

RAPPORT D'ÉTUDE

Mai 2022



Viaduc de la Roche (71)
Diagnostic corrosion des armatures internes au béton armé

Viaduc de la Roche

Diagnostic corrosion des armatures internes au béton armé

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V1f	2505/22	Version initiale

Affaire suivie par

Guillaume Mayer – Agence d'Autun – Groupe Ouvrages d'Art
Tél. : +33(0)3 85 86 67 50
Courriel : guillaume.mayer@cerema.fr
Site d'Autun – ZI de Saint Andoche Bd Giberstein BP141 71404 Autun

Références

n° d'affaire : 21-CE-1330

Partenaire(s) :

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Jean-Luc Saussol	19/05/22	
Avec la participation de	Guillaume Mayer	20/05/22	Guillaume MAYER 2310015611mg Signature numérique de Guillaume MAYER 2310015611mg Date : 2022.07.01 12:26:10 +02'00'
Contrôlé par	Christophe Aubagnac	25/05/22	Christophe AUBAGNAC 3320001191ac Signature numérique de Christophe AUBAGNAC 3320001191ac Date : 2022.07.01 14:08:05 +02'00'
Validé par	Christophe Aubagnac	25/05/22	Christophe AUBAGNAC 3320001191ac Signature numérique de Christophe AUBAGNAC 3320001191ac Date : 2022.07.01 14:08:26 +02'00'

Résumé de l'étude :

Le diagnostic de corrosion des armatures internes au béton du viaduc de la Roche a porté sur :

- les culées (chevêtres et murs garde-grève),
- les piles,
- l'extérieur du caisson (intrados du hourdis inférieur, âmes et encorbellements),
- l'intérieur du caisson (âmes),
- les équipements (corniches et longrines supports des dispositifs de retenue).

Il ressort de ce diagnostic que **le risque de corrosion des armatures sur le viaduc de la Roche est entièrement lié à la pollution par les chlorures**, qui est par endroit très conséquente mais reste relativement localisée (en particulier sur le caisson). Cette pollution a plusieurs origines :

- des défauts d'étanchéité des joints de dilatation (sur chaussée et surtout sur longrines / corniches) ;
- des défauts d'étanchéité aux raccords des gargouilles avec l'étanchéité générale de l'ouvrage. Ces défauts sont à l'origine d'une pollution importante mais localisée sur le caisson de l'ouvrage ;

- l'absence de canalisation des eaux drainées par les gargouilles qui se déversent, directement depuis l'encorbellement, en contrebas du viaduc. Ces écoulements entraînent une pollution sur les piles qui, sans ce défaut d'assainissement de l'ouvrage, seraient, de part leurs emplacements, protégées de ce risque ;
- l'absence de traitement des joints entre éléments de corniche qui a entraîné des écoulements et une pollution aux chlorures prononcée aux extrémités de ces éléments.

Au-delà du diagnostic réalisé, l'ouvrage devra faire l'objet d'un projet de réparation de niveau APROA (Avant-Projet de Réparation Ouvrage d'Art) mené par un bureau d'étude compétent.

En fonction des options de gestion (cf norme NF EN 1504-9) à fixer par le gestionnaire de l'ouvrage, il appartiendra au bureau d'étude d'étudier différents scénarios appropriés de réparation et de protection du béton armé de l'ouvrage.

Sur la base des résultats du diagnostic du béton armé réalisé, sont présentées en conclusion de ce rapport des pistes de réflexion possibles quant à la conduite du projet de réparation et aux suites à donner.

SOMMAIRE

1. Présentation de l'étude	6
1.1. Présentation succincte de l'ouvrage	6
1.2. Formulations des bétons employés et zones auscultées	6
1.3. Documents, hypothèses et principe de référence	9
2. Diagnostic des culées	10
2.1. Chevêtre de la culée C9	10
2.1.1. Description de la zone étudiée et positionnement des prélèvements	10
2.1.2. Profondeur de carbonatation	12
2.1.3. Profil de teneur en chlorures	13
2.1.4. Épaisseurs d'enrobages	14
2.1.5. Mesures électrochimiques et ouvertures de fenêtres	15
2.1.6. Récapitulatif : face avant du chevêtre	15
2.2. Mur garde-grève de la culée C9	16
2.2.1. Description de la zone étudiée et positionnement des prélèvements	16
2.2.2. Profondeur de carbonatation	17
2.2.3. Profils de teneur en chlorures	18
2.2.4. Épaisseurs d'enrobages	19
2.2.5. Mesures électrochimiques et ouvertures de fenêtres	20
2.2.6. Récapitulatif : mur garde-grève	23
2.3. Récapitulatif sur la culée C9	23
3. Diagnostic du béton des piles	24
3.1. Description des zones auscultées	24
3.2. Profondeur de carbonatation	25
3.3. Profils de teneur en chlorures	26
3.4. Épaisseurs d'enrobages	29
3.5. Mesures électrochimiques et ouvertures de fenêtres	31
3.5.1. Mesures de potentiels réalisées à la base de P5 face Charolles :	32
3.5.2. Mesures de potentiels réalisées à la base de P5 face La Roche :	36
3.6. Récapitulatif : piles	39
4. Diagnostic du caisson	41
4.1. Description des zones auscultées	41
4.2. Profondeur de carbonatation	41
4.2.1. Extérieur du caisson	41
4.2.2. Intérieur du caisson	43
4.3. Profils de teneur en chlorures	44
4.3.1. Intrados du hourdis inférieur	44
4.3.2. Âmes	46
4.3.3. Encorbellements	48
4.4. Épaisseurs d'enrobages	49
4.4.1. Intrados du hourdis	49

4.4.2. Âmes	50
4.4.3. Encoorbellements	51
4.5. Mesures électrochimiques et ouvertures de fenêtres	52
4.5.1. Mesures de potentiels sur l'intrados du hourdis (travée T2)	52
4.5.2. Mesures de potentiels sur l'âme (travée T4)	55
4.5.3. Mesures de potentiels sur les encoorbellements (travée T4)	59
4.6. Récapitulatif : caisson de l'ouvrage	63
5. Diagnostic des équipements	64
5.1. Corniches	64
5.1.1. Profondeur de carbonatation	65
5.1.2. Profils de teneur en chlorures	66
5.1.3. Épaisseurs d'enrobages	68
5.1.4. Récapitulatif : corniches	69
5.2. Longrines support du dispositif de retenue	70
6. Prélèvements pour essais au MEB	73
7. Conclusion	79
Annexes	83
Annexe A - Formulation du béton et caractéristiques physico-chimiques du ciment	83
Annexe B - Plans des zones étudiées avec relevé des désordres, emplacements des armatures et des prélèvements	84
Annexe C - PV des profils des teneurs en chlorures	85
Annexe D - Guide technique « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » du LCPC de décembre 2002 (pages 44-45) + logigramme de la fiche D1-1 du cahier interactif UGE-Cerema « Auscultations des ouvrages d'art »	86
Annexe E - Mesures électrochimiques réalisées sur le viaduc de La Roche	90
Annexe F - Positions approximatives des gargouilles par rapport aux axes des piles (plan basé sur les relevés de désordre de la dernière inspection)	95
Annexe G - Section du pied des piles (basée sur les cotes prélevées sur site)	96

1. Présentation de l'étude

1.1. Présentation succincte de l'ouvrage

Le viaduc de la Roche permet le franchissement par la RCEA-RN79 du vallon de la Roche sur la commune de Sologny (71). Cet ouvrage supporte une chaussée bidirectionnelle.

L'ouvrage est de type poutre caisson à inertie constante en béton précontraint. Il est constitué de 9 travées (2 travées de rive de 32,85 m de portée et 7 travées de 45,16 m de portée) pour une longueur hors tout de 382 m.

Sa construction date des années 1984-1985 pour une mise en service fin 1985 (ouvrage âgé donc de 36-37 ans au moment de l'étude).

À la demande de la DIR Centre-Est, le Cerema est intervenu sur cet ouvrage pour réaliser :

- une inspection détaillée périodique avec notamment utilisation de la passerelle Epsilon du Cerema Centre-Est pour l'inspection des piles. Cette inspection fait l'objet d'un rapport indépendant ;
- le prélèvement de carottes à « cœur du béton » dans les piles pour vérifier la présence ou l'absence de gels de réaction de gonflement interne par examen au microscope électronique à balayage (MEB). Les examens au MEB sont réalisés par l'UGE (Université Gustave Eiffel) et font l'objet d'un rapport indépendant. Les prélèvements sont quant à eux présentés dans le présent rapport ;
- un diagnostic de corrosion des armatures du béton armé dans différentes parties de l'ouvrage : piles, culées, tablier (hourdis inférieur, âme et encorbellements) et corniches, objet du présent rapport.

Le diagnostic de corrosion des armatures internes au béton a porté sur :

- x l'estimation des épaisseurs d'enrobage des armatures par méthodes non destructives (Ferroskan® de Hilti et radar SIR 4000 de GSSI) complétée par quelques mesures ponctuelles destructives ;
- x la mesure de la profondeur de carbonatation du béton par prélèvements de carottes ;
- x l'établissement de profils de teneur en chlorures du béton par prélèvements de poudre ;
- x la réalisation de mesures électrochimiques (mesures de potentiels par rapport à une électrode de référence [Profometer® de Proceq] et mesures de résistivité [Resipod® de la société Proceq]).

Ce diagnostic a été réalisé par MM. Saussol, chargé d'études Ouvrages d'Art, et Maupou, agent d'investigations Ouvrages d'Art, de l'Agence d'Autun du Cerema Centre-Est pour les prélèvements sur site ainsi que pour le repérage des armatures dans les différentes zones étudiées et pour les estimations des épaisseurs d'enrobage.

Les mesures électrochimiques (mesures de potentiels électrode et de résistivité) ont été réalisées en compagnonnage avec M. Queguiner de l'Agence de Saint-Brieuc du Cerema Ouest (agence de référence du Cerema pour les mesures électrochimiques).

L'ensemble de ces interventions s'est étalé sur les **semaines n° 17, 22 et 23 de l'année 2021**. Les moyens d'accès utilisés ont été la passerelle Epsilon du département DRIM du Cerema Centre-Est (semaine n° 17) et la passerelle MBI 180 de la société Dumont (semaines n°22 et 23).

Le balisage (neutralisation d'une voie de circulation avec mise en place d'une déviation) a été assuré par les agents du CEI de Charnay-Lès-Mâcon.

1.2. Formulations des bétons employés et zones auscultées

L'agence d'Autun du Cerema ayant suivi les travaux de construction de l'ouvrage, nous avons trouvé dans nos archives les informations suivantes sur les bétons : le tablier ainsi que les « parties aériennes » des piles et culées ont été coulés avec la même formule de béton (note : dans nos documents, on note la présence de deux appellations, Q400 pour les appuis et E400 pour le tablier, mais ces deux appellations correspondent à une même formulation de béton) qui est rappelée ci-après.

Le ciment est de type CPA 55R et provient de la cimenterie Vicat à Crechy (03). Ces caractéristiques chimiques et physiques sont présentées en **annexe A**.

Les granulats ont pour origine Riffier Saône à Mâcon.

Partie d'ouvrage	Ciment CPA 55R (kg)	Granulats 5/15 (kg)	Granulats 15/25 (kg)	Granulats 0/5 (kg)
Tablier	400	695	380	750
Appuis (hors fondations)	400	695	380	750

Pour se repérer, les appuis ont été numérotés de C0 et C9 pour les culées et de P1 à P8 pour les piles dans le sens Charolles → Mâcon. Les travées ont été numérotées de T1 à T9 dans le même sens.

Les zones concernées par le diagnostic de corrosion des armatures internes au béton sont :

- culée C9 : mur de front et mur garde-grève ;
- piles P2, P4 et P5 ;
- intrados du hourdis inférieur : travée T2 ;
- âmes du caisson : travées T2-T4-T5-T6 ;
- encorbellements du caisson: travée T4 ;
- corniches : travée T6 ;
- longrines supports des dispositifs de retenue : extrémité côté Mâcon de l'ouvrage.

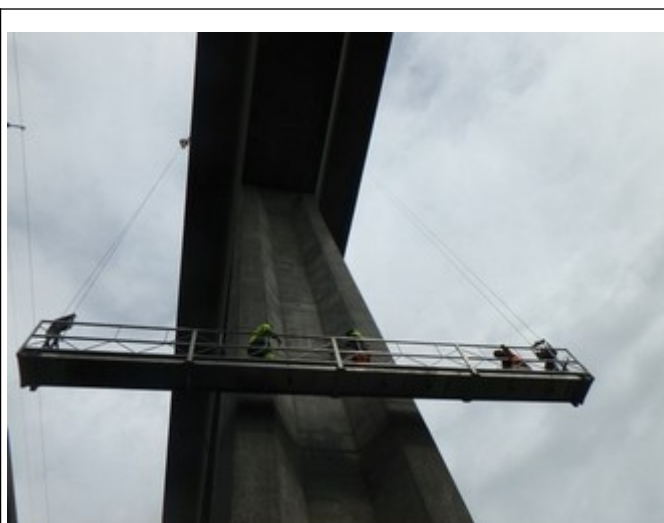


Illustration 1: Vue sur moyen d'accès : passerelle Epsilon du Cerema Centre-Est.

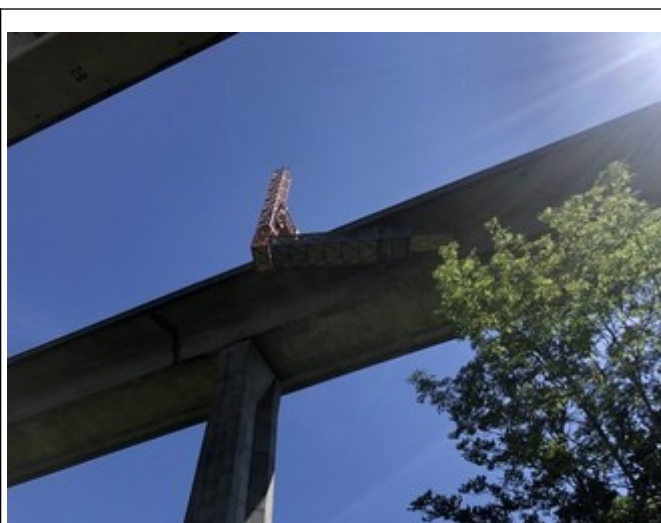


Illustration 2: Vue sur moyen d'accès : passerelle MBI 180.

Le tableau ci-après récapitule et détaille les différentes zones auscultées avec les prélèvements et mesures afférents.

Zone	Position	Prélèvements et mesures
Culées	Culée C9 – chevêtre	- 2 carottes pour carbonatation - 1 prélèvement pour profil de teneur en chlorures - 1 zone de mesures électrochimiques - estimations des enrobages
	Culée C9 – mur garde-grève	- 2 carottes pour carbonatation - 1 prélèvement pour profil de teneur en chlorures - 1 zone de mesures électrochimiques - estimations des enrobages
Piles	Pile P5	- 3 prélèvements pour profils de teneur en chlorures - 2 zones de mesures électrochimiques - estimations des enrobages
	Pile P4	- 3 carottes pour carbonatation - 1 prélèvement pour profil de teneur en chlorures - estimations des enrobages
	Pile P2	- estimations des enrobages
Caisson	Intrados hourdis inférieur (travée T2)	- 2 prélèvements pour profils de teneur en chlorures - 1 zone de mesures électrochimiques - estimations des enrobages sur l'ensemble de la travée T2
	Âmes du caisson (travées T2 – T4 – T5 – T6)	- 3 prélèvements pour carbonatation (T2 – T4 – T6) - 3 prélèvements pour profils de teneur en chlorures (T5 – T6) - 1 zone de mesures électrochimiques (T5) - estimations des enrobages (T4 – T5)
	Encorbellements du caisson (travée T4)	- 1 prélèvement pour profil de teneur en chlorures - 1 zone de mesures électrochimiques - estimations des enrobages sur l'ensemble de la travée T4
	Intérieur du caisson	- 1 prélèvement pour carbonatation
Corniches	Corniches (travée T6)	- 1 carotte pour carbonatation - 2 prélèvements pour profils de teneur en chlorures - estimations des enrobages
Longrines	Longrine support du GC côté La roche (extrémité côté Mâcon)	- 1 prélèvement pour profil de teneur en chlorures

1.3. Documents, hypothèses et principe de référence

Le diagnostic corrosion des armatures internes au béton présenté dans ce rapport se base sur les documents suivants :

- le guide technique « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » du LCPC de décembre 2002 (notamment pages 44-45 présentées en **annexe D**) ;
- la procédure de diagnostic D1-1 « Diagnostic de corrosion du béton armé » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema (<https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/index.html>), dont le logigramme est présenté en **annexe D**.

Vis-à-vis du risque de corrosion par les chlorures, le seuil critique du taux de **chlorures libres** retenu est de **0,4 %** par rapport à la masse en ciment du béton étudié.

Note : lorsque la teneur en ciment du béton n'est pas connue, il est considéré un seuil critique du taux de chlorures libres d'environ 0,06 % par rapport à la masse de béton.

Vis-à-vis du risque de corrosion par la carbonatation ou les chlorures, l'enrobage des armatures considéré est l'**enrobage caractéristique e_{95}** (« **moyenne – écart-type** ») : 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} (dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne).

Vis-à-vis du dépouillement et de l'exploitation des mesures électrochimiques :

- conformément au logigramme de la procédure de diagnostic D1-1 du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema, si les témoins de durabilité (front de carbonatation et front de chlorures ou profil de teneurs en chlorures libres) ne mettent pas en évidence de risque de corrosion des armatures, les mesures ne sont pas exploitées mais présentées en annexe (cf **annexe E**) ;
- les mesures de résistivité sont données à titre indicatif, a fortiori si le ciment employé n'est pas de type CEM I (anciennement CPA, Ciment Portland Artificiel) ;
- conformément aux recommandations RILEM TC 154, l'exploitation des mesures de potentiel électrode se basera prioritairement (mais pas uniquement) sur les gradients de potentiels, les valeurs absolues étant fortement influencées par différents paramètres (humidité du béton, teneur en chlorures, carbonatation, etc.). Des gradients localisés supérieurs à 8 ou 10 mV/cm peuvent être l'indication de zones anodiques et donc de présence de corrosion ;
- le constat visuel de la présence ou de l'absence de corrosion des armatures dégagées du béton est un élément prépondérant pour l'exploitation des mesures.

2. Diagnostic des culées

Le diagnostic a été réalisé sur le chevêtre et le mur garde-grève de la culée C9 (côté Mâcon). Les zones auscultées sont situées sur la moitié côté TGV des parties de la culée précitées : on observe de nombreuses traces d'écoulement sur le mur garde-grève et quelques traces sur la face avant du chevêtre. Ces écoulements ont la même origine : des défauts d'étanchéité au niveau des joints de dilatation de l'ouvrage.



Illustration 3: Vue sur la culée C9. Le côté "TGV" est à droite sur la photo.

2.1. Chevêtre de la culée C9

2.1.1. Description de la zone étudiée et positionnement des prélèvements

La zone auscultée est située à l'extrémité côté TGV du mur de front et fait environ $280 \times 140 \text{ cm}^2$; elle comprend :

- 9 armatures verticales espacées entre elles d'un pas compris entre 30 et 35 cm (numérotées de 1 à 9 dans le sens La Roche → TGV, l'armature n°1 étant située à environ 285 cm de l'extrémité côté TGV du mur de front). **Les armatures verticales sont les plus proches du parement ;**
- 6 armatures horizontales espacées entre elles d'un pas variable compris entre 20 et 30 cm et identifiées par des lettres (A à F) du haut vers le bas.

Cette zone ne présente pas de désordre apparent en dehors de quelques traces d'écoulements en provenance du sommier (défauts d'étanchéité des joints de chaussée et cunette obstruée à l'arrière du sommier).

Les illustrations 4 et 5 ci-après représentent la zone auscultée (photo) et un plan de la zone représentant les armatures repérées avec les positions des différents prélèvements et fenêtres. Ce fond de plan est également présenté en **annexe B**.



Illustration 4: Chevêtre de la culée C9 : vue sur la zone auscultée avec les armatures verticales (jaune) et horizontales (rouge).

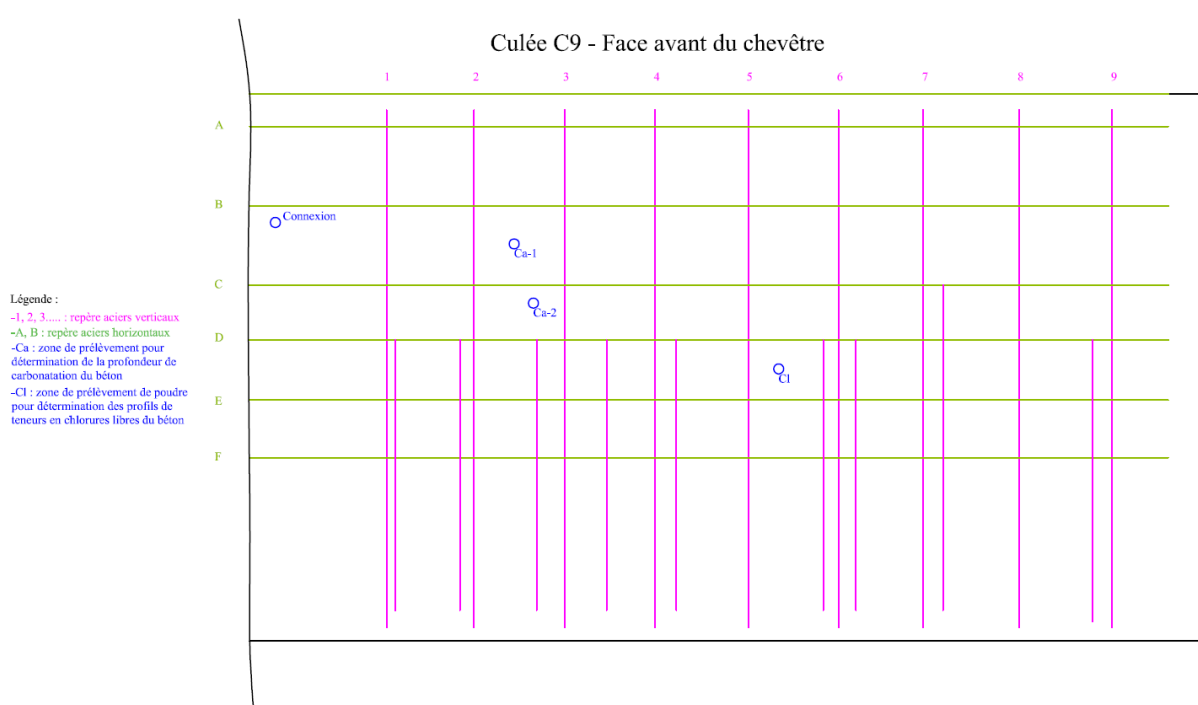


Illustration 5: Schéma de la zone auscultée avec les armatures détectées et les positions des prélèvements.

Sur le chevêtre, les prélèvements réalisés sont au nombre de 3 : 2 carottes pour la profondeur de carbonatation (F-Ca-1 et F-Ca2) et 1 prélèvement de poudre pour l'établissement d'un profil de teneur en chlorures (F-Cl-1).

Le tableau ci-après récapitule les différents prélèvements effectués et leurs positions sur l'ouvrage.

Prélèvement	Nature	Position
F-Ca-1	carbonatation	maille constituée par les armatures n° 2 et 3 (verticales) et B-C (horizontales)
F-Ca-2	carbonatation	maille constituée par les armatures n° 2 et 3 (verticales) et C-D (horizontales)
F-Cl-1	chlorures	maille constituée par les armatures n° 5 et 6 (verticales) et D-E (horizontales)

2.1.2. Profondeur de carbonatation

Le mode opératoire de la mesure de profondeur de carbonatation est décrit dans la Fiche B2-2 : « Mesure de la profondeur de carbonatation » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Cette mesure est faite sur des cassures fraîches des carottes prélevées sur site à l'aide d'un indicateur coloré, la phénolphthaléine (cet indicateur est rose sur le béton non carbonaté pH > 9 et incolore sur le béton carbonaté pH < 9).

Le front de carbonatation n'est pas très important. Il est compris entre 4 et 8 mm entre les différentes demi-carottes.

Pour le mur de front, **la profondeur moyenne de carbonatation est estimée à 6,3 mm (qu'on arrondira à 7 mm).**

Le tableau et les photos ci-après illustrent les résultats obtenus.

Carotte	1 ^{re} 1/2 carotte (mm)	2 ^e 1/2 carotte (mm)	Moyenne (mm)
F-Ca-1	7	8	7,5
F-Ca-2	4	6	5
Moyenne des deux carottes			6,3



Illustration 6: Vue sur carotte F-Ca-1 après fendage.



Illustration 7: Zoom photo précédente.



Illustration 8: Vue sur carotte F-Ca-2 après fendage.



Illustration 9: Zoom photo précédente.

2.1.3. Profil de teneur en chlorures

Le mode opératoire de la mesure de la teneur en chlorures est décrit dans la Fiche B2-3 : « Prélèvements de poudre de béton pour mesure de la teneur en agents agressifs » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Les PV des profils de teneur en chlorures libres sont présentés en **annexe C** et les principaux résultats dans le tableau et le graphe ci-après.

Rappel : le seuil critique est de 0,4 % par rapport à la masse de ciment.

Sur la face avant du chevêtre, les teneurs en chlorures restent faibles (toujours inférieures au seuil critique de 0,4%). La forme de la courbe des teneurs en chlorures libres (cf illustration 10) met toutefois en évidence une pollution active du béton (teneur plus importante dans le premier centimètre : 0,3 % par rapport à la masse de ciment) même si elle n'a pas encore atteint le niveau du premier lit d'armatures.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment (*)			
Zone	Emplacement	Teneur maximale en Cl^- libres	Teneur en Cl^- libres au niveau des armatures (**)
F-Cl-1	Chevêtre de la culée C9	0,300	0,03

(*) : la teneur en Cl^- libres est donnée en fonction de la masse de ciment. Le seuil critique est alors de 0,4 %.

(**) : le niveau des armatures correspond à l'enrobage caractéristique e_{95} du premier lit d'armatures (cf paragraphe sur les épaisseurs d'enrobage).

