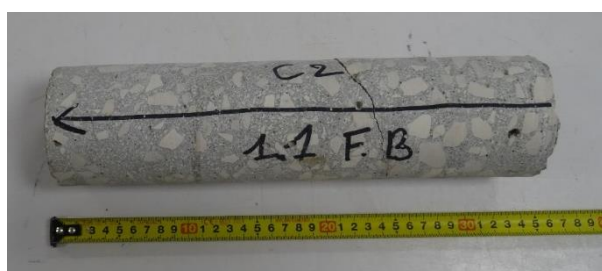


Photo 28

*Bassin 1 – Massif 1.1 – Face B – Echantillon C2*

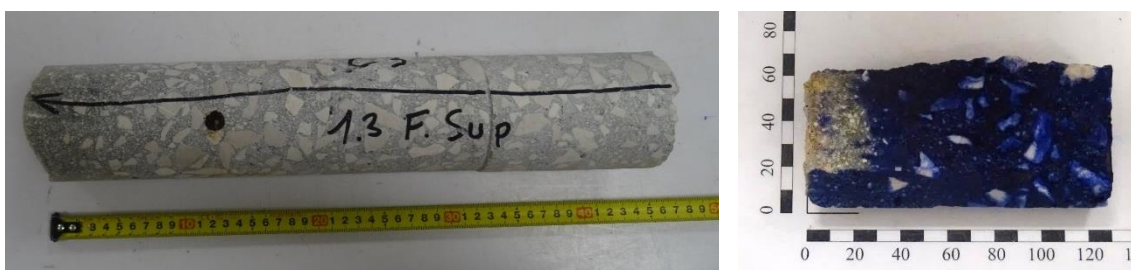


Photo 29

*Bassin 1 – Massif 1.3 – Face supérieure – Echantillon C3*

➤ **Bassin n°2 :**



Photo 30

*Bassin 2 – Massif 2.1 – Face supérieure – Echantillon C1*

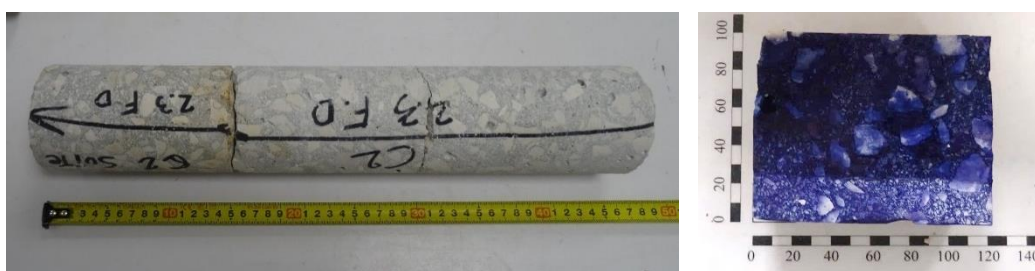


Photo 31

*Bassin 2 – Massif 2.3 – Face D – Echantillon C2*

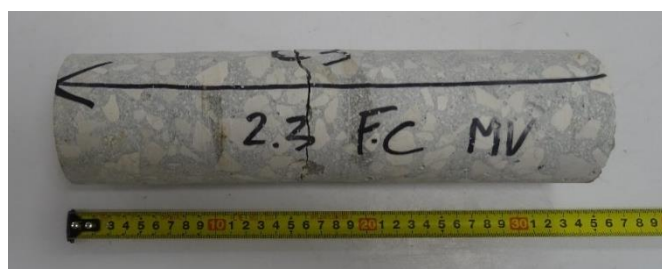


Photo 32

*Bassin 2 – Massif 2.3 – Face C – Echantillon C3*



Photo 33

*Bassin 2 – Massif 2.4 – Face C – Echantillon C4*

## Annexe 6

# Mesures ultrasonores

Bassin n°1					Bassin n°2						
Massif 1.1					Massif 2.1						
Ep. Platines (mm)	Points de mesure				Ep. Platines (mm)	Points de mesure					
	1	2	3			1	2	3			
	1	10,7	10,54			10,32	1	10,46		9,27	10,32
	2	11,62	11,38			11,8	2	8,71		9,15	9,36
	3	11,74	12,28			12,44	3	13,12		9,77	11,85
	4	12,18	12,04	11,94		Moy Massif	4	9,45	8,13	9,35	Moy Massif
	Moyenne	11,56	11,56	11,625		11,58	Moyenne	10,435	9,08	10,22	9,91
Massif 1.3					Massif 2.3						
Ep. Platines (mm)	Points de mesure				Ep. Platines (mm)	Points de mesure					
	1	2	3			1	2	3			
	1	9,06	11,16			10,68	1	11,74		9,11	11,15
	2	11,24	13,26			10,14	2	12,12		11,8	12,06
	3	10,8	11,72			11,6	3	9,88		10,22	10,75
	4	14,6	13,1	12,85		Moy Massif	4	7,24	9,08	8,55	Moy Massif
	Moyenne	11,425	12,31	11,3175		11,68	Moyenne	10,245	10,0525	10,6275	10,31
					Massif 2.4						
Ep. Platines (mm)	Points de mesure				Ep. Platines (mm)	Points de mesure					
	1	2	3			1	2	3			
	1	11,65	11,11			11,31	1	11,65		11,11	11,31
	2	11,6	9,6			9,9	2	11,6		9,6	9,9
	3	9,74	9,27			10,18	3	9,74		9,27	10,18
	4	10,44	8,96	9,96		Moy Massif	4	10,44	8,96	9,96	Moy Massif
	Moyenne	10,8575	9,735	10,3375		10,31	Moyenne	10,8575	9,735	10,3375	10,31