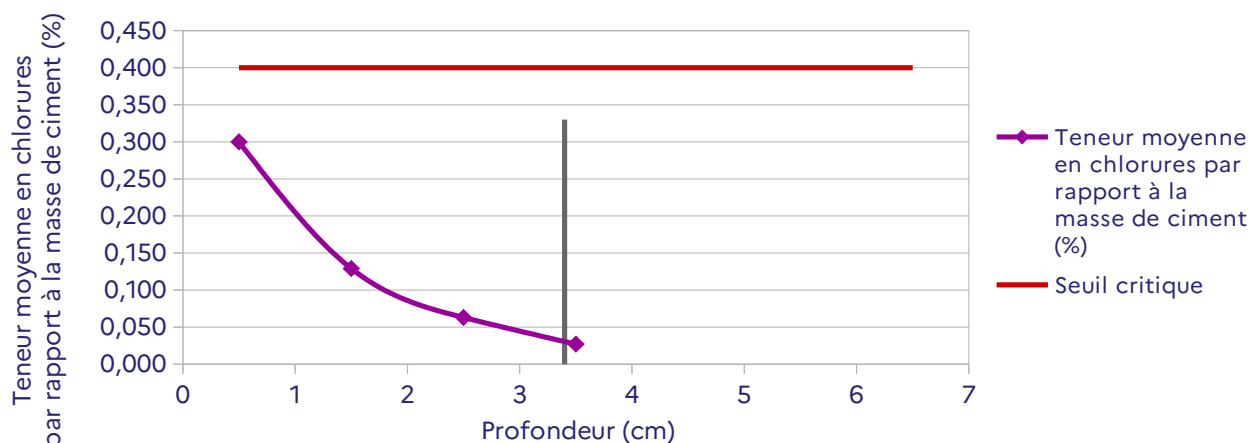


Illustration 10: Profil de teneurs en chlorures sur la face avant du chevêtre de la culée C9.

2.1.4. Épaisseurs d'enrobages

Le mode opératoire de la mesure de la profondeur d'enrobage des armatures du béton est décrit dans la Fiche B2-1 : « Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Les estimations sont obtenues en combinant les résultats du Ferroscan® et du radar.

Les estimations d'épaisseurs d'enrobage ont été effectuées sur la face avant du chevêtre de la culée sur une longueur d'environ 5 m (zone située à l'extrémité côté TGV) et sur la hauteur du mur (5 profils radar horizontaux réalisés). Le secteur où ont été réalisés les mesures électrochimiques et les prélèvements est inclus dans cette zone plus grande servant de base pour l'estimation des profondeurs d'enrobage.

L'étude s'est concentrée sur les armatures les plus proches du parement, c'est-à-dire les armatures verticales.

Les estimations d'épaisseurs d'enrobage sont conséquentes sur la face avant du chevêtre : 42 mm de moyenne pour un enrobage caractéristique e_{95} de 34 mm qui reste largement inférieur au front de carbonatation (7 mm) et au front de chlorures (teneurs à ce jour toujours inférieures au seuil critique).

Ainsi, sur le chevêtre, les armatures restent dans le domaine de la passivation.

Les estimations d'enrobages sont présentées sous forme de tableau et sous format graphique ci-après.

Enrobages des armatures sur le chevêtre de la culée C9 (mm)						
Armatures	Moy.	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb val.
verticales	42	9	34	25	64	108

- Enrobage caractéristique calculé e_{95} (moyenne – écart-type) : 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} (dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne)

Note : d'après les plans fournis par la DIR CE, les armatures verticales en partie courante du chevêtre sont des cadres HA20, ce qui ferait un enrobage caractéristique e_{95} de 54 mm pour les armatures horizontales.

Viaduc de la Roche : estimation des enrobages sur le chevêtre de la culée C9

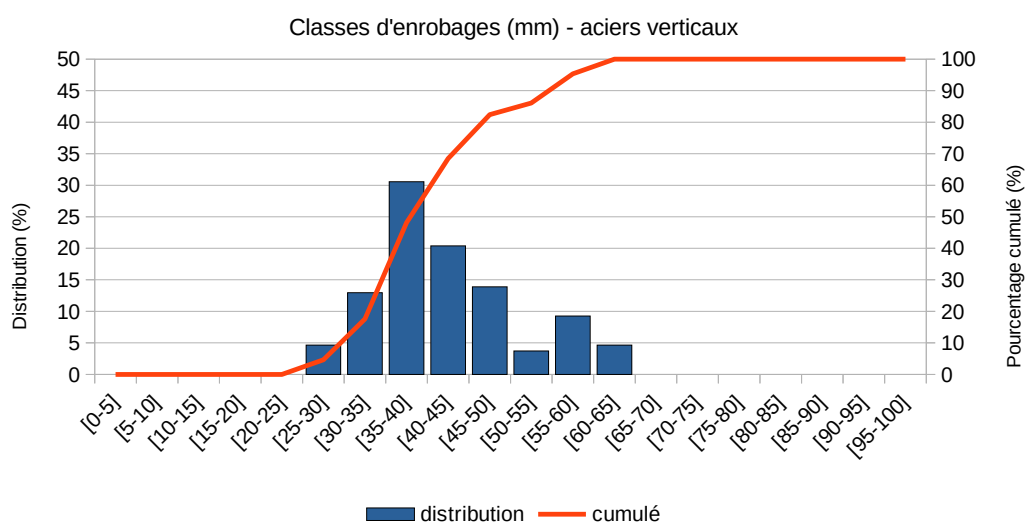


Illustration 11: Distribution des estimations d'enrobages sur le mur de front de la culée C9.

2.1.5. Mesures électrochimiques et ouvertures de fenêtres

Le mode opératoire de la mesure de potentiel d'électrode est décrit dans la Fiche B2-4 : « Mesure du potentiel d'électrode (Cu/CuSO₄) (selon la norme ASTM C-876-91) » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Conformément au logigramme de la procédure d'auscultation D1-1 du Cahier Interactif (cf **annexe D**), les témoins de durabilité ne montrant pas de risque de corrosion pour cette partie d'ouvrage, les mesures électrochimiques réalisées ne sont pas exploitées dans le corps de ce rapport. Elles sont présentées en **annexe E** (globalement, elles ne présentent pas de risque fort de corrosion).

L'ouverture d'une petite fenêtre sur une armature verticale pour réaliser la connexion électrique au ferrailage pour les mesures de potentiel n'a **pas** mis en évidence **de trace de corrosion** sur l'armature dégagée.

2.1.6. Récapitulatif : face avant du chevêtre

Les investigations sur le mur de front de la culée C9 mettent en évidence :

- la présence de chlorures à des teneurs très faibles au niveau du premier lit de ferrailage, mais à un niveau qui commence à être significatif dans le premier centimètre avant de baisser rapidement ensuite ;
- un béton faiblement carbonaté (de l'ordre de 7 mm) ;
- des épaisseurs d'enrobage importantes, supérieures aux 30 mm théoriques : enrobage caractéristique e_{95} de 34 mm) ;
- l'ouverture d'une petite fenêtre sur une armature verticale ayant servi à la connexion à la nappe de ferrailage (cf illustration 5 pour l'emplacement) n'a **pas** mis en évidence **de trace de corrosion**.

Le diagnostic de corrosion des armatures internes au béton sur la zone étudiée du chevêtre de la culée C9 est favorable. En se référant au guide LCPC « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » de décembre 2002 (cf annexe D) on se retrouve dans le **cas I « Aucune protection n'est nécessaire, sauf à titre préventif »**.

2.2. Mur garde-grève de la culée C9

2.2.1. Description de la zone étudiée et positionnement des prélèvements

La zone auscultée est située à l'extrémité côté TGV du mur garde-grève et fait environ $320 \times 120 \text{ cm}^2$; elle comprend :

- 17 armatures verticales espacées entre elles d'un pas moyen de 20 cm (numérotées de 1 à 17 dans le sens La Roche → TGV, l'armature n°1 étant située à environ 350 cm de l'extrémité côté TGV du mur garde-grève). **Les armatures verticales sont les plus proches du parement** ;
- 7 armatures horizontales espacées entre elles d'un pas variable compris entre 10 et 30 cm et identifiées par des lettres (A à G) du haut vers le bas.

Les désordres relevés sur cette zone sont :

- d'importantes traces de ruissellements sur la moitié côté TGV (entre les armatures verticales n°9 et 17) ;
- deux petites zones sonnant le creux (situées dans la maille constituée des armatures n°7-8 / A-B et la maille n°15-16 / D-E ;
- deux fissures verticales au droit des armatures n°8 et n°14 (entre les armatures horizontales A et E).

Les illustrations 12 à 14 ci-après représentent la zone auscultée (photos) et un plan de la zone représentant les armatures repérées avec les différents prélèvements et fenêtres. Ce fond de plan est également présenté en **annexe B**.



Illustration 12: Vue sur la partie côté TGV de la zone auscultée sur le mur garde-grève.



Illustration 13: Vue sur la partie côté La Roche de la zone auscultée sur le mur garde-grève.

Culée C9 - Mur garde grève

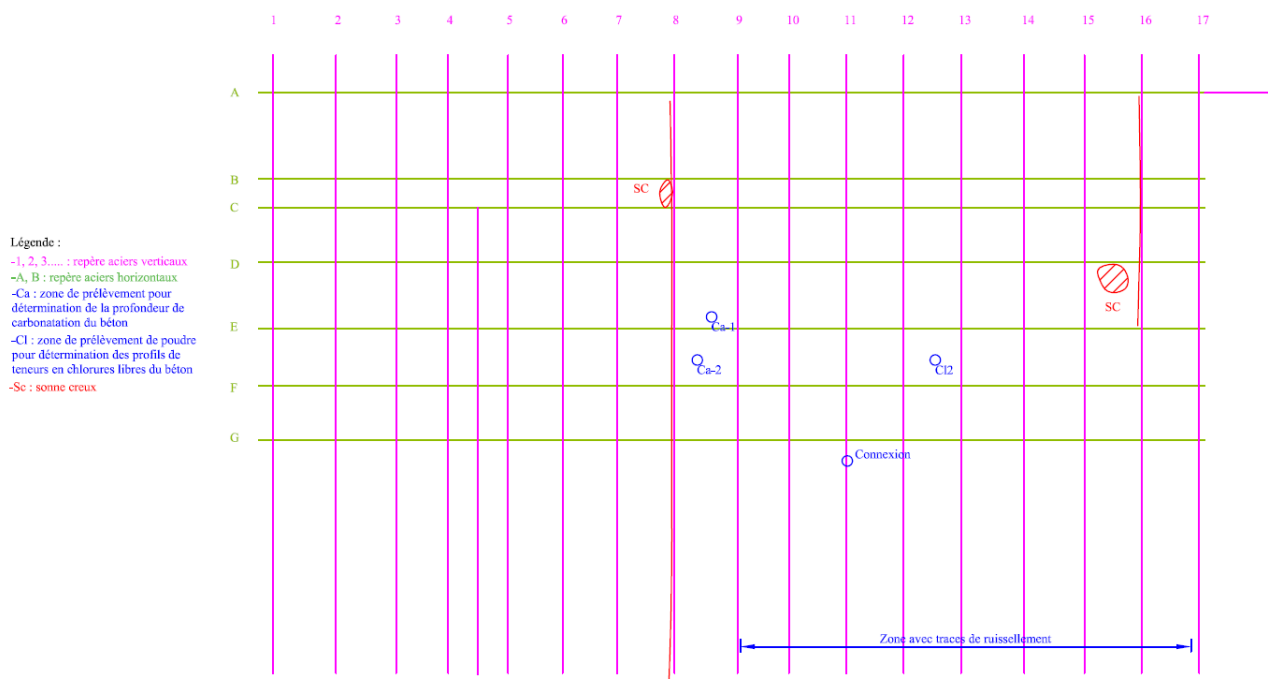


Illustration 14: Schéma de la zone auscultée avec le repérage des armatures, les principaux désordres et les prélèvements.

Sur le mur garde-grève, les prélèvements réalisés sont au nombre de 3 : 2 carottes pour la profondeur de carbonatation (GG-Ca-1 et GG-Ca-2) et 1 prélèvement de poudre pour l'établissement d'un profil de teneur en chlorures (GG-CI-2).

Le tableau ci-après récapitule les différents prélèvements effectués et leurs positions sur l'ouvrage.

Prélèvement	Nature	Position
GG-Ca-1	carbonatation	maille constituée par les armatures n° 8 et 9 (verticales) et D-E (horizontales)
GG-Ca-2	carbonatation	maille constituée par les armatures n° 8 et 9 (verticales) et E-F (horizontales)
GG-CI-2	chlorures	maille constituée par les armatures n° 12 et 13 (verticales) et E-F (horizontales)

2.2.2. Profondeur de carbonatation

Le mode opératoire de la mesure de profondeur de carbonatation est décrit dans la Fiche B2-2 : « Mesure de la profondeur de carbonatation » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Cette mesure est faite sur des cassures fraîches des carottes prélevées sur site à l'aide d'un indicateur coloré, la phénolphthaléine (cet indicateur est rose sur le béton non carbonaté pH > 9 et incolore sur le béton carbonaté pH < 9).

Le front de carbonatation n'est pas très important et est homogène sur les deux carottes prélevées. Pour le mur garde-grève, **la profondeur moyenne de carbonatation est estimée à 8 mm.**

Le tableau et les photos ci-après illustrent les résultats obtenus.

Carotte	1 ^{re} 1/2 carotte (mm)	2 ^e 1/2 carotte (mm)	Moyenne (mm)
GG-Ca-1	7,5	8,5	8
GG-Ca-2	8	8	8
Moyenne des deux carottes			8,0



Illustration 15: Vue sur carotte GG-Ca-1 après fendage.



Illustration 16: Zoom photo précédente.



Illustration 17: Vue sur carotte GG-Ca-2 après fendage.



Illustration 18: Zoom photo précédente.

2.2.3. Profils de teneur en chlorures

Le mode opératoire de la mesure de la teneur en chlorures est décrit dans la Fiche B2-3 : « Prélèvements de poudre de béton pour mesure de la teneur en agents agressifs » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Les PV des profils de teneur en chlorures libres sont présentés en **annexe C** et les principaux résultats dans le tableau et le graphe ci-après.

Rappel : le seuil critique est de 0,4 % par rapport à la masse de ciment.

Le prélèvement de poudre a été effectué au niveau de traces d'écoulements pour se placer dans un cas plus défavorable (de plus, les zones avec traces d'écoulements représentent une surface non négligeable du mur garde-grève).

Le profil de teneur en chlorures montre une pollution importante : teneur largement supérieure au taux critique de 0,4 % par rapport à la masse de ciment dans les trois premiers centimètres. Le front de chlorures (profondeur à partir de laquelle le taux repasse sous les 0,4%) est ainsi de 3 cm.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment (*)			
Zone	Emplacement	Teneur maximale en Cl^- libres	Teneur en Cl^- libres au niveau des armatures (**)
GG-Cl-1	Mur garde-grève de la culée C9	0,705	0,30

(*) : la teneur en Cl^- libres est donnée en fonction de la masse de ciment. Le seuil critique est alors de 0,4 %.

(**) : le niveau des armatures correspond à l'enrobage caractéristique e_{95} du premier lit d'armatures (cf paragraphe sur les épaisseurs d'enrobage).

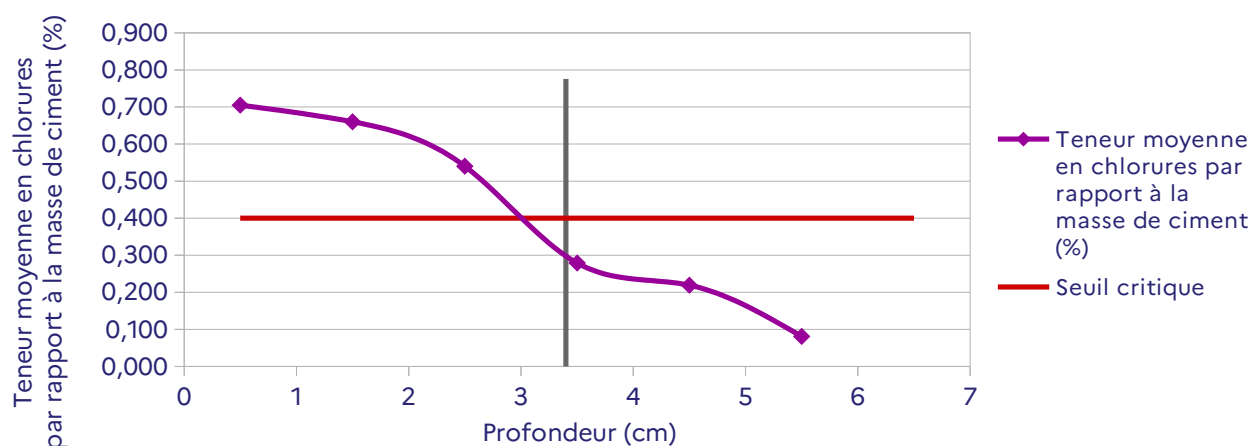


Illustration 19: Profil de teneur en chlorure sur le mur garde-grève de la culée C9.

2.2.4. Épaisseurs d'enrobages

Le mode opératoire de la mesure de la profondeur d'enrobage des armatures du béton est décrit dans la Fiche B2-1 : « Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Les estimations sont obtenues en combinant les résultats du Ferroskan® et du radar.

Les estimations d'épaisseurs d'enrobage ont été effectuées sur le mur de front de la culée sur une longueur d'environ 4 m (zone située à l'extrémité côté TGV) et sur les deux mètres inférieurs du mur (6 profils radar horizontaux réalisés). Le secteur où ont été réalisés les mesures électrochimiques et les prélèvements est inclus dans cette zone plus grande servant de base pour l'estimation des profondeurs d'enrobage.

L'étude s'est concentrée sur les armatures les plus proches du parement, c'est-à-dire les armatures verticales.

Les estimations d'épaisseurs d'enrobage sont conséquentes sur le mur garde-grève : 41 mm de moyenne pour un enrobage caractéristique e_{95} de 34 mm. Ces valeurs sont similaires à celles trouvées sur la face avant du chevet.

L'enrobage caractéristique e_{95} (34 mm) reste supérieur au front de carbonatation (8 mm) et au front de chlorures (30 mm), et les armatures **restent ainsi théoriquement dans le domaine de la passivation**. Vis-à-vis des chlorures cependant, toute la marge représentée par le béton d'enrobage est d'ores et déjà consommée et de plus, les chlorures déjà présents dans le béton vont continuer à se diffuser (même en

l'absence de nouvel apport) et, si rien n'est entrepris, le front de chlorures atteindra inexorablement le premier lit d'armatures (sur la zone auscultée, environ 4 % des armatures ont un enrobage inférieur à 30 mm et près de 21 % inférieur à 35 mm).

Les estimations d'enrobages sont présentées sous forme de tableau et sous format graphique ci-après.

Enrobages des armatures sur le mur grade-grève de la culée C9 (mm)						
Armatures	Moy.	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb val.
verticales	41	7	34	27	61	147

- Enrobage caractéristique calculé e_{95} (moyenne – écart-type) : 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} (dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne)

Note : d'après les plans fournis par la DIR CE, les diamètres des armatures verticales est de 12 mm, ce qui ferait un enrobage caractéristique e_{95} de 46 mm pour les armatures horizontales.

Viaduc de la Roche : estimation des enrobages sur le mur garde-grève de la culée C9

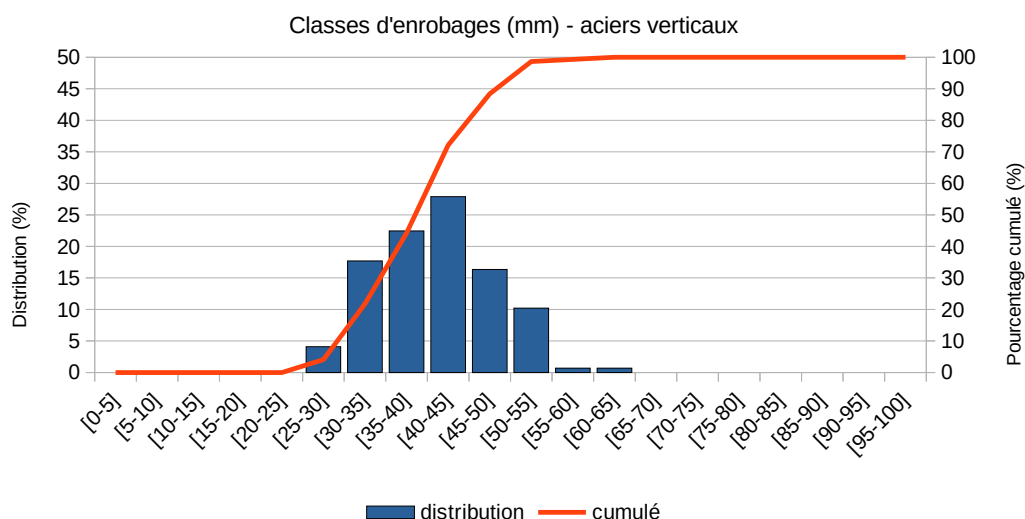


Illustration 20: Distribution des enrobages sur le mur garde-grève de la culée C9.

2.2.5. Mesures électrochimiques et ouvertures de fenêtres

Le mode opératoire de la mesure de potentiel d'électrode est décrit dans la Fiche B2-4 : « Mesure du potentiel d'électrode (Cu/CuSO₄) (selon la norme ASTM C-876-91) » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Mesures de résistivité électrique du béton :

Les mesures de résistivité sont prises dans les mailles du ferrailage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

L'appareil utilisé est le Resipod® de la société Proceq.

résistivité électrique du béton d'enrobage (kΩ.cm)																
Valeur moyenne des mesures réalisées en étoile dans chaque maille (kΩ.cm)																
	entre 1 et 2	entre 2 et 3	entre 3 et 4	entre 4 et 5	entre 5 et 6	entre 6 et 7	entre 7 et 8	entre 8 et 9	entre 9 et 10	entre 10 et 11	entre 11 et 12	entre 12 et 13	entre 13 et 14	entre 14 et 15	entre 15 et 16	entre 16 et 17
avant A																
entre A et B	62	100	111	154	132	130	121	91	135	82	106	93	129	101	127	62
entre B et C	57	91	61	108	131	124	79	126								
entre C et D	56	68	38	51	100	153	55	83	127	85	48	30	97	57	167	66
entre D et E	63	81	123	109	152	140	130	153	138	84	68	58	104	47	253	115
entre E et F	71	109	116	150	126	158	120	122	137	95	65	70	68	54	95	71
entre F et G	53	88	92	104	125	125	116	76	112	101	64	68	59	49	36	44

A titre indicatif, la proportion de mesures de résistivité dans les différentes classes de risque de corrosion proposées par la recommandation RILEM TC154 pour béton CEM I est proposée ci-après.

Résistivité électrique (kΩ.cm)*	Risque de corrosion*	Pourcentage de mesures
$Re \geq 100$	Négligeable	49%
$50 \leq Re < 100$	Faible	43%
$10 \leq Re < 50$	Modéré	8%
$Re < 10$	Elevé	0%

(*) : Classement et valeur seuils établis à 20°C pour un béton CEM I (RILEM TC154 – Résistivité, Tab2)

Ces mesures semblent indiquer que les armatures se trouvent dans un béton globalement peu propice au développement de la corrosion. La partie la plus soumise aux écoulements (entre les armatures n° 9 et n°17) est logiquement celle où les résistivités sont les plus basses mais même dans cette zone, les valeurs restent relativement élevées.

Potentiels d'armatures :

Les mesures de potentiels sont obtenues avec le Profometer® de Proceq. Les mesures sont réalisées au droit des armatures avec un pas de 10 cm.

Les tableaux suivants présentent les résultats des mesures de potentiels sur les armatures verticales (les plus proches du parement). Pour cette orientation d'armature, est présenté un tableau donnant les résultats des potentiels et un autre tableau présentant les gradients entre deux mesures consécutives sur une même armature.

Armatures verticales :

Mur garde-grève de la culée C9 - armatures verticales (POTENTIELS mV)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	-226	-231	-177	-171	-247	-206	-211	-284	-309	-329	-313	-309	-263	-259	-421	-341	-378
10	-227	-224	-183	-174	-255	-213	-229	-285	-284	-310	-342	-326	-261	-249	-374	-417	-396
20	-253	-226	-188	-189	-251	-217	-259	-276	-292	-320	-336	-370	-304	-243	-428	-422	-409
30	-302	-234	-281	-262	-274	-240	-253	-387	-301	-329	-297	-470	-299	-271	-464	-422	-420
40	-324	-243	-359	-411	-306	-288	-287	-425	-304	-329	-341	-529	-360	-330	-423	-425	-409
50	-314	-252	-412	-423	-334	-308	-324	-456	-282	-315	-329	-486	-401	-437	-424	-343	-391
60	-309	-244	-298	-345	-319	-305	-261	-369	-271	-309	-348	-439	-387	-382	-470	-300	-364
70	-294	-244	-289	-302	-348	-289	-252	-298	-270	-334	-326	-363	-459	-473	-409	-322	-371
80	-284	-252	-248	-282	-346	-280	-260	-272	-266	-311	-323	-378	-414	-438	-490	-412	-419
90	-276	-248	-221	-285	-345	-281	-261	-282	-303	-319	-310	-402	-429	-446	-483	-392	-437
100	-282	-248	-227	-222	-336	-304	-246	-269	-317	-315	-368	-324	-420	-439	-494	-472	-444
110	-284	-259	-236	-227	-359	-317	-250	-263	-306	-368	-372	-356	-434	-449	-485	-482	-438
120	-344	-280	-257	-249	-393	-341	-324	-320	-376	-400	-443	-353	-444	-462	-513	-497	-444
130	-414	-327	-257	-276	-384	-370	-356	-322	-386	-397	-545	-417	-448	-484	-536	-466	-445

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentiels d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	19%
-200 à -350	Moyenne	58%
< -350	Forte	23%

Mur garde-grève de la culée C9 – armatures verticales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0																	
10	0,1	0,7	0,6	0,3	0,8	0,7	1,8	0,1	2,5	1,9	2,9	1,7	0,2	1	4,7	7,6	1,8
20	2,6	0,2	0,5	1,5	0,4	0,4	3	0,9	0,8	1	0,6	4,4	4,3	0,6	5,4	0,5	1,3
30	4,9	0,8	9,3	7,3	2,3	2,3	0,6	11,1	0,9	0,9	3,9	10	0,5	2,8	3,6	0	1,1
40	2,2	0,9	7,8	14,9	3,2	4,8	3,4	3,8	0,3	0	4,4	5,9	6,1	5,9	4,1	0,3	1,1
50	1	0,9	5,3	1,2	2,8	2	3,7	3,1	2,2	1,4	1,2	4,3	4,1	10,7	0,1	8,2	1,8
60	0,5	0,8	11,4	7,8	1,5	0,3	6,3	8,7	1,1	0,6	1,9	4,7	1,4	5,5	4,6	4,3	2,7
70	1,5	0	0,9	4,3	2,9	1,6	0,9	7,1	0,1	2,5	2,2	7,6	7,2	9,1	6,1	2,2	0,7
80	1	0,8	4,1	2	0,2	0,9	0,8	2,6	0,4	2,3	0,3	1,5	4,5	3,5	8,1	9	4,8
90	0,8	0,4	2,7	0,3	0,1	0,1	0,1	1	3,7	0,8	1,3	2,4	1,5	0,8	0,7	2	1,8
100	0,6	0	0,6	6,3	0,9	2,3	1,5	1,3	1,4	0,4	5,8	7,8	0,9	0,7	1,1	8	0,7
110	0,2	1,1	0,9	0,5	2,3	1,3	0,4	0,6	1,1	5,3	0,4	3,2	1,4	1	0,9	1	0,6
120	6	2,1	2,1	2,2	3,4	2,4	7,4	5,7	7	3,2	7,1	0,3	1	1,3	2,8	1,5	0,6
130	7	4,7	0	2,7	0,9	2,9	3,2	0,2	1	0,3	10,2	6,4	0,4	2,2	2,3	3,1	0,1

Des gradients localisés supérieurs à 8-10 mV/cm peuvent être l'indication de zones anodiques et donc de présence de corrosion.

Les potentiels sont dans l'ensemble très électronégatifs, en particulier sur le tiers côté TGV de la zone étudiée qui correspond à la zone avec les traces d'écoulement (teneurs en chlorures probablement plus élevées dans cette zone).

L'étude des gradients montre des zones possiblement anodiques (zones localement plus électronégatives mises en évidence par des gradients élevés). On relève une bonne corrélation entre les positions de ces zones anodiques et les désordres déjà relevés. Cependant, le nombre de zones possiblement anodiques est plus élevé que le nombre de désordres visibles à ce jour sur le parement.

Les mesures électrochimiques suggèrent que la corrosion s'est déjà initiée dans la zone étudiée du mur garde-grève.

2.2.6. Récapitulatif : mur garde-grève

Les investigations sur le mur garde-grève de la culée C9 mettent en évidence :

- un béton pollué par les chlorures sur les trois premiers centimètres (front de chlorures de 30 mm) ;
- un béton faiblement carbonaté (front de carbonatation de 8 mm) ;
- des épaisseurs d'enrobage importantes, supérieures aux 30 mm théoriques : enrobage caractéristique calculé e_{95} de 34 mm et environ 4 % des valeurs estimées inférieures à 30 mm) ;
- des mesures électrochimiques qui suggèrent une corrosion déjà initiée.

Le diagnostic de corrosion des armatures internes au béton sur la zone étudiée du mur garde-grève indique un fort risque de corrosion déjà initiée dû à une pollution du béton d'enrobage par les chlorures. En se référant au guide LCPC « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » de décembre 2002 (cf annexe D) on se retrouve, stricto sensu, dans le cas II « Ralentir la pénétration des chlorures supplémentaires... ». Cependant, compte tenu des taux de chlorures libres déjà présents dans les deux premiers centimètres, la diffusion de ces chlorures vers les armatures et les résultats des mesures électrochimiques on se situe plus justement dans le **cas III « Diminuer le taux de chlorures par une technique d'extraction adaptée »**.

2.3. Récapitulatif sur la culée C9

Les deux zones auscultées sur la culée C9 montrent un risque de corrosion des armatures du béton très différent entre la face avant du chevet (armatures encore dans un état de passivation) et le mur garde-grève (armatures situées dans un béton pollué par les chlorures et corrosion très probablement déjà initiée).

Le tableau ci-dessus récapitule les principaux résultats.

	Enrobage e ₉₅ (mm)	Front de carbonatation (mm)	Front de chlorures (mm) ⁽¹⁾	Mesures électrochimiques	Cas guide LCPC
chevêtre	34	7	0	/	I
garde-grève	34	8	30	corrosion déjà initiée	III
Estimation de la durée de vie résiduelle en années ⁽²⁾ :					
chevêtre		> 100	> 100		
garde-grève		> 100	~ 0		

⁽¹⁾ : lorsque la teneur en chlorures ne dépasse jamais le seuil critique de 0,4 % le front de chlorures est à 0 mm (cela ne signifie pas que la teneur est forcément nulle).

⁽²⁾ : durée de vie résiduelle basée sur l'hypothèse simplifiée que les fronts de carbonatation et de chlorures évoluent suivant une loi en $\sqrt{t}$.

Connaissant l'âge de l'ouvrage (36-37 ans) et les témoins de durabilité à cet âge, il est possible d'estimer une durée de vie résiduelle (temps avant que les fronts de carbonatation et de chlorures atteignent le premier lit d'armatures). Cette notion de durée de vie résiduelle est une **approximation** à interpréter avec précaution et à utiliser comme une indication utile dans la planification de travaux de protection comme de réparation.

La corrosion des armatures étant déjà initiée sur le mur garde-grève, elle ne pourra que se développer avec l'apparition de désordres sur le parement. Après traitement des venues d'eau en provenance des joints de dilatation de l'ouvrage, des travaux visant à éliminer les chlorures du béton d'enrobage sont à prévoir assez rapidement pour stopper l'évolution des désordres.

3. Diagnostic du béton des piles

3.1. Description des zones auscultées

Note : pour se repérer, les piles sont numérotées de P1 à P7 dans le sens Charolles → Mâcon.

Les parements des piles de l'ouvrage présentent un maillage de fissures assez prononcées : les deux piles les plus concernées par ces fissures sont les piles P5 et P6. Des prélèvements de carottes à cœur de ces piles ont également été réalisés en 2021 pour effectuer des examens au MEB (microscope électronique à balayage) afin de statuer sur une possible réaction de gonflement interne.

Pour avoir une idée la plus précise possible du risque de corrosion des armatures des piles, les zones auscultées ont été réparties sur plusieurs piles :

- la pile P5 (zone plus dégradée) dans ses parties inférieure et supérieure,
- les piles P2 et P4 (zones moins dégradées).

Le tableau ci-dessus récapitule les différentes zones étudiées avec les prélèvements effectués.

Piles	Zone étudiée	Enrobages	Front de carbonatation	Front de chlorures	Mesures électrochimiques
P5	base face Charolles	oui	non	oui	oui
	face Charolles (toute la hauteur)	oui	non	non	non
	partie supérieure face Charolles	oui	non	oui	non (*)
	base face La Roche	oui	non	oui	oui
P4	base face Charolles	oui	oui	oui	non
	face Charolles (toute la hauteur)	oui	oui (mi-hauteur)	non	non
	partie supérieure face Charolles	non	oui	non	non
P2	base face Charolles	oui	non	non	non

(*) : des mesures électrochimiques étaient initialement prévues (repérage des armatures effectué) mais n'ont pas été réalisées en raison d'un **béton trop sec** (mesures non représentatives de l'état des armatures si réalisées sur un béton trop sec).

3.2. Profondeur de carbonatation

Le mode opératoire de la mesure de profondeur de carbonatation est décrit dans la Fiche B2-2 : « Mesure de la profondeur de carbonatation » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Cette mesure est faite sur des cassures fraîches des carottes prélevées sur site à l'aide d'un indicateur coloré, la phénolphthaléine (cet indicateur est rose sur le béton non carbonaté pH > 9 et incolore sur le béton carbonaté pH < 9).

Le front de carbonatation a été mesuré sur la pile P4 (face côte Charolles) à 3 niveaux différents : à la base, à mi-hauteur et en tête de la pile. Les valeurs sont très homogènes en tête et en pied de pile (12,4 mm) mais différent assez sensiblement à mi-hauteur (16,4 mm).

La profondeur du front de carbonatation est prise comme la moyenne des 3 carottes arrondie au millimètre supérieur, ainsi, pour les piles **la profondeur moyenne de carbonatation retenue est estimée à 14 mm**.

Le tableau et les photos ci-après illustrent les résultats obtenus.

Carotte	Emplacement	1 ^{re} 1/2 carotte (mm)	2 ^e 1/2 carotte (mm)	Moyenne (mm)
Ca-1	pile P4 face Charolles : base	12,8	12	12,4
Ca-2	pile P4 face Charolles : haut	12,3	12,5	12,4
Ca-3	pile P4 face Charolles : milieu	16,4	cassée	16,4
Moyenne des carottes :				13,7



Illustration 21: Carotte prélevée en pied de la pile P4 après fendage.



Illustration 22: Zoom photo précédente.



Illustration 23: Carotte prélevée en tête de la pile P4 après fendage.



Illustration 24: Zoom photo précédente.



Illustration 25: Carotte prélevée à mi-hauteur de la pile P4 après fendage.



Illustration 26: Zoom photo précédente.

3.3. Profils de teneur en chlorures

Le mode opératoire de la mesure de la teneur en chlorures est décrit dans la Fiche B2-3 : « Prélèvements de poudre de béton pour mesure de la teneur en agents agressifs » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Les PV des profils de teneur en chlorures libres sont présentés en **annexe C** et les principaux résultats dans le tableau et le graphe ci-après.

Rappel : le seuil critique retenue est de 0,4 % par rapport à la masse de ciment.

Quatre prélèvements ont été réalisés sur les piles :

- base pile P5 face Charolles : CI-P-1,
- tête pile P5 face Charolles : CI-P-2,
- base pile P5 face La Roche : CI-P-4,
- base pile P4 face Charolles : CI-P-3.

Les teneurs en chlorures varient fortement suivant les prélèvements :

- absence ou quasi-absence de chlorures sur CI-P-2 et CI-P-4 (soit pile P5 : base face La Roche et tête face Charolles),
- forte pollution : teneur largement supérieure au seuil critique sur les 3 premiers centimètres sur CI-P-1 (pile P5 : base face Charolles),
- pollution par les chlorures à un niveau qui reste toujours inférieur au seuil sur CI-P-3 (pile P4 ; base face Charolles). La forme de la courbe de ce profil est singulière puisqu'elle présente deux pics : il semble que cette zone ait été soumise à une pollution par les chlorures à une certaine période (début de vie de l'ouvrage), puis ait été protégée (comment ? - stockage de matériaux en pied de pile par les riverains ?) avant d'être à nouveau soumise à une pollution (cf illustration 30).

Il semble de prime abord contre-intuitif, qu'une importante pollution par les chlorures soit constatée sur la base de piles de grande hauteur alors que leurs pieds sont situés en plein champ et donc éloignés de toute source de pollution. De plus, au pied de la pile P5, la pollution diffère diamétralement suivant les faces La Roche (pas exposée) et Charolles (très exposée), ces deux faces faisant un angle de 90° entre elles.

Ces constatations permettent de définir **l'origine de la pollution** : il s'agit des **gargouilles situées sous l'encorbellement côté TGV qui se déversent directement depuis l'encorbellement** dans les champs en contre-bas. **L'exposition à la pollution est ainsi fonction de la position des gargouilles par rapport aux piles (cette position varie d'une pile à l'autre)** de l'orientation des faces de ces piles et probablement de la hauteur de ces dernières et de l'orientation des vents dominant (ouest). Ainsi, suivant leur orientation, les faces des piles sont plus ou moins exposées, de manière générale (à tempérer par la position des gargouilles par rapport aux piles), il est possible d'établir l'approche suivante :

- la face Charolles est très exposée (face sous le vent dominant) ;
- les faces Mâcon (opposée à Charolles donc a priori protégée des vents dominants) et TGV (du côté des gargouilles) semblent également exposées mais probablement à un degré moindre sauf lorsque la gargouille est située au droit de la pile (cas de P6) ;

Note : aucun prélèvement réalisé sur ces faces pour confirmer ces hypothèses ;

- la face La Roche, opposée aux gargouilles est protégée.

À cette exposition suivant l'orientation des faces, s'ajoute une exposition variable suivant la hauteur, les têtes de pile étant plus protégées que leurs bases. Dans l'absolu, il faudrait réaliser des prélèvements à différentes hauteurs pour circonscrire plus précisément les zones exposées.

Enfin, le paramètre principal de l'exposition est la position des gargouilles par rapport à l'axe des piles. L'illustration 27 présente, à l'échelle, la position des gargouilles par rapport à l'axe des piles (la hauteur des piles est également représentée à l'échelle). Cette illustration se base sur les données de l'IDP de 2021 et il est possible que toutes les gargouilles ne soient pas représentées sur les relevés de désordres, les gargouilles ne constituant pas un désordre en soi. Dans l'objectif de tenter de circonscrire la pollution, cela permet de se faire une première idée des piles les plus exposées et peut servir de base dans la planification d'éventuelles mesures complémentaires.

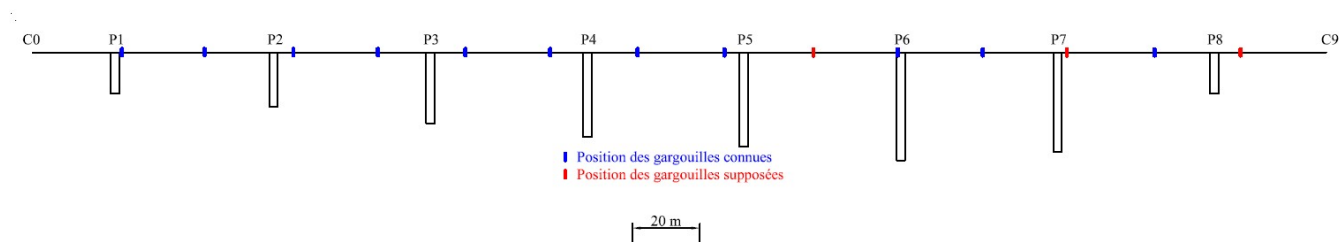


Illustration 27: Position des gargouilles par rapport aux piles en se basant sur les relevés de désordres de l'IDP : en rouge, les gargouilles supposées mais absentes des relevés.

À la vue de ce qui précède et du nombre de paramètres en jeu, il est très difficile d'extrapoler les résultats de teneurs en chlorures (4 profils réalisés sur les piles) à l'ensemble des piles. Il faudrait certainement prévoir une campagne supplémentaire pour mieux cerner les expositions des piles.

Le tableau et les graphes ci-après présentent les résultats des teneurs en chlorure.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment ⁽ⁱ⁾				
Zone	Emplacement	Teneur maximale en Cl ⁻ libres	Teneur en Cl ⁻ libres au niveau des armatures ⁽ⁱⁱ⁾	Front de chlorures (mm) ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Cl-P-1	base pile P5 face Charolles	0,843	0,56	33
Cl-P-2	tête pile P5 face Charolles	0,126	0,03	0
Cl-P-4	base pile P5 face La Roche	0,048	0,03	0
Cl-P-3	base pile P4 face Charolles	0,312	0,06 ^(iv)	0

⁽ⁱ⁾ : la teneur en Cl⁻ libres est donnée en fonction de la masse de ciment. Le seuil critique est alors de 0,4 %.

⁽ⁱⁱ⁾ : le niveau des armatures correspond à l'enrobage caractéristique e_{95} du premier lit d'armatures des piles calculée sur l'ensemble des zones auscultées (cf paragraphe sur les épaisseurs d'enrobage).

⁽ⁱⁱⁱ⁾ : profondeur à partir de laquelle le taux de chlorures passe sous le seuil critique de 0,4 % (si ce taux ne dépasse jamais les 0,4 %, alors le front est de 0 mm, ce qui ne signifie pas forcément l'absence de chlorures dans l'échantillon).

^(iv) : attention, le taux remonte ainsi à 0,18 % par rapport à la masse de ciment le centimètre suivant (soit entre le 3^e et le 4^e cm).

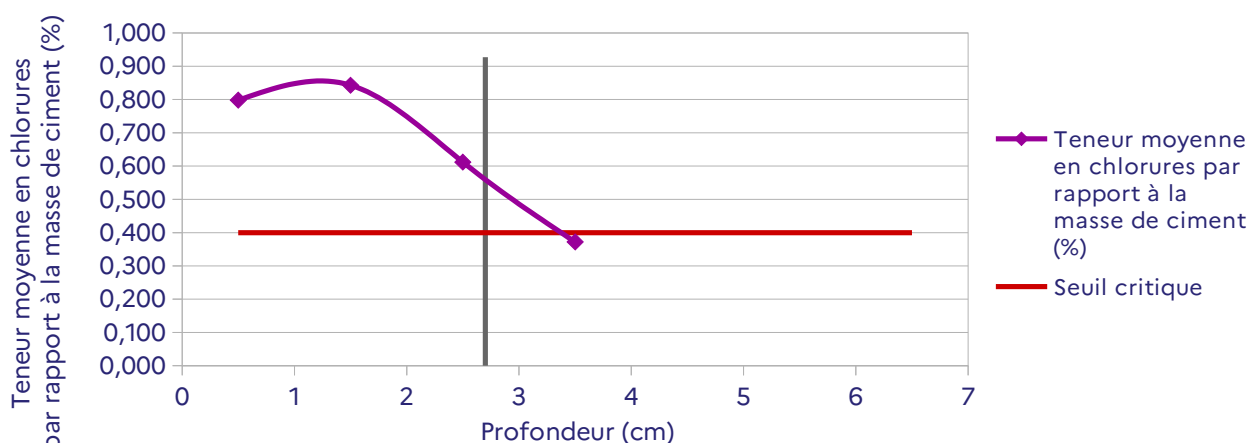


Illustration 28: Profil de teneur en chlorures à la base de la pile P5 face Charolles.

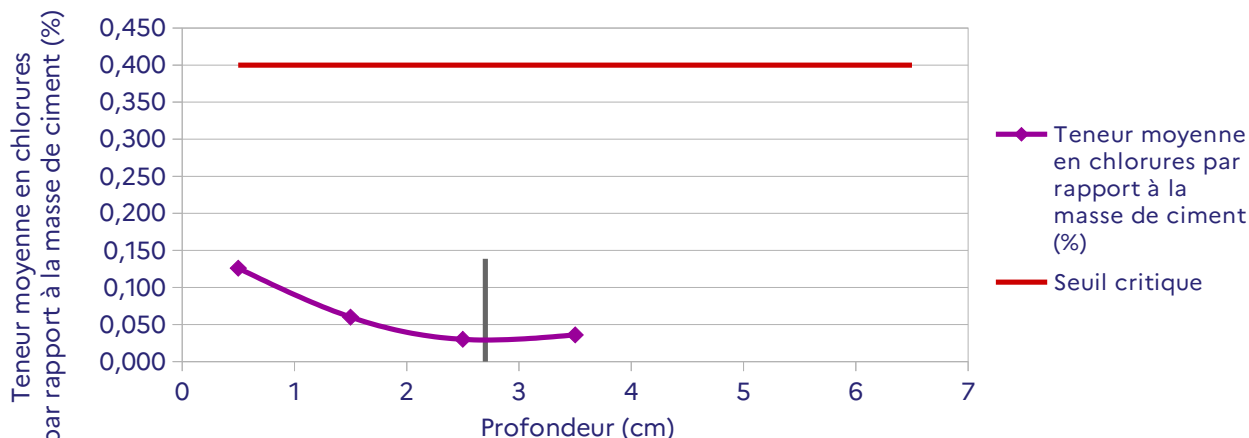


Illustration 29: Profil de teneur en chlorures en tête de la pile P5 face Charolles.

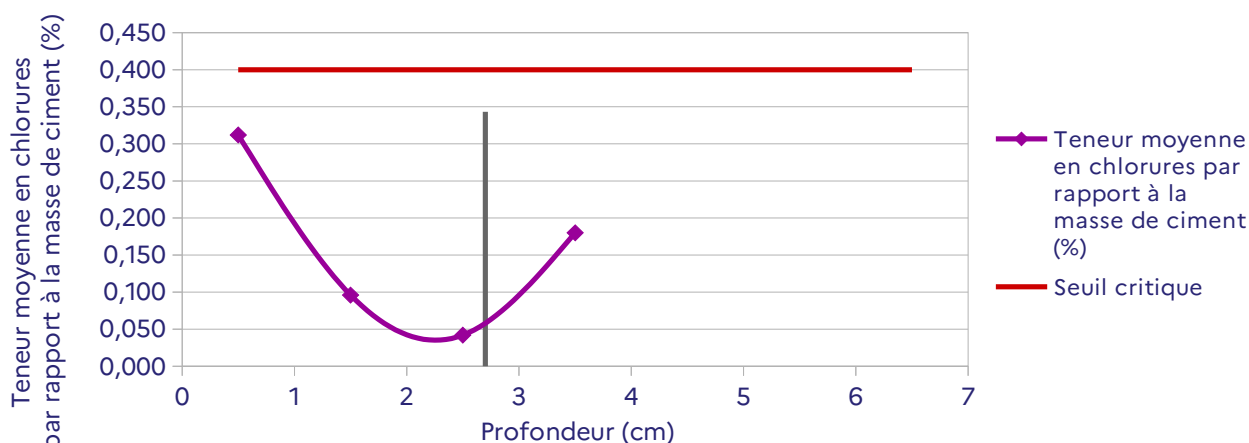


Illustration 30: Profil de teneur en chlorures à la base de la pile P4 face Charolles.

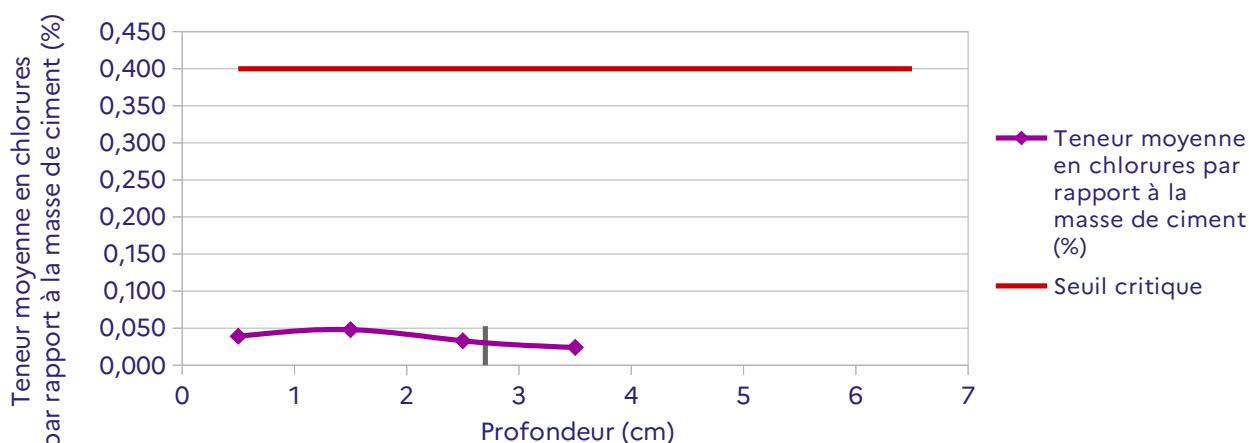


Illustration 31: Profil de teneur en chlorure à la base de la pile P5 face La Roche.

3.4. Épaisseurs d'enrobages

Le mode opératoire de la mesure de la profondeur d'enrobage des armatures du béton est décrit dans la Fiche B2-1 : « Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Les estimations sont obtenues en combinant les résultats du Ferroskan® et du radar.

Les armatures concernées par les estimations sont les armatures les plus proches du parement, soient les armatures horizontales.

Pour avoir une idée plus juste de l'épaisseur d'enrobage moyen des piles, les estimations ont été réalisées sur plusieurs piles. Les zones concernées sont (les estimations sont réalisées sur les parties avec parement lisse) :

- base pile P5 face Charolles,
- pile P5 face Charolles sur toute la hauteur (un profil radar – illustration 32),
- tête pile P5 face Charolles – illustration 33,
- base pile P5 face La Roche,
- base pile P4 face Charolles,
- pile P4 face Charolles sur toute la hauteur (un profil radar),
- base pile P2 face Charolles.



Illustration 32: Pile P5 face Charolles : estimation des enrobages en pied (zone entourée) sur toute la hauteur (flèche).



Illustration 33: Pile P5 face Charolles : estimation des enrobages en tête de pile (zone entourée).

Les estimations d'enrobages sont présentées sous forme de tableau et sous format graphique ci-après.

Enrobages des armatures horizontales sur les piles (mm)						
Position de la zone étudiée	Moy.	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb val.
base pile P5 face Charolles	31	6	25	5	46	150
pile P5 face Charolles (toute la hauteur)	36	9	26	20	66	87
tête pile P5 face Charolles	45	9	36	24	55	24
base pile P5 face La Roche	27	5	22	20	35	13
base pile P4 face Charolles	31	5	27	23	39	23
pile P4 face Charolles (toute la hauteur)	38	7	31	24	56	84
base pile P2 face Charolles	35	3	32	29	42	64
CUMULÉ	35	8	27	5	66	445

- Enrobage caractéristique calculé e_{95} (moyenne - écart-type) : 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} (dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne)

Viaduc de la Roche : estimation d'enrobages sur les piles

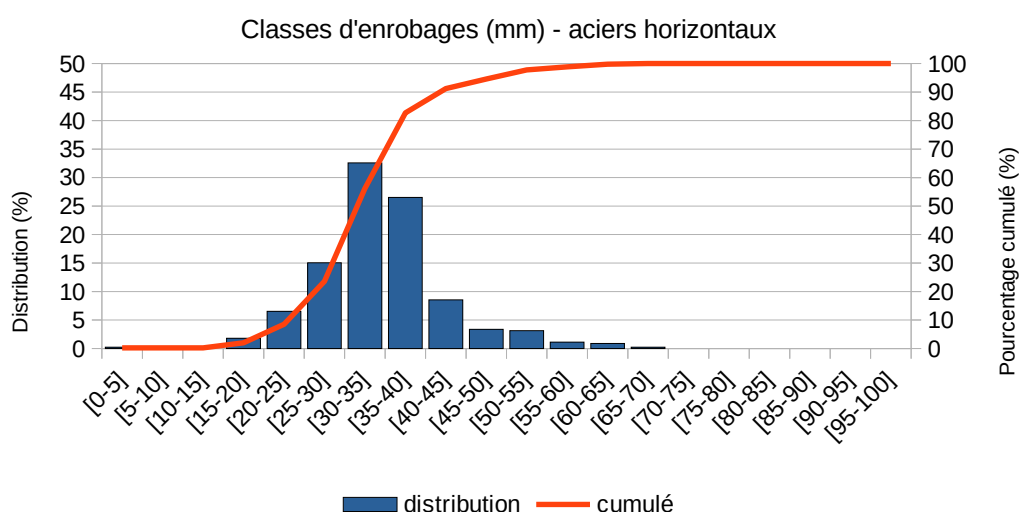
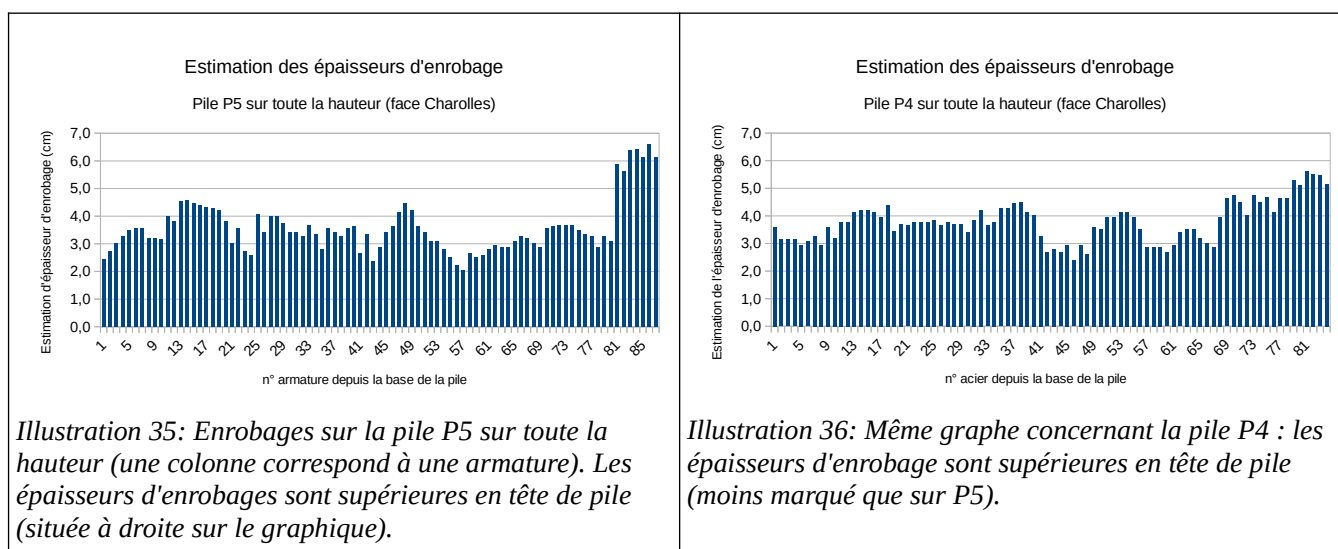


Illustration 34: Distribution des épaisseurs d'enrobages sur les piles.

Note : d'après les plans fournis par la DIR CE, les diamètres des armatures verticales est de 14 mm, ce qui ferait un enrobage caractéristique e_{95} de 41 mm pour les armatures verticales.

L'épaisseur d'enrobage caractéristique calculé e_{95} pour les armatures horizontales sur les piles est de 27 mm. Sur les zones étudiées, l'épaisseur d'enrobage est systématiquement supérieure en tête de pile (cf tableau précédent et illustrations 35 et 36). Excepté en tête de pile, les épaisseurs d'enrobages sont relativement homogènes.

Sur l'ensemble des estimations réalisées (445 valeurs), 2 % estimations sont inférieures à 20 mm et 8,5 % sont inférieures à 25 mm.



3.5. Mesures électrochimiques et ouvertures de fenêtres

Le mode opératoire de la mesure de potentiel d'électrode est décrit dans la Fiche B2-4 : « Mesure du potentiel d'électrode (Cu/CuSO₄) (selon la norme ASTM C-876-91) » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Les mesures électrochimiques ont été menées sur deux zones situées à la base de la pile P5 :

- sur la face côté Charolles, dans un environnement pollué par les chlorures (front de chlorures supérieur à l'enrobage caractéristique e_{95}),
- sur la face côté La Roche, dans un environnement où les armatures sont dans un état de passivation (fronts de chlorures et de carbonatation inférieurs à l'enrobage caractéristique e_{95}).

3.5.1. Mesures de potentiels réalisées à la base de P5 face Charolles :

La zone étudiée fait environ 3,20 m de long pour 1,80 m de haut et comprend 16 armatures verticales (numérotées de 1 à 16, les armatures n°5 et n°10 étant situées dans les angles) et 5 armatures horizontales (nommées de A à F).

Des désordres tels des fers apparents, zones sonnant le creux ou fissures sont visibles sur cette partie. L'illustration 37 (également présenté en **annexe B**) et les photos ci-après décrivent la zone concernée par les mesures électrochimiques.

Face côté Moulins

Pile P5 - Face Moulins

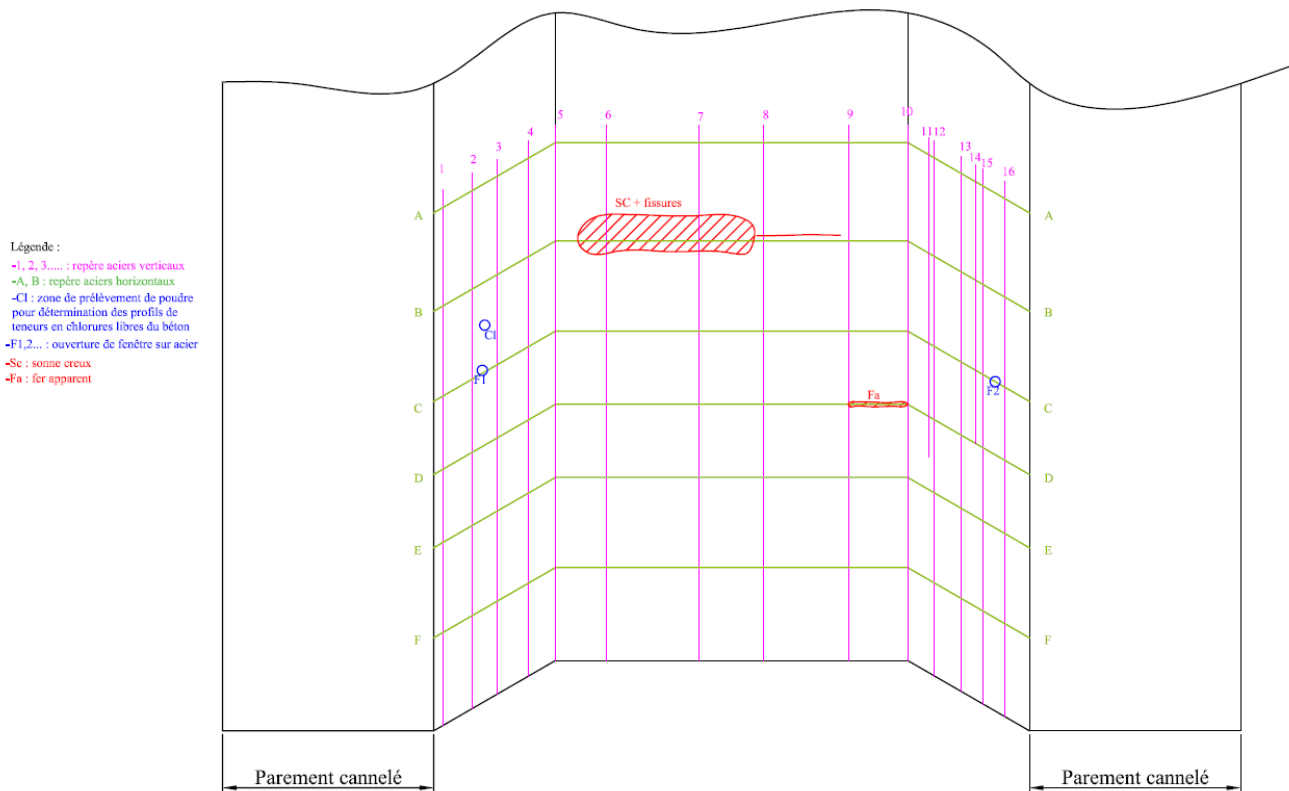


Illustration 37: Schéma de la zone auscultée avec le repérage des armatures et les désordres sur la base de la pile P5 face Charolles (la direction indiquée par Charolles ou Moulins est identique).



Illustration 38: Vue sur la base de la pile P5 face Charolles.



Illustration 39: Zoom sur les deux tiers côté La Roche de la zone étudiée.

Mesures de résistivité électrique du béton :

Les mesures de résistivité sont prises dans les mailles du ferrailage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

L'appareil utilisé est le Resipod® de la société Proceq.

résistivité électrique du béton d'enrobage (kΩ.cm)														
Valeur moyenne des mesures réalisées en étoile dans chaque maille (kΩ.cm)														
	entre 1 et 2	entre 2 et 3	entre 3 et 4	entre 4 et 5	entre 5 et 6	entre 6 et 7	entre 7 et 8	entre 8 et 9	entre 9 et 10	entre 10 et 11	entre 11 et 12	entre 12 et 13	entre 13 et 14	entre 14 et 15
avant A														
entre A et B	31	33	39	44	38	50	57	60	84	87	107	95	89	97
entre B et C	38	29	46	44	47	46	49	72	53	89	83	110	97	83
entre C et D	45	41	42	46	40	41	51	57	75	97	116	130	123	152
entre D et E	56	47	62	58	82	63	55	83	88	110		127	142	39
entre E et F	59	58	48	45	50	88	61	67	77	64		78	76	44
entre F et G	55	42	45	43	46	56	50	42	45	47		58	47	52

A titre indicatif, la proportion de mesures de résistivité dans les différentes classes de risque de corrosion proposées par la recommandation RILEM TC154 pour béton CEM I est proposée ci-après.

Résistivité électrique (kΩ.cm)*	Risque de corrosion*	Pourcentage de mesures
$Re \geq 100$	Négligeable	11%
$50 \leq Re < 100$	Faible	52%
$10 \leq Re < 50$	Modéré	37%
$Re < 10$	Elevé	0%

(*) : Classement et valeur seuils établis à 20°C pour un béton CEM I (RILEM TC154 – Résistivité, Tab2)

Ces mesures semblent indiquer que les armatures se trouvent dans un béton globalement modérément à faiblement propice au développement de la corrosion.

Potentiels d'armatures :

Les mesures de potentiels sont obtenues avec le Profometer® de Proceq. Les mesures sont réalisées au droit des armatures avec un pas de 10 cm.

Les tableaux suivants présentent les résultats des mesures de potentiels sur les armatures verticales et horizontales. Pour chaque orientation d'armatures, sont présentés un tableau donnant les résultats des potentiels et un autre tableau présentant les gradients entre deux mesures consécutives sur une même armature.

Armatures horizontales :

Pour une meilleure lisibilité, les tableaux ont été divisés en deux parties.

Base de la pile P5 face Charolles - armatures horizontales (POTENTIELS mV)

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
A	-156	-161	-202	-297	-372	-361	-355	-264	-285	-305	-320	-302	-280	-286	-257	-258
B	-326	-310	-338	-306	-293	-308	-261	-283	-295	-267	-281	-316	-242	-272	-318	-328
C	-342	-303	-357	-315	-313	-300	-275	-308	-314	-287	-195	-239	-263	-319	-247	-197
D	-345	-356	-354	-327	-297	-338	-346	-385	-373	-307	-338	-351	-377	-342	-356	-336
E	-229	-344	-367	-330	-255	-311	-326	-327	-343	-320	-332	-306	-327	-356	-321	-304
F	-331	-343	-353	-291	-329	-349	-330	-311	-302	-317	-369	-359	-371	-370	-373	-375

Base de la pile P5 face Charolles - armatures horizontales (POTENTIELS mV) — suite

	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
A	-246	-231	-234	-227	-240	-183	-119	-88	-64	-97	-94	-79	-96	-105	-143	-172
B	-288	-231	-230	-207	-239	-176	-140	-108	-93	-84	-86	-91	-87	-92	-139	-191
C	-181	-235	-261	-145	-188	-168	-172	-92	-96	-101	-110	-110	-125	-141	-222	-288
D	-300	-329	-306	-264	-189	-245	-199	-135	-130	-110	-122	-126	-144	-173	-273	-361
E	-335	-348	-322	-317	-278	-303	-241	-209	-231	-215	-205	-229	-248	-333	-389	-438
F	-380	-370	-376	-376	-382	-380	-323	-305	-308	-310	-364	-335	-363	-372	-390	-413

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentiels d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	24%
-200 à -350	Moyenne	58%
< -350	Forte	18%

Base de la pile P5 face Charolles – armatures horizontales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
A		0,5	4,1	9,5	7,5	1,1	0,6	9,1	2,1	2	1,5	1,8	2,2	0,6	2,9	0,1
B		1,6	2,8	3,2	1,3	1,5	4,7	2,2	1,2	2,8	1,4	3,5	7,4	3	4,6	1
C		3,9	5,4	4,2	0,2	1,3	2,5	3,3	0,6	2,7	9,2	4,4	2,4	5,6	7,2	5
D		1,1	0,2	2,7	3	4,1	0,8	3,9	1,2	6,6	3,1	1,3	2,6	3,5	1,4	2
E		11,5	2,3	3,7	7,5	5,6	1,5	0,1	1,6	2,3	1,2	2,6	2,1	2,9	3,5	1,7
F		1,2	1	6,2	3,8	2	1,9	1,9	0,9	1,5	5,2	1	1,2	0,1	0,3	0,2

Base de la pile P5 face Charolles – armatures horizontales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm) — suite

	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
A	1,2	1,5	0,3	0,7	1,3	5,7	6,4	3,1	2,4	3,3	0,3	1,5	1,7	0,9	3,8	2,9
B	4	5,7	0,1	2,3	3,2	6,3	3,6	3,2	1,5	0,9	0,2	0,5	0,4	0,5	4,7	5,2
C	1,6	5,4	2,6	11,6	4,3	2	0,4	8	0,4	0,5	0,9	0	1,5	1,6	8,1	6,6
D	3,6	2,9	2,3	4,2	7,5	5,6	4,6	6,4	0,5	2	1,2	0,4	1,8	2,9	10	8,8
E	3,1	1,3	2,6	0,5	3,9	2,5	6,2	3,2	2,2	1,6	1	2,4	1,9	8,5	5,6	4,9
F	0,5	1	0,6	0	0,6	0,2	5,7	1,8	0,3	0,2	5,4	2,9	2,8	0,9	1,8	2,3

Des gradients localisés supérieurs à 8-10 mV/cm peuvent être l'indication de zones anodiques et donc de présence de corrosion.

Les potentiels sont dans l'ensemble très électronégatifs, en particulier sur les deux tiers côté La Roche de la zone étudiée (le côté La Roche correspond à la gauche des tableaux ci-dessus). Cette partie est la plus directement exposée aux venues d'eau en provenance de la gargouille de la travée T5).

L'étude des gradients montre des zones possiblement anodiques (zones localement plus électronégatives mises en évidence par des gradients élevés). On relève une assez bonne corrélation entre les positions de ces zones anodiques et les désordres déjà relevés. Cependant, le nombre de zones possiblement anodiques est plus élevé que les désordres visibles à ce jour sur le parement.

Les mesures électrochimiques suggèrent que la corrosion s'est déjà initiée dans la zone étudiée.

Armatures verticales :

Base de la pile P5 face Charolles - armatures verticales (POTENTIELS mV)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	-147	-175	-338	-239		-297	-257	-213	-203		-53	-78	-68	-96	-131	-162
10	-243	-218	-274	-275		-282	-251	-228	-227		-69	-67	-74	-91	-145	-165
20	-291	-258	-271	-271		-296	-323	-203	-221		-74	-72	-71	-88	-124	-176
30	-337	-298	-278	-275		-327	-289	-247	-219		-80	-82	-88	-98	-145	-219
40	-368	-295	-216	-286		-264	-232	-220	-238		-83	-88	-98	-106	-150	-242
50	-315	-310	-264	-287		-199	-96	-207	-188		-73	-83	-121	-121	-153	-255
60	-316	-251	-256	-275		-261	-207	-220	-142		-92	-101	-102	-130	-197	-316
70	-344	-319	-309	-332		-262	-226	-207	-163		-99	-89	-112	-134	-212	-353
80	-344	-324	-321	-370		-347	-323	-313	-205		-97	-104	-114	-146	-233	-373
90	-344	-330	-296	-343		-320	-329	-312	-183		-106	-109	-119	-174	-295	-386
100	-219	-336	-260	-291		-294	-285	-276	-262		**	-169	-197	**	-257	-343
110	-318	-359	-252	-316		-310	-245	-314	-259		**	-221	-244	**	-410	-476
120	-356	-337	-287	-319		-325	-298	-341	-298		**	-279	-314	**	-391	-436
130	-329	-331	-284	-303		-292	-352	-346	-328		**	-308	-340	**	-390	-422
140	-355	-343	-320	-343		-350	-367	-325	-370		**	-371	-376	**	-396	-418
150	-374	-360	-349	-370		-390	-391	-359	-385		**	-391	-398	**	-427	-352

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentails d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	28%
-200 à -350	Moyenne	57%
< -350	Forte	15%

Base de la pile P5 face Charolles – armatures verticales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0																
10	9,6	4,3	6,4	3,6		1,5	0,6	1,5	2,4		1,6	1,1	0,6	0,5	1,4	0,3
20	4,8	4	0,3	0,4		1,4	7,2	2,5	0,6		0,5	0,5	0,3	0,3	2,1	1,1
30	4,6	4	0,7	0,4		3,1	3,4	4,4	0,2		0,6	1	1,7	1	2,1	4,3
40	3,1	0,3	6,2	1,1		6,3	5,7	2,7	1,9		0,3	0,6	1	0,8	0,5	2,3
50	5,3	1,5	4,8	0,1		6,5	13,6	1,3	5		1	0,5	2,3	1,5	0,3	1,3
60	0,1	5,9	0,8	1,2		6,2	11,1	1,3	4,6		1,9	1,8	1,9	0,9	4,4	6,1
70	2,8	6,8	5,3	5,7		0,1	1,9	1,3	2,1		0,7	1,2	1	0,4	1,5	3,7
80	0	0,5	1,2	3,8		8,5	9,7	10,6	4,2		0,2	1,5	0,2	1,2	2,1	2
90	0	0,6	2,5	2,7		2,7	0,6	0,1	2,2		0,9	0,5	0,5	2,8	6,2	1,3
100	12,5	0,6	3,6	5,2		2,6	4,4	3,6	7,9			6	7,8		3,8	4,3
110	9,9	2,3	0,8	2,5		1,6	4	3,8	0,3			5,2	4,7		15,3	13,3
120	3,8	2,2	3,5	0,3		1,5	5,3	2,7	3,9			5,8	7		1,9	4
130	2,7	0,6	0,3	1,6		3,3	5,4	0,5	3			2,9	2,6		0,1	1,4
140	2,6	1,2	3,6	4		5,8	1,5	2,1	4,2			6,3	3,6		0,6	0,4
150	1,9	1,7	2,9	2,7		4	2,4	3,4	1,5			2	2,2		3,1	6,6

Les résultats sont analogues à ceux obtenus sur les armatures horizontales, avec des potentiels électronégatifs en particulier dans les deux tiers côté La Roche et des gradients localement élevés, signe de possibles zones anodiques.

Les mesures électrochimiques suggèrent que le risque de corrosion concerne également les armatures verticales.

Aux mesures électrochimiques, deux petites fenêtres (F1 et F2, se reporter à l'illustration 37 pour l'implantation) ont été ouvertes sur l'armature horizontale C dans le but de caler les mesures d'épaisseur d'enrobage :

- fenêtre F1 : épaisseur d'enrobage de 27 mm et **aucune trace de corrosion** – illustration 40. Les mesures électrochimiques ne montrent pas de risque de corrosion dans l'environnement immédiat de cette fenêtre : armature C à 40 cm de l'origine de la zone de mesures ;
- fenêtre F2 : épaisseur d'enrobage de 36 mm et **aucune trace de corrosion** – illustration 41. Les mesures électrochimiques montrent un faible risque de corrosion [gradient de l'ordre de 8 mV/cm] dans l'environnement immédiat de F2 : à 305 cm de l'origine de la zone de mesures.



Illustration 40: Fenêtre F1 : pas de corrosion (zone de recouvrement d'armatures).



Illustration 41: Fenêtre F2 : absence de corrosion.

3.5.2. Mesures de potentiels réalisées à la base de P5 face La Roche :

Conformément au logigramme de la procédure d'auscultation D1-1 du Cahier Interactif (cf **annexe D**), les témoins de durabilité ne montrant pas de risque de corrosion pour cette partie d'ouvrage, les mesures électrochimiques réalisées ne sont pas exploitées dans le corps de ce rapport. Elles sont présentées en **annexe E**.

La zone étudiée fait 125 cm de long pour 180 cm de haut et comprends 8 armatures verticales (numérotées de 1 à 8) et 6 armatures horizontales (armatures A à F). Sur les armatures verticales, 3 correspondent à des zones de recouvrement : les armatures n°3, 5 et 7 (cf illustration 42 ci-contre).

Aucun désordre n'a été relevé sur cette zone et les armatures les plus proches du parement sont les armatures horizontales.

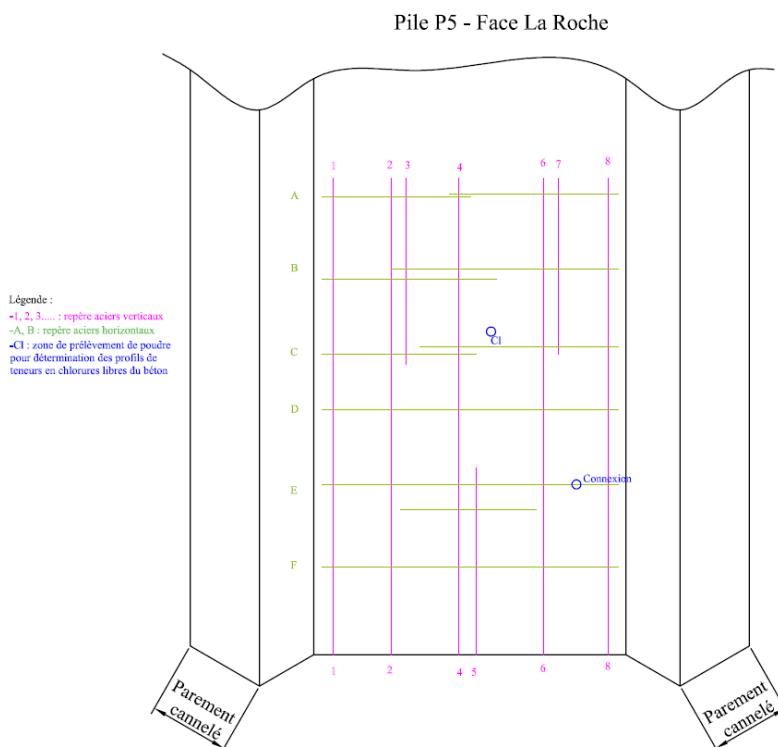


Illustration 42: Schéma de la zone auscultée avec repérage des armatures sur la base de la pile P5 face La Roche.



Illustration 43: Base pile P5 face La Roche : vue sur la zone auscultée et repérage des armatures.

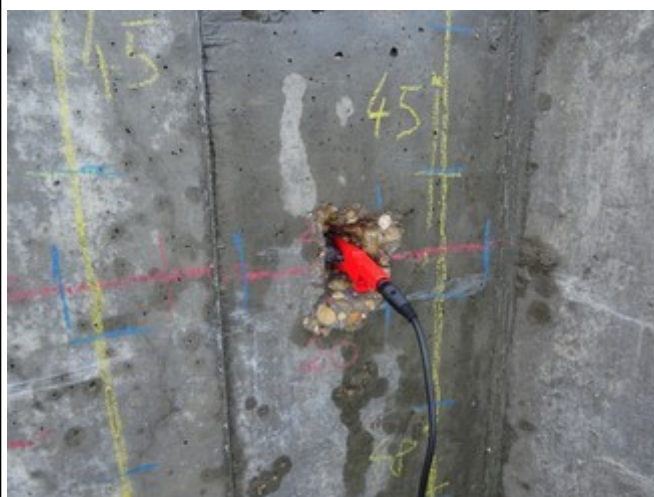


Illustration 44: Zoom photo précédente sur la fenêtre pour la connexion électrique aux armatures.

3.6. Récapitulatif : piles

Les investigations sur les piles du viaduc de La Roche mettent en évidence :

- un front de carbonatation situé en moyenne à 14 mm (variations comprises entre 12 et 16 mm sur 3 carottes) ;
- une pollution par les chlorures en provenance des gargouilles situées sous l'encorbellement côté TGV très disparate suivant notamment les orientations des faces des piles et la position des gargouilles par rapport aux piles. Sur les 4 prélèvements effectués, le front de chlorures varie de 0 à 33 mm ;
- des épaisseurs d'enrobage dans l'ensemble conformes aux 30 mm théoriques : moyenne des épaisseurs d'enrobage estimées de 35 mm pour un enrobage caractéristique calculé e_{95} de 27 mm (sur 445 valeurs, 2 % des estimations sont inférieures à 20 mm et 8,5 % sont inférieures à 25 mm) ;
- des mesures électrochimiques réalisées à la base de la pile P5 face Charolles (zone polluée par les chlorures) qui suggèrent une corrosion déjà initiée même si l'ouverture de deux petites fenêtres n'a pas mis en évidence de traces de corrosion.

Note : ces fenêtres n'étaient pas situées au droit de zones à risque de corrosion identifiées par les mesures de potentiels ; ouvertures réalisées avant l'enregistrement et l'exploitation des mesures de potentiels.

Le risque de corrosion des armatures internes au béton sur les piles du viaduc de La Roche dépend de la pollution par les chlorures ayant pour origine les gargouilles situées sous l'encorbellement côté TGV de l'ouvrage. Pour chaque pile, toutes les faces ne sont pas exposées de la même façon à ce risque et sur les 4 prélèvements réalisés en 2021, les résultats vont de l'absence de pollution (CI-P-4) à un front de chlorures situé à une profondeur de 33 mm (CI-P-1). Il est ainsi très difficile d'extrapoler les résultats obtenus à l'ensemble des 8 piles de l'ouvrage. L'exposition à la pollution par les chlorures dépend de :

- la position des gargouilles par rapport à l'axe des piles,
- l'orientation des faces (les faces côté La Roche semblent protégées),
- la position « en altitude » dans les piles, les têtes de pile étant moins exposées (la limite au-dessus de laquelle, sur une face donnée, le béton est moins exposé n'a pas de raison d'être identique d'une pile à l'autre...),
- probablement des vents dominants (ouest).

Pour tenter de mieux cerner les zones polluées par les chlorures, des prélèvements complémentaires sont à prévoir. Afin d'aider à l'implantation de ces prélèvements, un plan avec les positions des gargouilles et les hauteurs des piles est présentée en **annexe F** (et illustration 27).

Note : ce plan est basé sur les relevés des désordres de l'inspection détaillée de 2021 et devra être vérifié (il est possible que les gargouilles ne soient pas toutes reportées lors des inspections car elles ne constituent pas un désordre en tant que tel).

En se référant au guide LCPC « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » de décembre 2002 (cf annexe D) on se retrouve, en fonction de l'exposition aux chlorures dans un des trois cas suivant :

- cas I « aucune protection nécessaire sauf à titre préventif »,
- cas II « Ralentir la pénétration des chlorures supplémentaires... »,
- cas III « Diminuer le taux de chlorures par une technique d'extraction adaptée »

Vis-à-vis du risque apporté par la carbonatation du béton (front situé à 14 mm), les piles de l'ouvrage possèdent une marge satisfaisante et aucune protection n'est à envisager sauf à titre préventif.

Connaissant l'âge de l'ouvrage (36-37 ans) et les témoins de durabilité à cet âge, il est possible d'estimer une durée de vie résiduelle vis-à-vis de la carbonatation (cette notion pour la pollution par les chlorures n'est pas pertinente dans le cas des piles car cette pollution est trop disparate). Cette notion de durée de

vie résiduelle est une **approximation** à interpréter avec précaution et à utiliser comme une indication utile dans la planification de travaux de protection comme de réparation.

Le tableau ci-dessus présente cette durée de vie résiduelle avec l'estimation globale des épaisseurs d'enrobages (ensemble des piles concernées) et avec l'estimation calculée sur les deux zones les plus défavorables (se reporter au § 3.4 sur l'estimation des épaisseurs d'enrobage).

Ainsi, en se plaçant dans le cas le plus défavorable (base de la pile P5 face La Roche où les épaisseurs d'enrobage estimées ont été les plus faibles), la durée de vie résiduelle peut être estimée à une cinquantaine d'années ; elle est de presque 100 ans si on prend l'estimation des épaisseurs d'enrobages obtenue sur l'ensemble des zones étudiées.

	Enrobage e_{95} (mm)	Front de carbonatation (mm)	Estimation de la durée de vie résiduelle en années (*)
ensemble des valeurs (piles P5, P4 et P2)	27	14	~ 100
base pile P5 face Charolles	25	14	~ 80
base pile P5 face La Roche	22	14	~ 50

(*) : durée de vie résiduelle basée sur l'hypothèse simplifiée que le front de carbonatation évolue suivant une loi en $\sqrt{t}$.

4. Diagnostic du caisson

4.1. Description des zones auscultées

Note : pour se repérer, les travées sont numérotées de T1 à T9 dans le sens Charolles → Mâcon.

Les zones étudiées sont réparties sur l'intrados du hourdis, les âmes, les encorbellements et l'intérieur du caisson.

Ne pouvant carotter avec notre matériel les parements situés en intrados (hourdis, encorbellement), les prélèvements pour mesurer la profondeur du front de carbonatation ont été réalisés sur les âmes du caisson (3 zones prélèvements à l'extérieur et 1 zone à l'intérieur). Il ne devrait pas y avoir de variations significatives du front de carbonatation entre les âmes, le hourdis et les encorbellements car toutes ces parties ont été coulées avec la même formule de béton et sont situées dans des environnements comparables.

Le tableau ci-dessus récapitule les différentes zones étudiées avec les prélèvements effectués.

Zone étudiée	Enrobages	Profondeur carbonatation	Profil de teneurs en chlorures	Mesures électrochimiques
Intrados du hourdis (travée T2)	oui	non	oui	oui
Âmes	oui (T4-T5)	oui (T2-T4-T6)	oui (T5-T6)	oui (T5)
Encorbellements (travée T4)	oui	non	oui	oui
Intérieur du caisson (travée T1)	non	oui	non	non

4.2. Profondeur de carbonatation

4.2.1. Extérieur du caisson

Le mode opératoire de la mesure de profondeur de carbonatation est décrit dans la Fiche B2-2 : « Mesure de la profondeur de carbonatation » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Cette mesure est faite sur des cassures fraîches des carottes prélevées sur site à l'aide d'un indicateur coloré, la phénolphthaléine (cet indicateur est rose sur le béton non carbonaté $\text{pH} > 9$ et incolore sur le béton carbonaté $\text{pH} < 9$).

Les carottes ont été prélevées sur les âmes du caisson. Leurs positions sont décrites dans le tableau ci-après. Chaque prélèvement a été doublé : deux carottes prélevées en faisant pivoter le carottier sur lui-même (carottes espacées entre elles d'environ 20 cm – illustration 46).

Carotte	Emplacement
Ca-4	âme côté TGV sur travée T2 : ~ 18 m de la pile P1 et ~ 180 cm de la base de l'âme
Ca-5	âme côté TGV sur travée T4 : ~ 20 de la pile P4 et ~ 200 cm de la base de l'âme
Ca-6	âme côté La Roche sur travée T6 : ~ 11 m de la pile P6 et ~ 195 cm de la base de l'âme



Illustration 45: Vue sur carottage sur l'âme (travée T4).



Illustration 46: Zoom photo précédente avec la position de deux carottes (prélèvement doublé).

Les valeurs obtenues sont homogènes avec une profondeur de carbonatation de l'ordre de 10 mm pour chacune des trois zones de prélèvement.

La profondeur du front de carbonatation est prise comme la moyenne des 3 prélèvements arrondie au millimètre supérieur, ainsi, pour l'extérieur du caisson **la profondeur moyenne de carbonatation retenue est estimée à 10 mm.**

Le tableau et les photos ci-après illustrent les résultats obtenus.

Prélèvement	Emplacement	1 ^{re} carotte (mm)	2 ^e carotte (mm)	Moyenne (mm)
Ca-4	travée T2	10,3	10,5	10,4
Ca-5	travée T4	10,6	7,0	8,8
Ca-6	travée T6	11,0	10,6	10,8
Moyenne des carottes :				10,0



Illustration 47: Prélèvement Ca-4 : vue sur la 1^e carotte.



Illustration 48: Prélèvement Ca-4 : vue sur la 2^e carotte.



Illustration 49: Prélèvement Ca-5 : vue sur la 1^e carotte.



Illustration 50: Prélèvement Ca-5 : vue sur la 2^e carotte.



Illustration 51: Prélèvement Ca-6 : vue sur la 1^e carotte.



Illustration 52: Prélèvement Ca-6 : vue sur la 2^e carotte.

4.2.2. Intérieur du caisson

Le prélèvement Ca-7 à l'intérieur du caisson a été réalisé sur l'âme côté TGV à environ mi-travée de T1. Ce prélèvement a été doublé (deux carottes distantes d'environ 20 cm).

La profondeur moyenne de carbonatation retenue est de **17 mm**. Cette valeur est sensiblement plus élevée que celle retenue pour l'extérieur du caisson. Cette différence peut en partie s'expliquer par le fait que le béton est plus sec à l'intérieur du caisson, un béton sec favorisant la pénétration du gaz carbonique à l'intérieur du béton.

Le tableau et les photos ci-après illustrent les résultats obtenus.

Prélèvement	Emplacement	1 ^{re} carotte (mm)	2 ^e carotte (mm)	Moyenne (mm)
Ca-7	travée T1 (intérieur caisson)	18	15	16,5



Illustration 53: Prélèvement Ca-7 : vue sur la 1^{re} carotte.



Illustration 54: Prélèvement Ca-7 : vue sur la 2^e carotte.

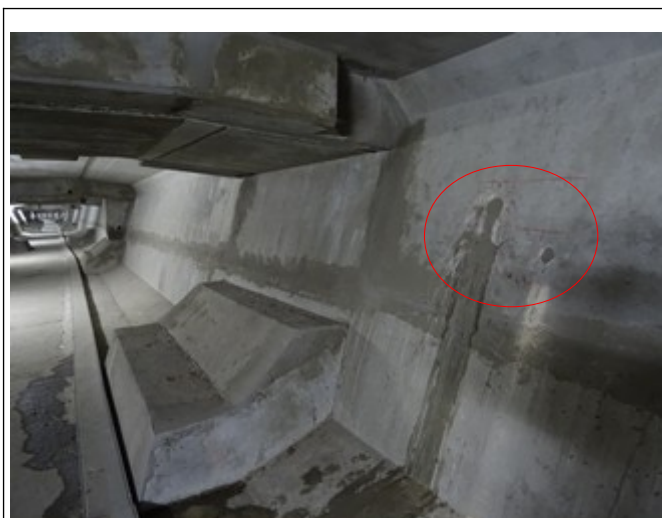


Illustration 55: Vue sur la zone de prélèvement à l'intérieur du caisson.



Illustration 56: Zoom photo précédente après rebouchage au mortier de ciment.

4.3. Profils de teneur en chlorures

Le mode opératoire de la mesure de la teneur en chlorures est décrit dans la Fiche B2-3 : « Prélèvements de poudre de béton pour mesure de la teneur en agents agressifs » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Les PV des profils de teneur en chlorures libres sont présentés en **annexe C**.

Rappel : le seuil critique de chlorures retenu est de 0,4 % par rapport à la masse de ciment.

4.3.1. Intrados du hourdis inférieur

Deux prélèvements ont été réalisés sur la travée T2 :

- Cl-H-1 : en partie courante de la travée dans une zone saine et situé à 9,5 m de l'axe de la pile P1 et 1,7 m de l'extrémité côté La Roche du hourdis ;
- Cl-H-2 : au droit d'une trace d'écoulement en provenance d'une gargouille à ~ 18 m de l'axe de la pile P2 et 16 cm de l'extrémité côté TGV du hourdis. Ce prélèvement est inclus dans la zone ayant servi aux mesures électrochimiques (maille constituée par les armatures n°4-5 et A-B).

Les teneurs en chlorures varient fortement suivant ces deux prélèvements :

- absence de pollution par les chlorures sur Cl-H-1,
- très forte pollution, jusqu'à 6 fois supérieure au seuil critique de 0,4 % par rapport à la masse de ciment sur les 3 premiers centimètres. Sur ce prélèvement, **le front de chlorures peut être estimé à 56 mm**.

Le tableau et les graphes ci-après présentent les résultats des teneurs en chlorure.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment ⁽ⁱ⁾				
Zone	Emplacement	Teneur maximale en Cl ⁻ libres	Teneur en Cl ⁻ libres au niveau des armatures ⁽ⁱⁱ⁾	Front de chlorures (mm) ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Cl-H-1	travée T2 : zone saine	0,069	0,03	0
Cl-H-2	travée T2 : trace d'écoulement	2,400	2,36	56

⁽ⁱ⁾ : la teneur en Cl⁻ libres est donnée en fonction de la masse de ciment. Le seuil critique est alors de 0,4 %.

⁽ⁱⁱ⁾ : le niveau des armatures correspond à l'enrobage caractéristique e_{95} du premier lit d'armatures (cf paragraphe sur les épaisseurs d'enrobage).

⁽ⁱⁱⁱ⁾ : profondeur à partir de laquelle le taux de chlorures passe sous le seuil critique de 0,4 % (si ce taux ne dépasse jamais les 0,4 %, alors le front est de 0 mm, ce qui ne correspond pas forcément à une absence de chlorures dans l'échantillon).

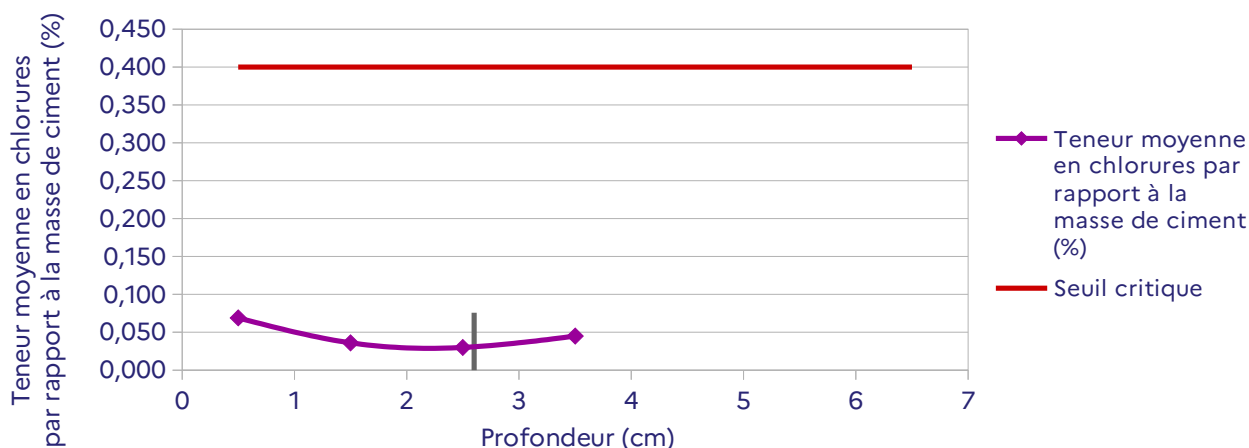


Illustration 57: Profil de teneur en chlorures sur l'intrados du hourdis (zone saine).

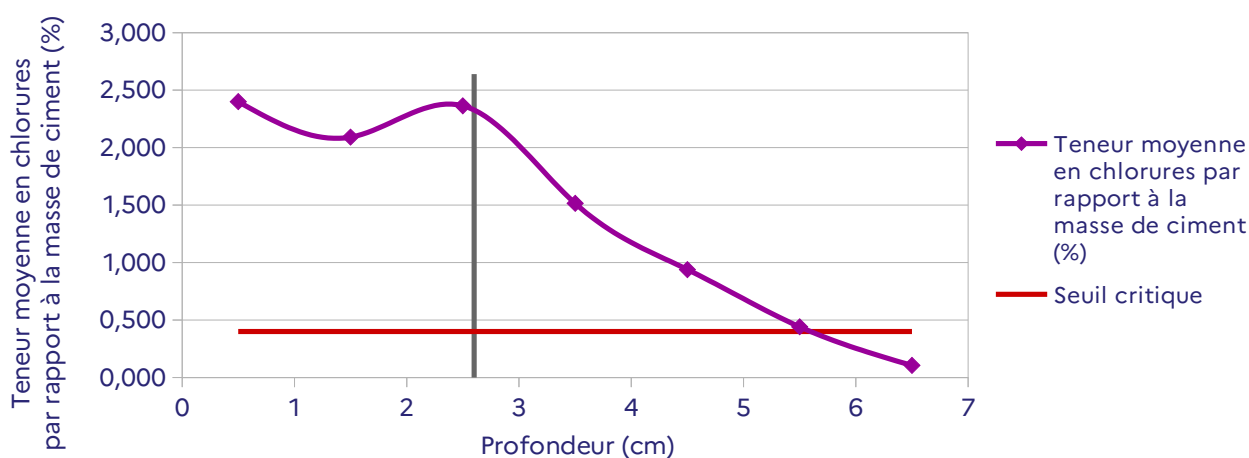


Illustration 58: Profil de teneur en chlorures sur l'intrados du hourdis (zone avec traces d'écoulement).

Le prélèvement de poudre fait ressortir une **délamination du béton sur approximativement le premier centimètre** (cf illustrations 59 et 60). Ce même phénomène a été observé sur le béton de certaines faces des piles lors du prélèvement de carottes pour des essais au microscope électronique à balayage (cf § 6).



Illustration 59: Vue sur le prélèvement Cl-H-2 sur le hourdis.



Illustration 60: Zoom photo précédente : délamination du béton sur approximativement le 1^{er} cm.

4.3.2. Âmes

Trois prélèvements pour déterminer les profils de teneurs en chlorures ont été réalisés sur les âmes :

- Cl-A-1 : en partie courante de l'âme côté TGV sur la travée T4 et représentant une zone saine. Il est situé à ~ 23 m de la pile P4 et à 1,95 m de la base de l'âme ;
- Cl-A-2 : au droit d'une trace d'écoulement en provenance d'une gargouille à ~ 25,7 m de la pile P4 et 1,95 m de la base de l'âme côté TGV. Ce prélèvement est inclus dans la zone ayant servi aux mesures électrochimiques ;
- Cl-A-3 : en partie courante de l'âme côté La Roche sur la travée T6 et représentant une zone saine. Il est situé à ~ 9 m de la pile P6 et en partie supérieure de l'âme (à la liaison avec l'encorbellement).

Les teneurs en chlorures varient fortement suivant ces trois prélèvements :

- absence de pollution par les chlorures sur Cl-A-1 et Cl-A-3,
- forte pollution largement supérieure au seuil critique de 0,4 % par rapport à la masse de ciment. sur les 2 premiers centimètres sur le prélèvement Cl-A-2. Sur ce prélèvement, **le front de chlorures peut être estimé à 28 mm.**

Le tableau et les graphes ci-après présentent les résultats des teneurs en chlorure.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment ⁽ⁱ⁾				
Zone	Emplacement	Teneur maximale en Cl ⁻ libres	Teneur en Cl ⁻ libres au niveau des armatures ⁽ⁱⁱ⁾	Front de chlorures (mm) ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Cl-A-1	travée T4 : zone saine	0,081	0,03	0
Cl-A-2	travée T4 : trace d'écoulement	0,690	0,35	28
Cl-A-3	travée T6 : zone saine	0,069	0,03	0

⁽ⁱ⁾ : la teneur en Cl- libres est donnée en fonction de la masse de ciment. Le seuil critique est alors de 0,4 %.

⁽ⁱⁱ⁾ : le niveau des armatures correspond à l'enrobage caractéristique e_{95} du premier lit d'armatures (cf paragraphe sur les épaisseurs d'enrobage).

⁽ⁱⁱⁱ⁾ : profondeur à partir de laquelle le taux de chlorures passe sous le seuil critique de 0,4 % (si ce taux ne dépasse jamais les 0,4 %, alors le front est de 0 mm, ce qui ne correspond pas forcément à une absence de chlorures dans l'échantillon).

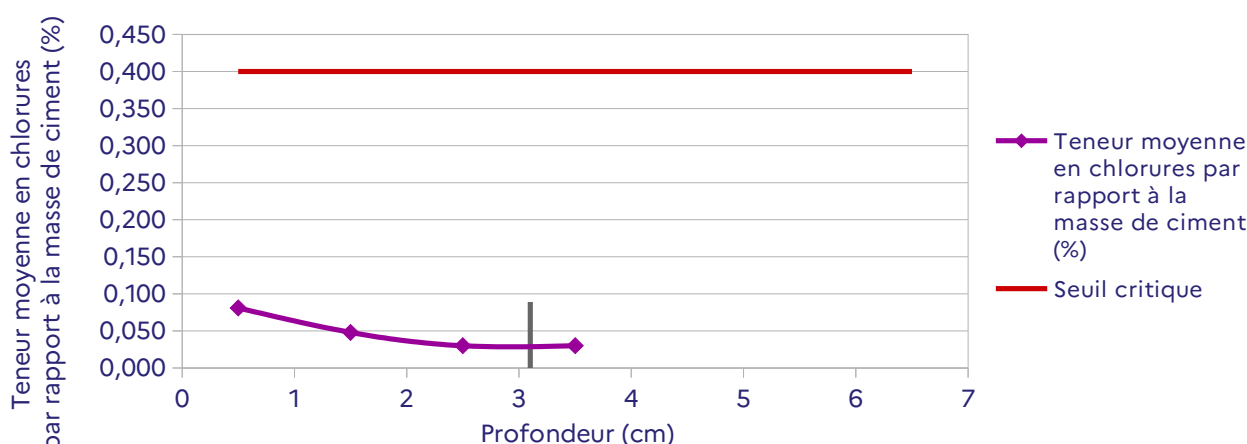


Illustration 61: Profil de teneur en chlorures sur les âmes (zone saine travée T4).

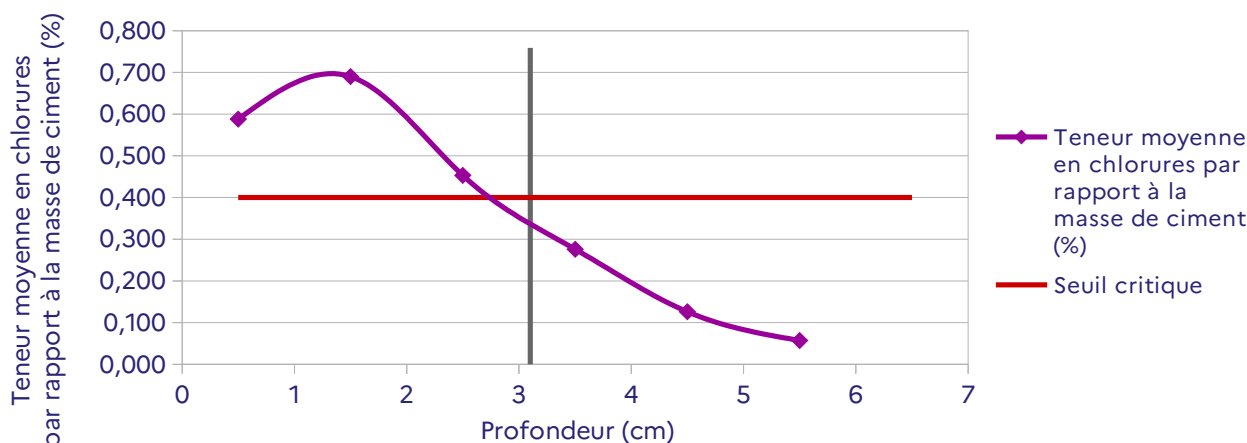


Illustration 62: Profil de teneur en chlorures sur les âmes (au droit d'une trace d'écoulement).

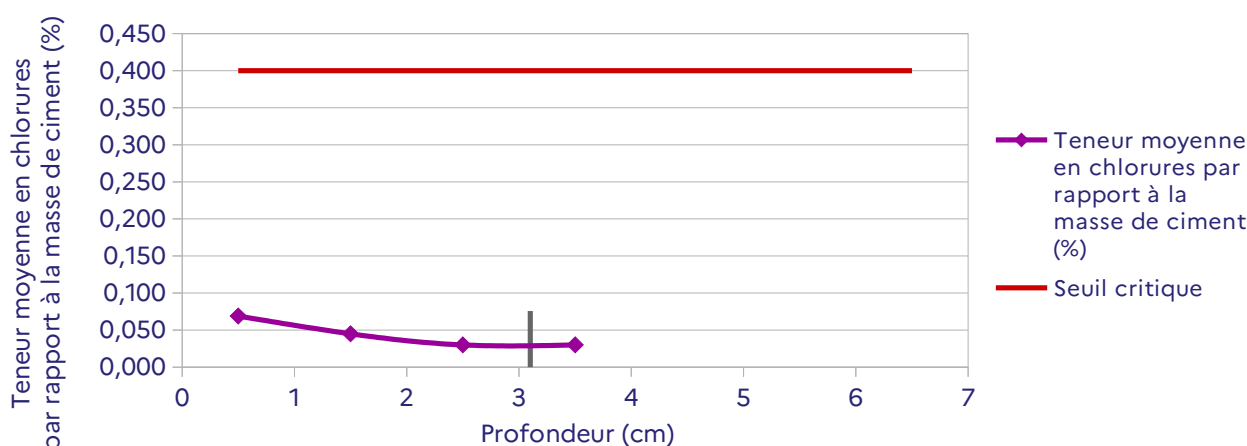


Illustration 63: Profil de teneur en chlorures sur les âmes (zone saine travée T6).

4.3.3. Encorbellements

Un prélèvement pour déterminer les profils de teneurs en chlorures a été réalisé sur les encorbellements :

- Cl-E-1 : travée T4, au droit d'une trace d'écoulement en provenance d'une gargouille sur l'encorbellement côté TGV (illustrations 65 et 66). Prélèvement au cœur de la zone retenue pour les mesures électrochimiques (maille entre les armatures n°3-4 et E-F).

Les teneurs en chlorures sont très importantes, jusqu'à 3 fois le seuil de 0,4 % par rapport à la masse de ciment. **Le front de chlorures peut être estimé à 49 mm.**

Le tableau et les graphes ci-après présentent les résultats des teneurs en chlorure.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment ⁽ⁱ⁾				
Zone	Emplacement	Teneur maximale en Cl ⁻ libres	Teneur en Cl ⁻ libres au niveau des armatures ⁽ⁱⁱ⁾	Front de chlorures (mm) ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Cl-E-1	travée T4 : trace d'écoulement	1,197	1,04	49

⁽ⁱ⁾ : la teneur en Cl⁻ libres est donnée en fonction de la masse de ciment. Le seuil critique est alors de 0,4 %.

⁽ⁱⁱ⁾ : le niveau des armatures correspond à l'enrobage caractéristique e_{95} du premier lit d'armatures (cf paragraphe sur les épaisseurs d'enrobage).

⁽ⁱⁱⁱ⁾ : profondeur à partir de laquelle le taux de chlorures passe sous le seuil critique de 0,4 % (si ce taux ne dépasse jamais les 0,4 %, alors le front est de 0 mm).

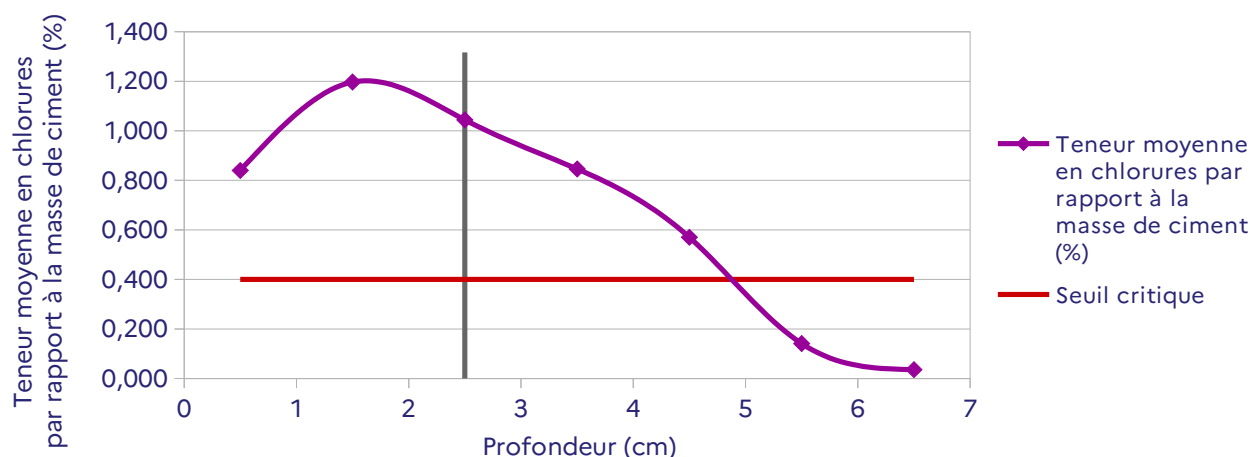


Illustration 64: Profil de teneur en chlorures sur l'encorbellement (au droit d'une trace d'écoulements).

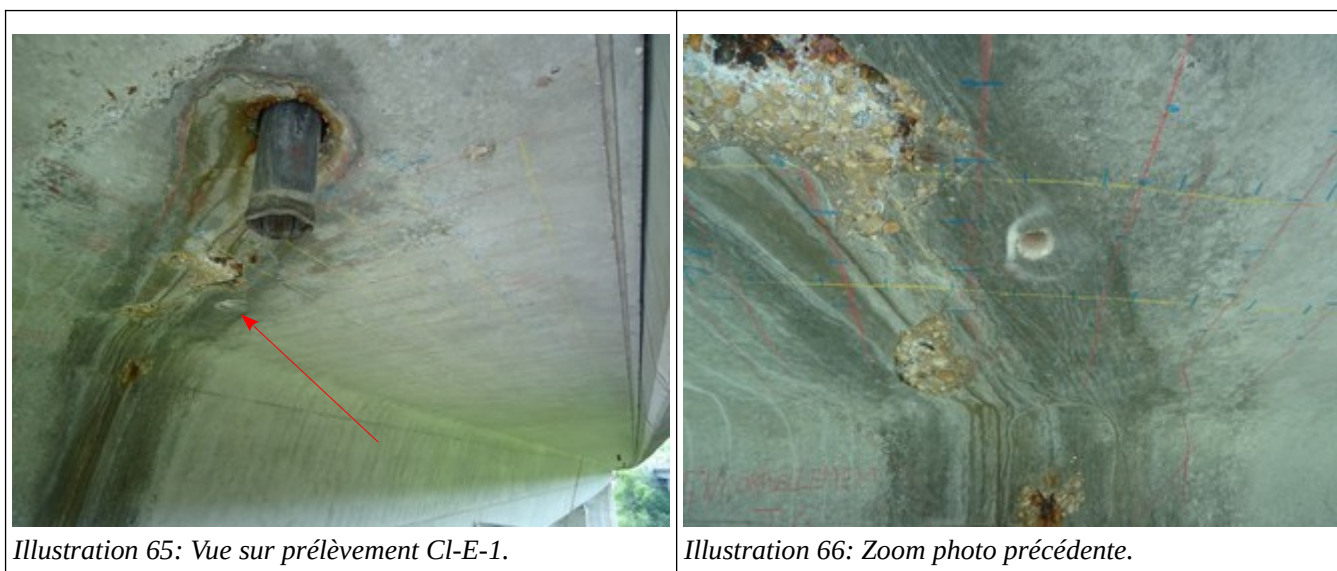


Illustration 65: Vue sur prélèvement Cl-E-1.

Illustration 66: Zoom photo précédente.

4.4. Épaisseurs d'enrobages

Le mode opératoire de la mesure de la profondeur d'enrobage des armatures du béton est décrit dans la Fiche B2-1 : « Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Les estimations sont obtenues en combinant les résultats du Ferroskan® et du radar.

4.4.1. Intrados du hourdis

Les armatures concernées par les estimations de profondeurs d'enrobages sont les armatures les plus proches du parement, soient les armatures transversales.

Ces estimations, pour le hourdis, ont été réalisées sur l'ensemble de la travée T2 (4 profils radar longitudinaux répartis transversalement) pour avoir une base représentative des enrobages de l'intrados du hourdis.

Des estimations d'enrobage ont également été réalisées au droit de la zone retenue pour les mesures électrochimiques (un seul profil radar longitudinal au droit de cette zone).

En moyenne les épaisseurs d'enrobages sont conformes aux 3 centimètres théoriques : moyenne de 31 mm pour un **enrobage caractéristique e_{95} calculé de 26 mm** sur l'ensemble de la travée T2. Sur l'ensemble des valeurs (805 valeurs) près de 7 % des estimations sont inférieures à 25 mm.

Les estimations d'enrobages sont présentées sous forme de tableau et sous format graphique ci-après.

Enrobages des armatures horizontales sur l'intrados du hourdis (mm)						
Position de la zone étudiée	Moy.	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb val.
Ensemble de la travée T2	31	5	26	16	57	805
Zone de mesures électrochimiques (T2)	34	2	32	31	39	18

- Enrobage caractéristique calculé e_{95} (moyenne - écart-type) : 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} (dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne)

Note : d'après les plans fournis par la DIR CE, les diamètres des armatures verticales est de 20 mm, ce qui ferait un enrobage caractéristique e_{95} de 46 mm pour les armatures longitudinales.

Viaduc de la Roche : estimation des enrobages sur l'intrados du hourdis

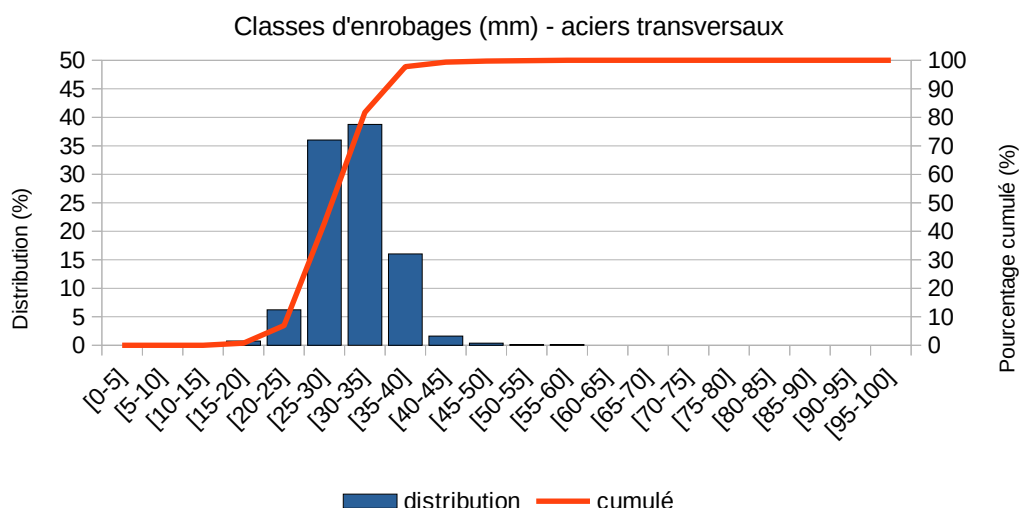


Illustration 67: Distribution des épaisseurs d'enrobages sur l'ensemble de la travée T2.

4.4.2. Âmes

Les armatures concernées par les estimations d'épaisseurs d'enrobages sont les armatures les plus proches du parement, soient les armatures transversales.

Ces estimations, pour les âmes, ont été réalisées sur l'ensemble des travées T4 et T5 (2 profils radar longitudinaux) pour avoir une base représentative des enrobages des âmes de l'ouvrage. Les mesures ont été réalisées sur l'âme côté TGV.

Des estimations d'enrobage ont également été réalisées au droit de la zone retenue pour les mesures électrochimiques : âme côté TGV sur travée T4 au droit d'une trace d'écoulements (entre 35 et 37 m depuis la pile P3).

En moyenne les épaisseurs d'enrobages sont supérieures aux 3 centimètres théoriques : moyenne de 39 mm pour un **enrobage caractéristique e_{95} calculé de 31 mm** sur l'ensemble des travées T4 et T5. Sur l'ensemble des valeurs (934 valeurs) près de 2 % des estimations sont inférieures à 25 mm et 9,5 % sont inférieures à 30 mm.

Les estimations d'enrobages sont présentées sous forme de tableau et sous format graphique ci-après.

Enrobages des armatures horizontales sur les âmes (mm)						
Position de la zone étudiée	Moy.	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb val.
Âme côté TGV – ensemble travées T4 et T5	39	8	31	12	75	934
Zone de mesures électrochimiques (T4)	36	8	28	14	47	96

- Enrobage caractéristique calculé e_{95} (moyenne - écart-type) : 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} (dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne)

Note : d'après les plans fournis par la DIR CE, les diamètres des armatures transversales est de 20 mm, ce qui ferait un enrobage caractéristique e_{95} de 51 mm pour les armatures longitudinales.

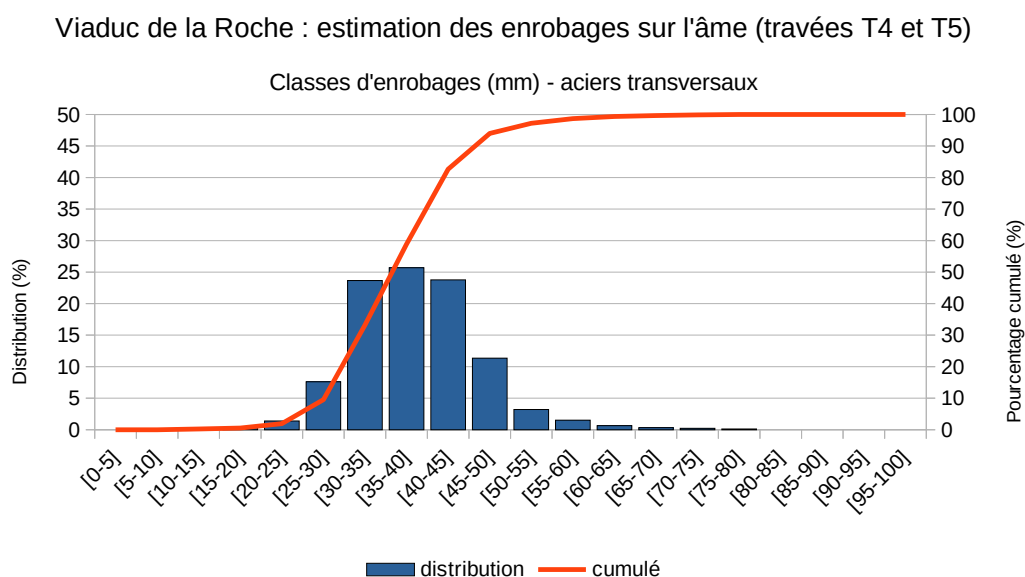


Illustration 68: Estimation des enrobages sur les âmes du viaduc de la Roche.

4.4.3. Encorbellements

Les armatures concernées par les estimations d'épaisseurs d'enrobages sont les armatures les plus proches du parement, soient les armatures transversales.

Ces estimations sur les encorbellements ont été réalisées sur l'ensemble de la travée T4 (2 profils radar longitudinaux) pour avoir une base représentative des enrobages des âmes de l'ouvrage. Les mesures ont été réalisées sur l'âme côté TGV.

Des estimations d'enrobage ont également été réalisées au droit de la zone retenue pour les mesures électrochimiques : âme côté TGV sur travée T4 au droit d'une trace d'écoulements (entre 10 et 14 m depuis la pile P3).

En moyenne les épaisseurs d'enrobages sont conformes aux 3 centimètres théoriques : moyenne de 29 mm pour un **enrobage caractéristique e_{95} calculé de 25 mm** sur l'ensemble de la travée T4. Sur l'ensemble des valeurs (454 valeurs) un peu plus de 9 % des estimations sont inférieures à 25 mm.

Les estimations d'enrobages sont présentées sous forme de tableau et sous format graphique ci-après.

Enrobages des armatures horizontales sur les encorbellements (mm)						
Position de la zone étudiée	Moy.	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb val.
Encorbellement côté TGV – ensemble travée T4	29	4	25	19	50	454
Zone de mesures électrochimiques (T4)	29	4	25	20	37	66

- Enrobage caractéristique calculé e_{95} (moyenne - écart-type) : 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} (dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne)

Note : d'après les plans fournis par la DIR CE, les diamètres des armatures transversales est de 12 mm en partie courante (14 mm dans les zones renforcées), ce qui ferait un enrobage caractéristique e_{95} de 37 mm pour les armatures longitudinales.

Viaduc de la Roche : estimation des enrobages sur l'encorbellement (travée T4)

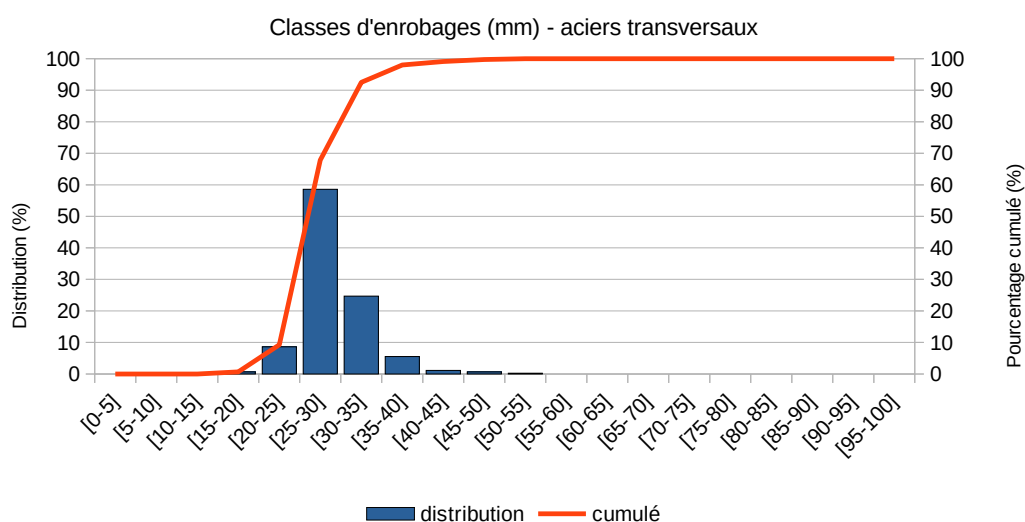


Illustration 69: Estimation des épaisseurs d'enrobage sur les encorbellements de l'ouvrage.

4.5. Mesures électrochimiques et ouvertures de fenêtres

Le mode opératoire de la mesure de potentiel d'électrode est décrit dans la Fiche B2-4 : « Mesure du potentiel d'électrode (Cu/CuSO₄) (selon la norme ASTM C-876-91) » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Les mesures électrochimiques ont été menées sur l'intrados du hourdis (travée T2), sur l'âme (travée T4) et sur l'encorbellement (travée T4). Les zones concernées comportent toutes des traces d'écoulement en provenance de gargouilles et des zones d'apparence saine. L'objectif est de déterminer si les zones de désordres sont limitées aux traces d'écoulements ou sont plus étendues.

4.5.1. Mesures de potentiels sur l'intrados du hourdis (travée T2)

La zone étudiée fait environ 2,70 m de long pour 1,30 m de large et comprend 14 armatures transversales (numérotées de 1 à 14) et 6 armatures longitudinales (nommées de A à F).

On note la présence d'un éclat sur un fer dissous par la corrosion et des traces d'écoulement en bordure du hourdis : la présence d'une engravure longitudinale a joué le rôle de goutte d'eau. L'illustration 70 et les photos ci-après (illustrations 71 et 72) décrivent la zone concernée par les mesures électrochimiques.

La zone se situe à l'extrémité côté TGV du hourdis de la travée T2 à une distance comprise entre 16 et 19 m de la pile P2. À noter la présence de câbles de précontrainte dans cette partie de l'ouvrage (câbles repérables avec le radar : 5 câbles identifiables avec le radar à 19 m de P2 et seulement 4 à 16 m de P2 en s'éloignant de la mi-travée [câble remontant dans l'âme]).

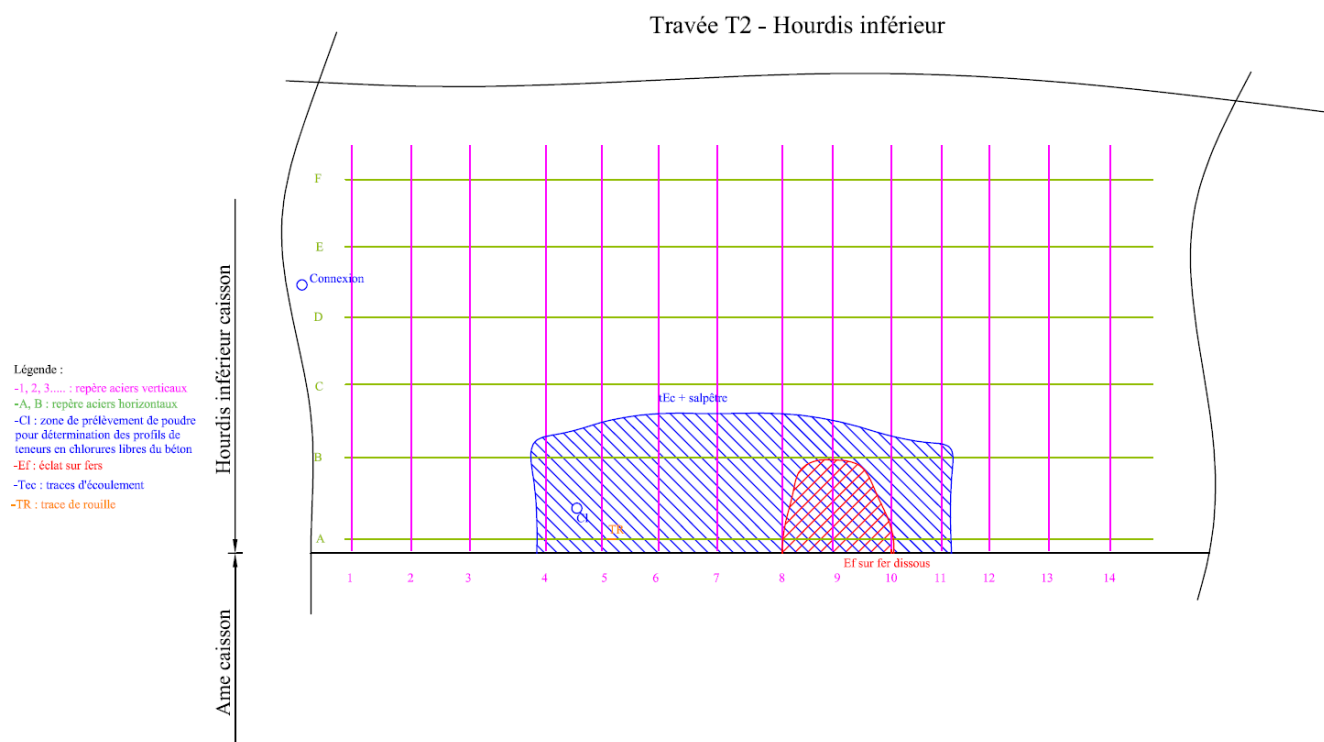


Illustration 70: Schéma de la zone auscultée sur le hourdis avec le repérage des armatures. L'armature longitudinale C est située au fond de l'engravure.



Illustration 71: Vue sur la zone de mesures électrochimiques en intrados du hourdis.



Illustration 72: Zoom photo précédente : les câbles de précontrainte sont en bleu, les armatures longitudinales en jaune et les transversales en rouge.

Mesures de résistivité électrique du béton :

Les mesures de résistivité sont prises dans les mailles du ferrailage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

L'appareil utilisé est le Resipod® de la société Proceq.

	résistivité électrique du béton d'enrobage (kΩ.cm)												
	Valeur moyenne des mesures réalisées en étoile dans chaque maille (kΩ.cm)												
	entre 1 et 2	entre 2 et 3	entre 3 et 4	entre 4 et 5	entre 5 et 6	entre 6 et 7	entre 7 et 8	entre 8 et 9	entre 9 et 10	entre 10 et 11	entre 11 et 12	entre 12 et 13	entre 13 et 14
entre E et F	324	425	312	398	333	360	442	438	385	437	332	376	412
entre D et E	348	489	394	368	313	367	389	534	365	499	460	433	401
entre C et D	425	449	470	431	451	457	409	442	406	477	425	363	410
entre B et C	234	343	318	215	198	255	109	98	145	298	323	280	371
entre A et B	327	590	56	12	14	14	32	32	40	53	204	402	355

A titre indicatif, la proportion de mesures de résistivité dans les différentes classes de risque de corrosion proposées par la recommandation RILEM TC154 pour béton CEM I est proposée ci-après.

Résistivité électrique (kΩ.cm)*	Risque de corrosion*	Pourcentage de mesures
$Re \geq 100$	Négligeable	86%
$50 \leq Re < 100$	Faible	5%
$10 \leq Re < 50$	Modéré	9%
$Re < 10$	Elevé	0%

(*) : Classement et valeur seuils établis à 20°C pour un béton CEM I (RILEM TC154 – Résistivité, Tab2)

Les résistivités en dehors des traces d'écoulements sont très élevées et sont le signe d'un béton très sec (remarque : un béton très sec a tendance à perturber les mesures électrochimiques). La zone de résistivité plus faible correspond aux traces d'écoulements ; elle est consécutive à la présence de chlorures.

Potentiels d'armatures :

Les mesures de potentiels sont obtenues avec le Profometer® de Proceq. Les mesures sont réalisées au droit des armatures avec un pas de 10 cm.

Les tableaux suivants présentent les résultats des mesures de potentiels sur les armatures transversales et longitudinales. Pour chaque orientation d'armatures, sont présentés un tableau donnant les résultats des potentiels et un autre tableau présentant les gradients entre deux mesures consécutives sur une même armature.

Armatures transversales:

Armatures les plus proches du parement.

Intrados du hourdis (T2) - armatures transversales (POTENTIELS mV)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
120	20	9	0	-2	-9	-7	-7	-14	3	-6	-3	-1	0	17
110	11	16	27	-6	-9	-6	-12	-20	3	-12	-4	0	3	18
100	2	11	11	-5	-11	-8	-17	-38	0	-14	-9	-9	-2	12
90	-2	4	7	-14	-15	-16	-28	-36	-7	-23	-16	-4	0	7
80	0	0	3	-18	-27	-29	-38	-41	-11	-28	-15	-11	-1	4
70	5	-6	-11	-27	-26	-37	-60	-61	-35	-46	-20	-21	-9	4
60	-4	-3	-20	-27	-47	-67	-82	-85	-69	-70	-37	-29	-26	0
50	-33	-25	-43	-52	-67	-117	-106	-153	-110	-99	-64	-38	-19	-1
40	-23	-39	-50	-108	-154	-247	-247	-281	-242	-159	-75	-67	-23	-12
30	-26	-42	-52	-162	-294	-333	-316	-346	-306	-266	-103	-49	-31	-18
20	-29	-35	-46	-243	-361	-391	-398	-434	-403	-352	-150	-66	-35	-19
10	-22	-36	-96	-269	-405	-457	-443	-362	**	-386	-237	-91	-27	-16
0	-2	-35	-78	-274	-411	-420	-385	-342	**	-406	-242	-138	-26	7

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentiels d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	83%
-200 à -350	Moyenne	9%
< -350	Forte	8%

Intrados du hourdis (T2) – armatures transversales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
120														
110	0,9	0,7	2,7	0,4	0	0,1	0,5	0,6	0	0,6	0,1	0,1	0,3	0,1
100	0,9	0,5	1,6	0,1	0,2	0,2	0,5	1,8	0,3	0,2	0,5	0,9	0,5	0,6
90	0,4	0,7	0,4	0,9	0,4	0,8	1,1	0,2	0,7	0,9	0,7	0,5	0,2	0,5
80	0,2	0,4	0,4	0,4	1,2	1,3	1	0,5	0,4	0,5	0,1	0,7	0,1	0,3
70	0,5	0,6	1,4	0,9	0,1	0,8	2,2	2	2,4	1,8	0,5	1	0,8	0
60	0,9	0,3	0,9	0	2,1	3	2,2	2,4	3,4	2,4	1,7	0,8	1,7	0,4
50	2,9	2,2	2,3	2,5	2	5	2,4	6,8	4,1	2,9	2,7	0,9	0,7	0,1
40	1	1,4	0,7	5,6	8,7	13	14,1	12,8	13,2	6	1,1	2,9	0,4	1,1
30	0,3	0,3	0,2	5,4	14	8,6	6,9	6,5	6,4	10,7	2,8	1,8	0,8	0,6
20	0,3	0,7	0,6	8,1	6,7	5,8	8,2	8,8	9,7	8,6	4,7	1,7	0,4	0,1
10	0,7	0,1	5	2,6	4,4	6,6	4,5	7,2		3,4	8,7	2,5	0,8	0,3
0	2	0,1	1,8	0,5	0,6	3,7	5,8	2		2	0,5	4,7	0,1	2,3

Des gradients localisés supérieurs à 8-10 mV/cm peuvent être l'indication de zones anodiques et donc de présence de corrosion.

Les potentiels sont dans l'ensemble très peu électro-négatifs, ce qui traduit un béton très sec.

Les mesures électrochimiques indiquent que le fort risque de corrosion se calque parfaitement sur les traces d'écoulements : ce sont les armatures n°4 à n°11 qui sont concernées jusqu'à l'engravure au maximum.

Armatures longitudinales :

Intrados du hourdis (T2) - armatures longitudinales (POTENTIELS mV)

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280
E	0	-15	-12	0	-10	0	3	0	-1	-17	-18	-13	-19	-14	-18	-19	-34	-31	-31	-21	-25	-20	-17	-10	-5	-8	0	1	15
D	3	-6	-14	-19	-11	-17	-17	-36	-47	-43	-49	-45	-50	-52	-53	-61	-66	-66	-60	-55	-45	-27	-22	-21	-15	-23	-19	0	2
C	9	17	-34	-37	-47	-48	-59	-67	-78	-85	-82	-96	-117	-113	-113	-119	-136	-121	-109	-118	-109	-101	-87	-80	-56	-47	-34	-27	-25
B	-21	-33	-49	-60	-57	-64	-83	-113	-212	-281	-312	-342	-357	-372	-358	-392	-386	-374	-368	-341	-331	-299	-201	-101	-67	-47	-37	-29	-23
A	6	-11	-25	-33	-61	-59	-116	-197	-234	-296	-351	-354	-396	-387	-386	-374	-350	-324	-343	-335	-370	-354	-281	-214	-155	-105	-56	-20	-2

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentiels d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	79%
-200 à -350	Moyenne	11%
< -350	Forte	10%

Intrados du hourdis (T2) – armatures longitudinales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280
E	1,5	0,3	1,2	1	1	0,3	0,3	0,1	1,6	0,1	0,5	0,6	0,5	0,4	0,1	1,5	0,3	0	1	0,4	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3	0,8	0,1	1,4
D	0,9	0,8	0,5	0,8	0,6	0	1,9	1,1	0,4	0,6	0,4	0,5	0,2	0,1	0,8	0,5	0	0,6	0,5	1	1,8	0,5	0,1	0,6	0,8	0,4	1,9	0,2
C	0,8	5,1	0,3	1	0,1	1,1	0,8	1,1	0,7	0,3	1,4	2,1	0,4	0	0,6	1,7	1,5	1,2	0,9	0,9	0,8	1,4	0,7	2,4	0,9	1,3	0,7	0,2
B	1,2	1,6	1,1	0,3	0,7	1,9	3	9,9	6,9	3,1	3	1,5	1,5	1,4	3,4	0,6	1,2	0,6	2,7	1	3,2	9,8	10	3,4	2	1	0,8	0,6
A	1,7	1,4	0,8	2,8	0,2	5,7	8,1	3,7	6,2	5,5	0,3	4,2	0,9	0,1	1,2	2,4	2,6	1,9	0,8	3,5	1,6	7,3	6,7	5,9	5	4,9	3,6	1,8

Les résultats sont analogues à ceux obtenus sur les armatures transversales, avec des potentiels globalement peu électro-négatifs. Les potentiels suggèrent un fort risque de corrosion sur les armatures A et B limité à la zone recouverte par les traces d'écoulements.

Ainsi, les mesures électrochimiques indiquent que le risque de corrosion est limité aux traces d'écoulements. Au droit de ces traces d'écoulements, la corrosion semble initiée pour les armatures transversales et longitudinales.

Note : la fenêtre réalisée pour la connexion aux armatures n'a **pas** montré de **trace de corrosion**. Elle était située dans une zone a priori saine (derrière l'engravure, cf illustration 70 pour l'implantation).



Illustration 74: Vue sur la zone auscultée sur l'âme côté TGV.



Illustration 75: Vue sur la gargouille à l'origine des traces d'écoulements.

Mesures de résistivité électrique du béton :

Les mesures de résistivité sont prises dans les mailles du ferrailage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

L'appareil utilisé est le Resipod® de la société Proceq.

	résistivité électrique du béton d'enrobage (kΩ.cm)												
	Valeur moyenne des mesures réalisées en étoile dans chaque maille (kΩ.cm)												
	entre 1 et 2	entre 2 et 3	entre 3 et 4	entre 4 et 5	entre 5 et 6	entre 6 et 7	entre 7 et 8	entre 8 et 9	entre 9 et 10	entre 10 et 11	entre 11 et 12	entre 12 et 13	entre 13 et 14
entre A et B	371	162	145	167	151	159	78	154	398	448	460	376	400
entre B et C	420	181	135	129	181	167	77	176	432	412	371	361	358
entre C et D	457	151	110	142	197	149	68	114	430	412	411	358	367
entre D et E	356	139	133	128	211	136	54	75	361	485	356	346	372
entre E et F	568	139	86	103	211	126	67	90	442	526	453	431	459
entre F et G	451	253	132	233	243	159	67	150	462	542	444	447	424
entre G et H	494	281	143	206	278	129	72	251	403	502	437	407	371
entre H et I	514	294	126	148	293	134	69	229	424	478	402	325	363
entre I et J	413	150	102	133	131	109	54	41	70	93	104	126	163

A titre indicatif, la proportion de mesures de résistivité dans les différentes classes de risque de corrosion proposées par la recommandation RILEM TC154 pour béton CEM I est proposée ci-après.

Résistivité électrique (kΩ.cm)*	Risque de corrosion*	Pourcentage de mesures
$Re \geq 100$	Négligeable	87%
$50 \leq Re < 100$	Faible	12%
$10 \leq Re < 50$	Modéré	1%
$Re < 10$	Elevé	0%

(*) : Classement et valeur seuils établis à 20°C pour un béton CEM I (RILEM TC154 – Résistivité, Tab2)

Les résistivités sont globalement très élevées et sont le signe d'un béton très sec (remarque : un béton très sec a tendance à perturber les mesures électrochimiques). Les résistivités sont plus faibles, mais dans l'absolu toujours élevées, au droit des traces d'écoulements. De manière un peu contre-intuitive, les résistivités les plus faibles ne sont pas au cœur des traces d'écoulements mais au niveau de leur bordure côté Mâcon.

Potentiels d'armatures :

Les mesures de potentiels sont obtenues avec le Profometer® de Proceq. Les mesures sont réalisées au droit des armatures avec un pas de 10 cm.

Les tableaux suivants présentent les résultats des mesures de potentiels sur les armatures transversales et longitudinales. Pour chaque orientation d'armatures, sont présentés un tableau donnant les résultats des potentiels et un autre tableau présentant les gradients entre deux mesures consécutives sur une même armature.

Armatures transversales:

Armatures les plus proches du parement.

Âme côté TGV (T4) - armatures transversales (POTENTIELS mV)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	-47	-122	-252	-273	-240	-262	-177	-12	-3	-1	17	10	15
10	-7	-60	-119	-253	-283	-255	-269	-166	-17	-14	-9	25	10	7
20	-2	-47	-121	-252	-277	-271	-291	-163	-23	-13	-12	15	5	6
30	-6	-51	-126	-246	-280	-268	-295	-165	-33	0	-6	20	5	0
40	-6	-53	-124	-237	-281	-281	-271	-170	-46	-2	-14	1	17	3
50	-9	-59	-120	-240	-279	-287	-255	-174	-71	-10	-20	-3	0	-1
60	-21	-58	-117	-235	-285	-287	-290	-179	-97	-13	-18	-4	0	-10
70	-79	-76	-124	-218	-307	-295	-310	-180	-140	-30	-32	-23	-24	-23
80	-47	-82	-141	-246	-313	-303	-303	-218	-157	-71	-97	-79	-65	-44
90	-27	-53	-140	-263	-302	-298	-319	-191	-146	-47	-64	-47	-40	-35
100	-8	-50	-147	-268	-308	-300	-327	-198	-123	-44	-39	-29	-20	-36
110	-17	-44	-144	-290	-311	-309	-326	-196	-97	-46	-39	-26	-28	-36
120	-17	-47	-140	-268	-325	-316	-333	-201	-84	-40	-42	-36	-40	-47
130	-24	-53	-138	-274	-330	-324	-341	-208	-87	-53	-48	-43	-47	-44
140	-15	-66	-152	-267	-344	-337	-349	-221	-103	-63	-54	-45	-36	-50
150	-20	-73	-163	-292	-364	-353	-369	-238	-105	-79	-73	-55	-50	-47
160	-24	-86	-182	-287	-375	-369	-387	-268	-128	-93	-85	-64	-54	-55
170	-20	-130	-204	-334	-395	-379	-415	-325	-142	-149	-124	-106	-79	-88
180	-15	-225	-245	-353	-434	-411	-465	-409	-386	-309	-253	-239	-155	-212
190	-18	-260	-313	-391	-482	-457	-503	-488	-464	-348	-290	-268	-240	-233
200	-26	**	-371	-452	-497	-483	-532	-555	-517	-360	-293	-270	-246	**

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentiels d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	60%
-200 à -350	Moyenne	30%
< -350	Forte	10%

Âme côté TGV (T4) – armatures transversales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	0,7	1,3	0,3	0,1	1	1,5	0,7	1,1	0,5	1,1	0,8	0,8	0	0,8
20	0,5	1,3	0,2	0,1	0,6	1,6	2,2	0,3	0,6	0,1	0,3	1	0,5	0,1
30	0,4	0,4	0,5	0,6	0,3	0,3	0,4	0,2	1	1,3	0,6	0,5	0	0,6
40	0	0,2	0,2	0,9	0,1	1,3	2,4	0,5	1,3	0,2	0,8	1,9	1,2	0,3
50	0,3	0,6	0,4	0,3	0,2	0,6	1,6	0,4	2,5	0,8	0,6	0,4	1,7	0,4
60	1,2	0,1	0,3	0,5	0,6	0	3,5	0,5	2,6	0,3	0,2	0,1	0	0,9
70	5,8	1,8	0,7	1,7	2,2	0,8	2	0,1	4,3	1,7	1,4	1,9	2,4	1,3
80	3,2	0,6	1,7	2,8	0,6	0,8	0,7	3,8	1,7	4,1	6,5	5,6	4,1	2,1
90	2	2,9	0,1	1,7	1,1	0,5	1,6	2,7	1,1	2,4	3,3	3,2	2,5	0,9
100	1,9	0,3	0,7	0,5	0,6	0,2	0,8	0,7	2,3	0,3	2,5	1,8	2	0,1
110	0,9	0,6	0,3	2,2	0,3	0,9	0,1	0,2	2,6	0,2	0	0,3	0,8	0
120	0	0,3	0,4	2,2	1,4	0,7	0,7	0,5	1,3	0,6	0,3	1	1,2	1,1
130	0,7	0,6	0,2	0,6	0,5	0,8	0,8	0,7	0,3	1,3	0,6	0,7	0,7	0,3
140	0,9	1,3	1,4	0,7	1,4	1,3	0,8	1,3	1,6	1	0,6	0,2	1,1	0,6
150	0,5	0,7	1,1	2,5	2	1,6	2	1,7	0,2	1,6	1,9	1	1,4	0,3
160	0,4	1,3	1,9	0,5	1,1	1,6	1,8	3	2,3	1,4	1,2	0,9	0,4	0,8
170	0,4	4,4	2,2	4,7	2	1	2,8	5,7	1,4	5,6	3,9	4,2	2,5	3,3
180	0,5	9,5	4,1	1,9	3,9	3,2	5	8,4	24,4	16	12,9	13,3	7,6	12,4
190	0,3	3,5	6,8	3,8	4,8	4,6	3,8	7,9	7,8	3,9	3,7	2,9	8,5	2,1
200	0,8		5,8	6,1	1,5	2,6	2,9	6,7	5,3	1,2	0,3	0,2	0,6	

Des gradients localisés supérieurs à 8-10 mV/cm peuvent être l'indication de zones anodiques et donc de présence de corrosion.

Les potentiels sont dans l'ensemble assez peu électro-négatifs, ce qui traduit un béton très sec.

Les mesures électrochimiques indiquent un fort risque de corrosion qui se calque parfaitement sur les traces d'écoulements : armatures n°4 à n°7 sur toutes leurs hauteurs et toutes les armatures, exceptée la n°1, en partie inférieure (sur une trentaine de centimètres).

Armatures longitudinales :

Âme côté TGV (T4) - armatures longitudinales (POTENTIELS mV)

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
A	3	-3	-90	-115	-163	-230	-264	-298	-295	-286	-271	-308	-245	-161	-145	-53	-13	-20	-15	-17	-13	-12	-14	-17	-22	-26	-16	-4
B	-18	-34	-90	-114	-159	-233	-279	-274	-279	-282	-318	-276	-161	-151	-74	-36	-34	-23	-20	-23	-24	-13	-14	-15	-17	-15	-15	**
C	-13	-35	-90	-117	-148	-224	-284	-291	-293	-298	-292	-310	-246	-159	-89	-36	-30	-23	-29	-23	-26	-20	-14	-9	-2	-9	-6	**
D	-46	-55	-94	-122	-149	-203	-282	-287	-291	-305	-288	-308	-232	-175	-170	-147	-68	-44	-30	-28	-30	-30	-22	-29	-37	-31	-29	**
E	-41	-72	-112	-134	-176	-226	-286	-287	-293	-296	-298	-318	-319	-223	-184	-158	-101	-72	-64	-81	-77	-64	-63	-55	-56	-52	-46	-40
F	-7	-23	-73	-129	-159	-232	-292	-295	-306	-310	-305	-335	-265	-183	-175	-143	-70	-46	-46	-45	-32	-29	-19	-18	-26	-34	-34	-10
G	-15	-22	-61	-120	-161	-251	-297	-316	-326	-325	-313	-356	-295	-206	-196	-117	-66	-54	-50	-53	-40	-56	-45	-41	-36	-35	-37	-11
H	-33	-48	-83	-139	-191	-269	-332	-330	-342	-347	-353	-373	-302	-232	-213	-134	-81	-72	-78	-75	-72	-64	-62	-58	-56	-51	-49	-34
I	-39	-68	-116	-199	-248	-313	-388	-391	-401	-404	-418	-456	-424	-342	-349	-342	-312	-253	-213	-173	-154	-142	-146	-116	-97	-82	-61	-51
J	-67	-181	-280	-339	-387	-442	-493	-481	-497	-499	-527	-549	-556	-525	-540	-502	-463	-402	-340	-295	-271	-263	-256	-243	-231	-229	-222	-224

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés à titre indicatif et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentels d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	61%
-200 à -350	Moyenne	30%
< -350	Forte	9%

Âme côté TGV (T4) – armatures longitudinales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
A	0,6	8,7	2,5	4,8	6,7	3,4	3,4	0,3	0,9	1,5	3,7	6,3	8,4	1,6	9,2	4	0,7	0,5	0,2	0,4	0,1	0,2	0,3	0,5	0,4	1	1,2
B	1,6	5,6	2,4	4,5	7,4	4,6	0,5	0,5	0,3	3,6	4,2	11,5	1	7,7	3,8	0,2	1,1	0,3	0,3	0,1	1,1	0,1	0,1	0,2	0	0,2	
C	2,2	5,5	2,7	3,1	7,6	6	0,7	0,2	0,5	0,6	1,8	6,4	8,7	7	5,3	0,6	0,7	0,6	0,6	0,3	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7	0,3	
D	0,9	3,9	2,8	2,7	5,4	7,9	0,5	0,4	1,4	1,7	2	7,6	5,7	0,5	2,3	7,9	2,4	1,4	0,2	0,2	0	0,8	0,7	0,8	0,6	0,2	
E	3,1	4	2,2	4,2	5	6	0,1	0,6	0,3	0,2	2	0,1	9,6	3,9	2,6	5,7	2,9	0,8	1,7	0,4	1,3	0,1	0,8	0,1	0,4	0,6	0,6
F	1,6	5	5,6	3	7,3	6	0,3	1,1	0,4	0,5	3	7	8,2	0,8	3,2	7,3	2,4	0	0,1	1,3	0,3	1	0,1	0,8	0,8	0	2,4
G	0,7	3,9	5,9	4,1	9	4,6	1,9	1	0,1	1,2	4,3	6,1	8,9	1	7,9	5,1	1,2	0,4	0,3	1,3	1,6	1,1	0,4	0,5	0,1	0,2	2,6
H	1,5	3,5	5,6	5,2	7,8	6,3	0,2	1,2	0,5	0,6	2	7,1	7	1,9	7,9	5,3	0,9	0,6	0,3	0,3	0,8	0,2	0,4	0,2	0,5	0,2	1,5
I	2,9	4,8	8,3	4,9	6,5	7,5	0,3	1	0,3	1,4	3,8	3,2	8,2	0,7	0,7	3	5,9	4	4	1,9	1,2	0,4	3	1,9	1,5	2,1	1
J	11,4	9,9	5,9	2,8	7,5	5,1	1,2	1,6	0,2	2,8	2,2	0,7	3,1	1,5	3,8	3,9	6,1	6,2	4,5	2,4	0,8	0,7	1,3	1,2	0,2	0,7	0,2

Les résultats sont analogues à ceux obtenus sur les armatures transversales, avec des potentiels globalement assez peu électro-négatifs sauf au droit des traces d'écoulements. Les potentiels suggèrent un fort risque de corrosion sur les armatures longitudinales au droit des traces d'écoulements et sur l'armature inférieure (J) sur l'ensemble de la zone, ce qui se superpose avec les traces d'écoulement relevées sur le parement.

Ainsi, les mesures électrochimiques indiquent que le risque de corrosion est limité aux traces d'écoulements. Au droit de ces traces d'écoulements, la corrosion semble initiée pour les armatures transversales et longitudinales.

Note : la fenêtre réalisée pour la connexion aux armatures n'a **pas** montré de **trace de corrosion**. Elle était située dans une zone a priori saine (cf illustration 73 pour l'implantation).

4.5.3. Mesures de potentiels sur les encorbellements (travée T4)

La zone étudiée fait environ 2,2 m de long pour 1,1 m de large et comprend 12 armatures transversales (numérotées de 1 à 12) et 6 armatures longitudinales (nommées de A à F). Les armatures transversales sont les plus proches du parement.

On note la présence de traces d'écoulements en provenance d'une gargouille et d'éclat sur fers dans un angle de la zone. L'illustration 76 et les photos (illustrations 77 et 78) ci-après décrivent la zone concernée par les mesures électrochimiques.

La zone de mesures se situe sur l'encorbellement côté TGV, sur la travée T4 à environ 12 m de la pile P3.

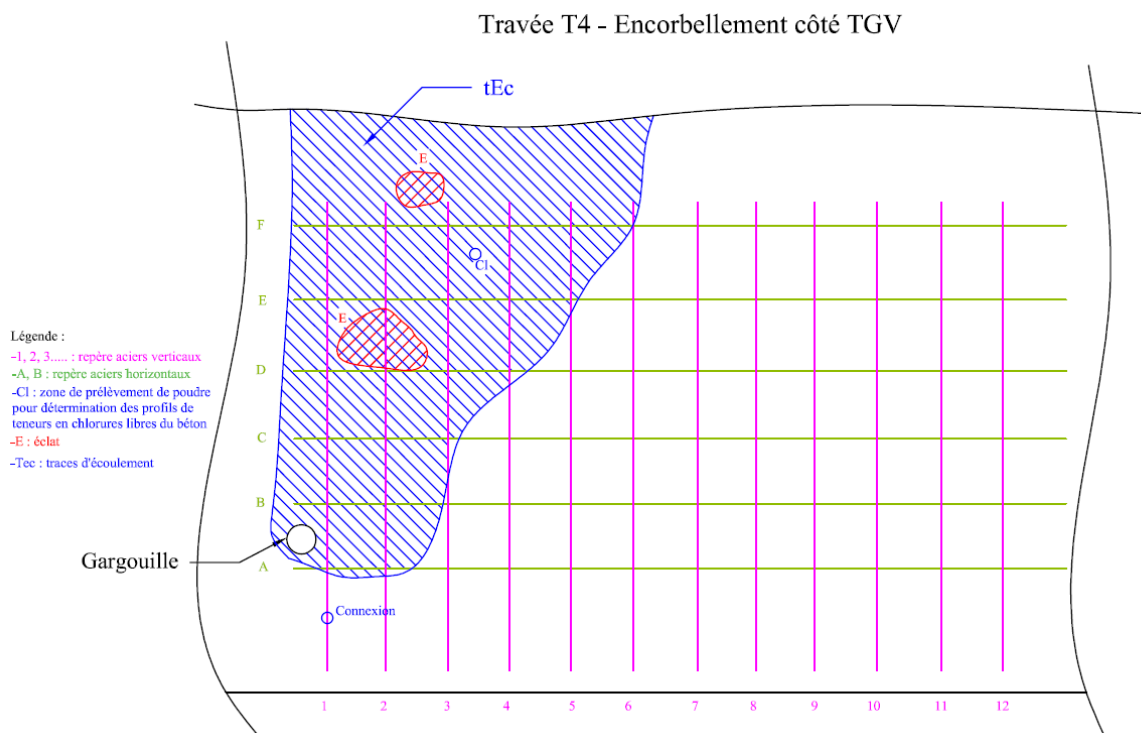


Illustration 76: Schéma de la zone auscultée avec le repérage des armatures, des prélèvements et des désordres.



Illustration 77: Vue sur la zone de mesures sur l'encorbellement.

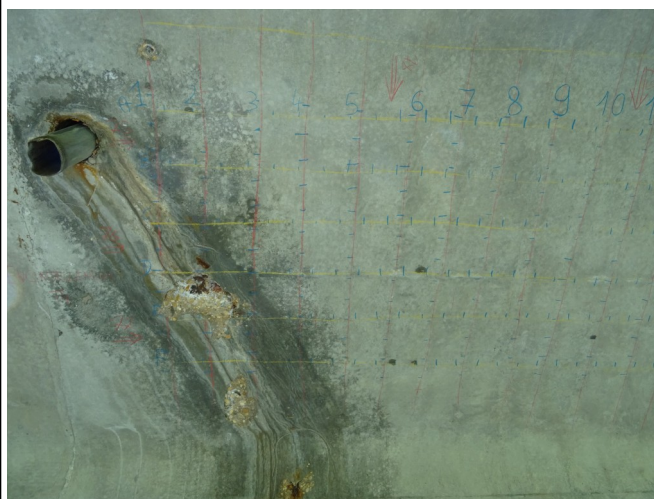


Illustration 78: Gargouille et traces d'écoulements : mauvaise connexion de la gargouille à l'étanchéité.

Mesures de résistivité électrique du béton :

Les mesures de résistivité sont prises dans les mailles du ferrailage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

L'appareil utilisé est le Resipod® de la société Proceq.

résistivité électrique du béton d'enrobage (kΩ.cm)											
Valeur moyenne des mesures réalisées en étoile dans chaque maille (kΩ.cm)											
	entre 1 et 2	entre 2 et 3	entre 3 et 4	entre 4 et 5	entre 5 et 6	entre 6 et 7	entre 7 et 8	entre 8 et 9	entre 9 et 10	entre 10 et 11	entre 11 et 12
entre E et F	40	20	26	25	228	238	261	256	313	286	322
entre D et E		31	17	57	241	246	266	314	439	319	285
entre C et D	38	19	20	257	260	254	317	348	373	271	352
entre B et C	16	17	120	269	280	239	270	421	315	262	280
entre A et B	34	37	175	249	219	215	273	327	266	252	229

A titre indicatif, la proportion de mesures de résistivité dans les différentes classes de risque de corrosion proposées par la recommandation RILEM TC154 pour béton CEM I est proposée ci-après.

Résistivité électrique (kΩ.cm)*	Risque de corrosion*	Pourcentage de mesures
$Re \geq 100$	Négligeable	74%
$50 \leq Re < 100$	Faible	2%
$10 \leq Re < 50$	Modéré	24%
$Re < 10$	Elevé	0%

(*) : Classement et valeur seuils établis à 20°C pour un béton CEM I (RILEM TC154 – Résistivité, Tab2)

Les résistivités sont globalement très élevées et sont le signe d'un béton très sec (remarque : un béton très sec a tendance à perturber les mesures électrochimiques). Les résistivités sont logiquement plus basses au droit des traces d'écoulement en raison de la présence de chlorures.

Potentiels d'armatures :

Les mesures de potentiels sont obtenues avec le Profometer® de Proceq. Les mesures sont réalisées au droit des armatures avec un pas de 10 cm.

Les tableaux suivants présentent les résultats des mesures de potentiels sur les armatures transversales et longitudinales. Pour chaque orientation d'armatures, sont présentés un tableau donnant les résultats des potentiels et un autre tableau présentant les gradients entre deux mesures consécutives sur une même armature.

Armatures transversales:

Armatures les plus proches du parement.

Encorbellement (T4) - armatures transversales (POTENTIELS mV)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
120	-353	-380	-435	-357	-295	-146	-59	-28	-11	-12	0	0
110	-382	-427	-443	-385	-293	-94	-62	-30	-11	-5	3	9
100	-461	-396	-412	-358	-267	-66	-52	-34	-17	3	7	3
90	-459	-431	-383	-362	-211	-63	-52	-26	-13	14	-6	-12
80	-467	-445	-378	-359	-165	-58	-36	-36	-17	6	-6	-7
70	-468	-489	-393	-357	-133	-71	-56	-44	-40	-8	-17	1
60	-479	-511	-409	-348	-106	-64	-41	-38	-34	-19	-20	-2
50	-464	-509	-392	-280	-95	-63	-61	-45	-46	-18	-33	-12
40	-414	-473	-404	-215	-96	-65	-77	-49	-39	-35	-56	-61
30	-380	-423	-396	-171	-108	-72	-79	-48	-46	-57	-82	-87
20	-362	-386	-370	-145	-105	-85	-75	-65	-63	-72	-93	-97
10	-358	-371	-260	-146	-115	-92	-84	-79	-66	-103	-101	-99
0	-367	-359	-201	-134	-136	-99	-82	-79	-74	-93	-105	-115

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentiels d'armatures (mV)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	67%
$-200 \text{ à } -350$	Moyenne	6%
< -350	Forte	28%

Encorbellement (T4) – armatures transversales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
110	2,9	4,7	0,8	2,8	0,2	5,2	0,3	0,2	0	0,7	0,3	0,9
100	7,9	3,1	3,1	2,7	2,6	2,8	1	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6
90	0,2	3,5	2,9	0,4	5,6	0,3	0	0,8	0,4	1,1	1,3	1,5
80	0,8	1,4	0,5	0,3	4,6	0,5	1,6	1	0,4	0,8	0	0,5
70	0,1	4,4	1,5	0,2	3,2	1,3	2	0,8	2,3	1,4	1,1	0,8
60	1,1	2,2	1,6	0,9	2,7	0,7	1,5	0,6	0,6	1,1	0,3	0,3
50	1,5	0,2	1,7	6,8	1,1	0,1	2	0,7	1,2	0,1	1,3	1
40	5	3,6	1,2	6,5	0,1	0,2	1,6	0,4	0,7	1,7	2,3	4,9
30	3,4	5	0,8	4,4	1,2	0,7	0,2	0,1	0,7	2,2	2,6	2,6
20	1,8	3,7	2,6	2,6	0,3	1,3	0,4	1,7	1,7	1,5	1,1	1
10	0,4	1,5	11	0,1	1	0,7	0,9	1,4	0,3	3,1	0,8	0,2
0	0,9	1,2	5,9	1,2	2,1	0,7	0,2	0	0,8	1	0,4	1,6

Des gradients localisés supérieurs à 8-10 mV/cm peuvent être l'indication de zones anodiques et donc de présence de corrosion.

Les potentiels sont peu électro négatifs en dehors des traces d'écoulements.

Bien que les gradients de potentiels soient peu élevés, les mesures électrochimiques indiquent un risque de corrosion pour les armatures transversales au droit des traces d'écoulements uniquement.

Armatures longitudinales :

Encorbellement (T4) - armatures longitudinales (POTENTIELS mV)

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
F	-373	-408	-440	-477	-458	-401	-320	-293	-245	-110	-61	-47	-27	-20	-20	-27	-17	-15	-8	9	10	14	9
E	-463	-403	-413	-373	-386	-360	-334	-299	-164	-70	-54	-39	-15	-25	-27	-10	-4	-2	15	4	3	4	-2
D	-473	-501	-450	-399	-356	-338	-320	-212	-145	-62	-46	-33	-27	-56	-32	-26	-17	-8	0	-7	-6	-2	-7
C	-480	-505	-461	-407	-361	-326	-155	-88	-67	-58	-51	-58	-44	-48	-43	-50	-29	-22	-20	-23	-29	-24	-26
B	-379	-391	-400	-372	-267	-155	-123	-104	-85	-73	-80	-82	-88	-67	-65	-57	-55	-59	-58	-58	-75	-68	-68
A	-360	-357	-351	-327	-187	-153	-126	-124	-106	-103	-102	-89	-84	-85	-64	-56	-69	-75	-71	-83	-102	-102	-116

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentils d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	71%
-200 à -350	Moyenne	8%
< -350	Forte	21%

Encorbellement (T4) – armatures longitudinales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
F	3,5	3,2	3,7	1,9	5,7	8,1	2,7	4,8	13,5	4,9	1,4	2	0,7	0	0,7	1	0,2	0,7	1,7	0,1	0,4	0,5
E	6	1	4	1,3	2,6	2,6	3,5	13,5	9,4	1,6	1,5	2,4	1	0,2	1,7	0,6	0,2	1,7	1,1	0,1	0,1	0,6
D	2,8	5,1	5,1	4,3	1,8	1,8	10,8	6,7	8,3	1,6	1,3	0,6	2,9	2,4	0,6	0,9	0,9	0,8	0,7	0,1	0,4	0,5
C	2,5	4,4	5,4	4,6	3,5	17,1	6,7	2,1	0,9	0,7	0,7	1,4	0,4	0,5	0,7	2,1	0,7	0,2	0,3	0,6	0,5	0,2
B	1,2	0,9	2,8	10,5	11,2	3,2	1,9	1,9	1,2	0,7	0,2	0,6	2,1	0,2	0,8	0,2	0,4	0,1	0	1,7	0,7	0
A	0,3	0,6	2,4	14	3,4	2,7	0,2	1,8	0,3	0,1	1,3	0,5	0,1	2,1	0,8	1,3	0,6	0,4	1,2	1,9	0	1,4

Les résultats sont analogues à ceux obtenus sur les armatures transversales, avec des potentiels globalement assez peu électro négatifs sauf au droit des traces d'écoulements. Ces mesures suggèrent un fort risque de corrosion des armatures longitudinales au droit des traces d'écoulement.

Ainsi, les mesures électrochimiques indiquent que le risque de corrosion est limité aux traces d'écoulements. Au droit de ces traces d'écoulements, la corrosion semble initiée pour les armatures transversales et longitudinales.

Note : la fenêtre réalisée pour la connexion aux armatures n'a **pas** montré de **trace de corrosion**. Elle était située dans le prolongement de l'armature n°1 dans une zone sans traces d'écoulement mais en bordure de celles-ci (cf illustrations 76 et 79 pour l'implantation et illustration 80).

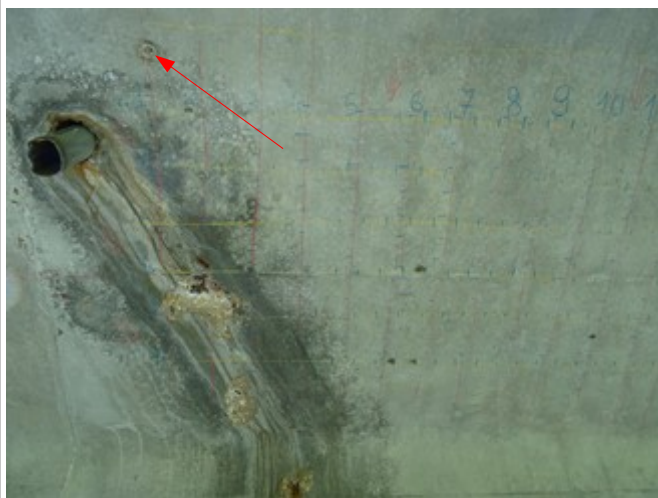


Illustration 79: Vue sur la position de la fenêtre par rapport à la gargouille.



Illustration 80: Zoome sur la fenêtre : absence de corrosion.

4.6. Récapitulatif : caisson de l'ouvrage

Le risque de corrosion des armatures internes au béton sur le caisson de l'ouvrage est lié à la présence de chlorures à des taux parfois très importants (jusqu'à 6 fois le seuil défini comme critique) sur des profondeurs significatives (jusqu'à 5 cm). Heureusement, ces zones sont limitées aux traces d'écoulements en provenance des gargouilles situées en about de l'encorbellement côté TGV. Même si cette pollution est localisée, nous attirons cependant l'attention du gestionnaire sur la présence de la précontrainte longitudinale qui passe dans l'épaisseur du hourdis inférieur et des âmes : les profondeurs atteintes par les chlorures vont à terme faire courir un risque à cette précontrainte, bien qu'elle soit théoriquement protégée par le coulis de ciment.

Il est ainsi préconisé de traiter rapidement ces venues d'eau en provenance des gargouilles. Contrairement aux piles, où le problème se situe dans l'écoulement non canalisé des gargouilles directement en contrebas de l'ouvrage, le problème se situe pour le caisson dans la mauvaise jonction de l'étanchéité avec ces gargouilles (cf illustrations 77 et 78).

Les prélèvements pour déterminer les taux de chlorures effectués en dehors des traces d'écoulements n'ont pas mis en évidence de pollution avérée. Les mesures électrochimiques réalisées sur le caisson confirment que le risque de corrosion est actuellement limité aux traces d'écoulements.

Le front de carbonatation est modéré sur les parements extérieurs (10 mm) et ne constitue pas dans l'immédiat une inquiétude vis-à-vis du risque de corrosion des armatures. En revanche, ce front est sensiblement plus profond à l'intérieur du caisson (17 mm) et le présent diagnostic pourrait être complété par des estimations d'épaisseurs d'enrobage à l'intérieur du caisson pour mieux évaluer l'éventuel risque de corrosion.

Ainsi, en se référant au guide LCPC « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » de décembre 2002 (cf annexe D) on se retrouve, en fonction de l'exposition aux chlorures, dans les cas suivant :

- cas III « Diminuer le taux de chlorures par une technique d'extraction adaptée » au droit des traces d'écoulements ;
- cas I « aucune protection nécessaire sauf à titre préventif » partout ailleurs.

Connaissant l'âge de l'ouvrage (36-37 ans) et les témoins de durabilité à cet âge, il est possible d'estimer une durée de vie résiduelle vis-à-vis de la carbonatation (cette notion pour la pollution par les chlorures n'est pas pertinente pour le caisson car la corrosion est déjà initiée au droit des traces d'écoulement et il n'y

a pas ou très peu de chlorures en dehors de ces traces). Cette notion de durée de vie résiduelle est une **approximation** à interpréter avec précaution et à utiliser comme une indication utile dans la planification de travaux de protection comme de réparation.

Le tableau ci-après récapitule les principales informations du diagnostic de corrosion effectué sur le caisson de l'ouvrage.

Zone	Enrobage e_{95} (mm)	Front de carbonatation (mm)	Front de chlorures (mm) ⁽¹⁾	Mesures électrochimiques	Cas guide LCPC	Estimation de la durée de vie résiduelle vis-à-vis de la carbonatation (années) ⁽²⁾
Hourdis inférieur (traces d'écoulements)	26	10	56	corrosion déjà initiée	III	> 100
Hourdis inférieur (hors traces d'écoulements)			0	pas de corrosion	I	
Âmes (traces d'écoulements)	31	0	28	corrosion déjà initiée	III	> 100
Âmes (hors traces d'écoulements)			0	pas de corrosion	I	
Encorbellements (traces d'écoulements)	29	10	49	corrosion déjà initiée	III	> 100
Encorbellements (hors traces d'écoulements)			/	pas de corrosion	I	
Intérieur caisson (âmes)	/	17	/	/	I	/

⁽¹⁾ : si la teneur en chlorure n'est jamais supérieure au seuil critique, le front de chlorures est de 0 mm.

⁽²⁾ : durée de vie résiduelle basée sur l'hypothèse simplifiée que le front de carbonatation évolue suivant une loi en $\sqrt{t}$.

5. Diagnostic des équipements

5.1. Corniches

Note : pour se repérer, les piles sont numérotées de P1 à P8 dans le sens Charolles → Mâcon.

Le diagnostic sur les corniches s'est concentrée sur la sous-face et face-arrière (face en regard des âmes) des corniches, leurs faces-avants étant cannelées ne se prêtant pas à ce genre d'expertise.

De nombreux éclats sur fers sont relevés sur les faces-arrières corniches à la jonction entre les différents éléments

La zone auscultée correspond à la corniche côté La Roche au droit de la travée T6 et s'étendant sur une quinzaine de mètres depuis l'axe de la pile P6.

Sur les corniches, le diagnostic a porté sur :

- les estimations des épaisseurs d'enrobages,
- deux prélèvements pour mesurer les teneurs en chlorures,
- un prélèvement pour mesurer la profondeur de carbonatation.

5.1.1. Profondeur de carbonatation

Le mode opératoire de la mesure de profondeur de carbonatation est décrit dans la Fiche B2-2 : « Mesure de la profondeur de carbonatation » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Cette mesure est faite sur des cassures fraîches des carottes prélevées sur site à l'aide d'un indicateur coloré, la phénolphthaléine (cet indicateur est rose sur le béton non carbonaté $\text{pH} > 9$ et incolore sur le béton carbonaté $\text{pH} < 9$).

Compte-tenu des difficultés de carottage sur la corniche, une seule carotte a été prélevée sur la face arrière de la corniche côté La Roche à environ 13 m de l'axe de la pile P6 sur la travée T6.



Illustration 81: Vue sur la face arrière de la corniche avec emplacement de la carotte pour la mesure de la profondeur de carbonatation.



Illustration 82: Vue sur le carottage : espace exigu, le châssis de la carotteuse rentre tout juste.

La profondeur de carbonatation est relativement importante sur les corniches avec un **front de carbonatation mesuré à 18 mm**.

Le tableau et les photos ci-après illustrent les résultats obtenus.

Prélèvement	Emplacement	1 ^{re} 1/2 carotte (mm)	2 ^e 1/2 carotte (mm)	Moyenne (mm)
Ca-C-1	travée T6	17,0	18,7	17,8



Illustration 83: Vue sur la carotte Ca-C-1 après fendage.



Illustration 84: Zoom photo précédente.

5.1.2. Profils de teneur en chlorures

Le mode opératoire de la mesure de la teneur en chlorures est décrit dans la Fiche B2-3 : « Prélèvements de poudre de béton pour mesure de la teneur en agents agressifs » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Les PV des profils de teneur en chlorures libres sont présentés en **annexe C**.

Rappel : le seuil critique de chlorures retenu est de 0,4 % par rapport à la masse de ciment.

Deux prélèvements ont été réalisés sur les corniches (corniche côté La Roche – travée T6) :

- CI-C-1 : sur la face arrière à environ 12 m de la pile P6 (illustration 85). Ce prélèvement se situe à l'extrémité d'un élément de corniche près d'un éclat sur fer (nombreux éclats sur fers relevés aux extrémités des éléments de corniche) ;
- CI-C-2 : en sous-face de la corniche à environ 5 m de la pile P6 et au milieu d'un élément de corniche -illustration 86).



Illustration 85: Vue sur prélèvement CI-C-1.



Illustration 86: Vue sur prélèvement CI-C-2.

Les teneurs en chlorures varient fortement suivant ces deux prélèvements :

- CI-C-1 : très forte pollution, plus de 4 fois supérieure au seuil critique. La teneur de chlorures est supérieure au seuil critique sur l'ensemble du prélèvement. Le front de chlorures est ainsi ≥ 6 cm ;
- CI-C-2 : présence de chlorures mais à une teneur qui reste toujours inférieure au seuil critique (teneur supérieure à 0,3 % dans les deux premiers cm).

Le tableau et les graphes ci-après présentent les résultats des teneurs en chlorure.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment ⁽ⁱ⁾				
Zone	Emplacement	Teneur maximale en Cl ⁻ libres	Teneur en Cl ⁻ libres au niveau des armatures ⁽ⁱⁱ⁾	Front de chlorures (mm) ⁽ⁱⁱⁱ⁾
CI-C-1	face-arrière corniche	1,818	1,61	≥ 60
CI-C-2	sous-face corniche	0,336	0,21	0

⁽ⁱ⁾ : la teneur en Cl⁻ libres est donnée en fonction de la masse de ciment. Le seuil critique est alors de 0,4 %.

⁽ⁱⁱ⁾ : le niveau des armatures correspond à l'enrobage caractéristique e_{95} du premier lit d'armatures (cf paragraphe sur les épaisseurs d'enrobage).

⁽ⁱⁱⁱ⁾ : profondeur à partir de laquelle le taux de chlorures passe sous le seuil critique de 0,4 % (si ce taux ne dépasse jamais les 0,4 %, alors le front est de 0 mm, ce qui ne correspond pas forcément à une absence de chlorures dans l'échantillon).

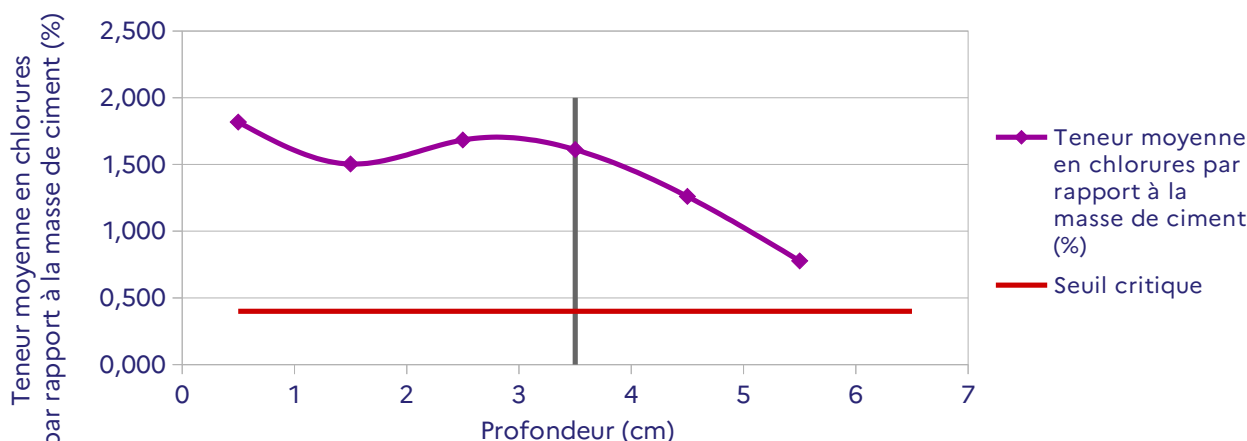


Illustration 87: Profil de teneur en chlorure sur la face arrière des corniches (prélèvement effectué à l'extrémité de l'élément de corniche au niveau des joints entre éléments).

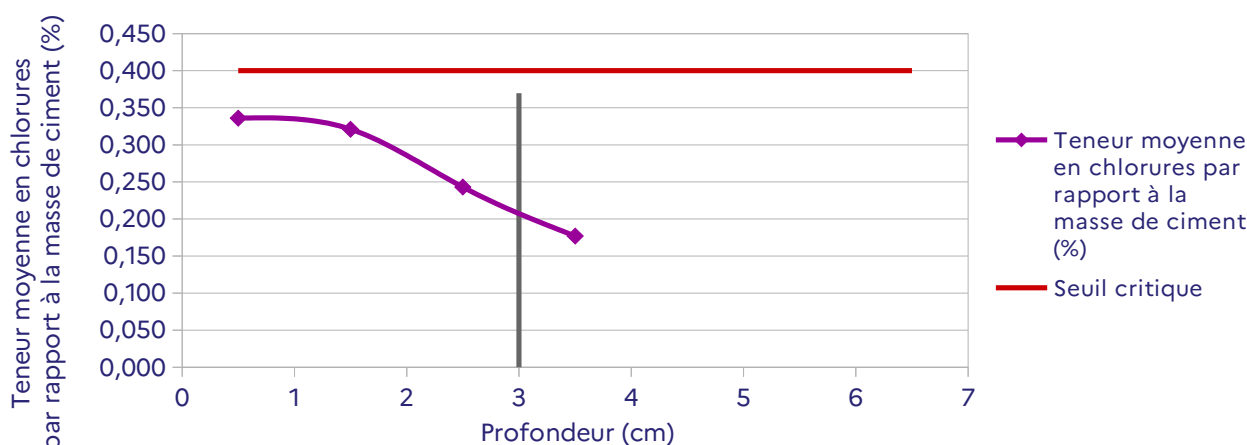


Illustration 88: Profil de teneur en chlorure en sous-face des corniches (prélèvement effectué au milieu d'un élément de corniche).

5.1.3. Épaisseurs d'enrobages

Le mode opératoire de la mesure de la profondeur d'enrobage des armatures du béton est décrit dans la Fiche B2-1 : « Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema. Les estimations sont obtenues en combinant les résultats du Ferroskan® et du radar.

Les armatures concernées par ces estimations sont les armatures les plus proches du parement, soient les armatures transversales.

Les estimations d'épaisseurs d'enrobages pour la corniche ont été réalisées sur une quinzaine de mètres (soit plus de 7 éléments) sur la corniche côté La Roche : un profil radar réalisé sur chacune des faces depuis l'axe de la pile P6 vers P5.

En moyenne les épaisseurs d'enrobages sont légèrement supérieures aux 3 centimètres théoriques et diffèrent suivant la face auscultée :

- moyenne de 40 mm pour un **enrobage caractéristique e_{95} calculé de 35 mm** sur la face-arrière. Sur l'ensemble des valeurs estimées (51 valeurs) près de 20 % des estimations sont inférieures ou égales à 35 mm ;

- moyenne de 32 mm pour un **enrobage caractéristique e_{95} calculé de 30 mm** sur la sous-face. Sur l'ensemble des valeurs estimées (51 valeurs) près de 14 % des estimations sont inférieures ou égales à 30 mm) ;

Les estimations d'enrobages sont présentées sous forme de tableau et sous format graphique ci-après.

Enrobages des armatures horizontales sur l'intrados du hourdis (mm)						
Position de la zone étudiée	Moy.	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb val.
Face-arrière de la corniche	40	5	35	31	53	51
Sous-face de la corniche	32	3	30	23	38	51

- Enrobage caractéristique calculé e_{95} (moyenne - écart-type) : 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} (dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne)

Viaduc de la Roche : estimation des enrobages sur la face arrière de la corniche (travée T6)

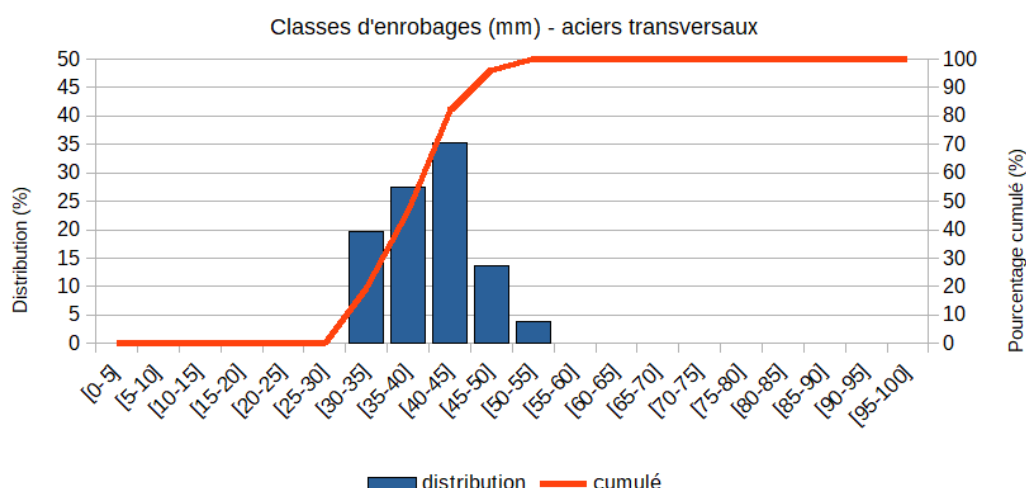


Illustration 89: Estimation des enrobages sur la face arrière de la corniche.

Viaduc de la Roche : estimation des enrobages sur la sous-face de la corniche (travée T6)

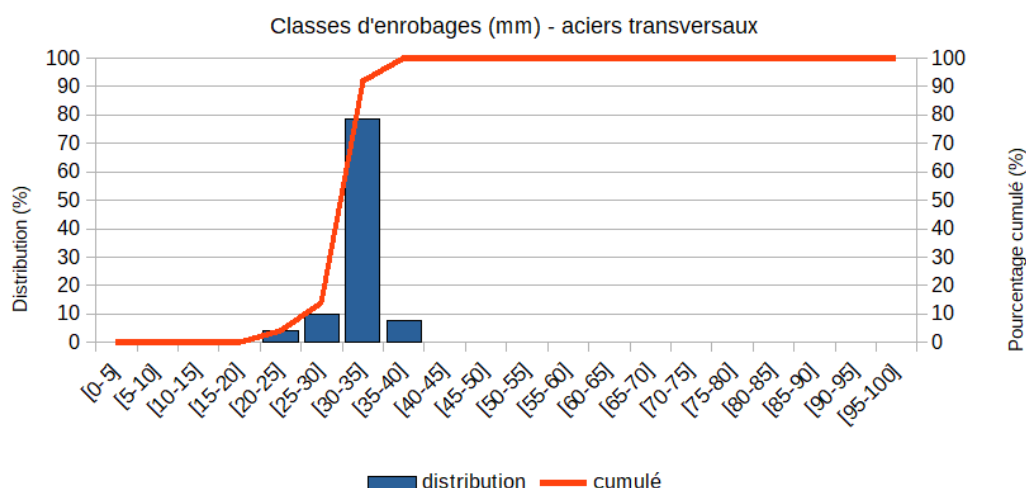


Illustration 90: Estimation des enrobages en sous-face de la corniche.

5.1.4. **Récapitulatif : corniches**

Le risque de corrosion des armatures des corniches est essentiellement liée à la présence de chlorures à des taux supérieurs au seuil critique de 0,4 % (par rapport à la masse de ciment) sur une profondeur de 6 cm. Cette forte contamination n'est pas uniforme mais est limitée aux extrémités des éléments de corniches : les eaux chargées de sels de déverglaçage s'infiltrant par les joints non traités entre éléments de corniches et contaminent les faces latérales (très peu accessibles) et les extrémités des faces-arrières. Cela se traduit par de nombreux éclats sur fers sur les extrémités des éléments de corniche (en augmentation sensible depuis la dernière inspection).

Note : l'ouvrage possède une pente longitudinale orientée vers Mâcon et les écoulements suivent naturellement cette pente. De ce fait, les extrémités « hautes » des éléments de corniches sont plus exposées aux chlorures que leurs extrémités « basses » et cela se vérifie sur la répartition des éclats déjà observés lors de l'inspection qui sont situés très majoritairement en point « haut » des éléments de corniche. Le prélèvement Cl-C-1 étant situé en point « haut », il correspond au cas le plus défavorable.

Ailleurs, sur la corniche, les chlorures sont présents à des taux assez significatifs mais qui restent encore sous le seuil critique fixé à 0,4 % de la masse de ciment. Le prélèvement CL-C-2, situé en sous-face et au milieu d'un élément doit être assez représentatif de l'exposition des corniches en leurs parties courantes même si la face extérieure pourrait être plus exposée (pas de prélèvement possible en raison du parement matricé) et la face arrière plus protégée.

Le front de carbonatation a été mesuré à 18 mm, ce qui est assez important pour un ouvrage de 36 ans. Cela est en partie compensé par des épaisseurs d'enrobages conformes aux attentes théoriques (préfabrication) avec des épaisseurs d'enrobage caractéristiques e_{95} de 35 mm et 30 mm pour respectivement la face-arrière et la sous-face des corniches.

En se positionnant dans le cas le plus défavorable (30 mm), la durée de vie résiduelle vis-à-vis de la carbonatation est de l'ordre d'une soixantaine d'années (la notion de durée de vie résiduelle est une approximation à interpréter avec précaution et à utiliser comme une indication utile dans la planification de travaux de protection comme de réparation).

Ainsi, en se référant au guide LCPC « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » de décembre 2002 (cf annexe D) on se retrouve, en fonction de l'exposition aux chlorures, dans les cas suivant :

- cas III « Diminuer le taux de chlorures par une technique d'extraction adaptée » aux extrémités et dans l'épaisseur des éléments de corniche en raison des venues d'eau qui s'infiltrant entre les joints entre éléments ;
- cas II « Ralentir la pénétration des chlorures supplémentaires... » en partie courante.

Le tableau ci-après récapitule les principales informations du diagnostic de corrosion effectué sur les corniches.

Zone	Enrobage e_{95} (mm)	Front de carbonatation (mm)	Front de chlorures (mm) ⁽¹⁾	Cas guide LCPC	Estimation de la durée de vie résiduelle vis-à- vis de la carbonatation (années) ⁽²⁾
Face arrière de la corniche	35	18	/	/	100
Sous-face de la corniche	30	18	/	/	64
Extrémités et épaisseur des éléments de corniche	/	/	≥ 60	III	/
Partie courante de la corniche	/	/	0	II	/

⁽¹⁾ : si la teneur en chlorure n'est jamais supérieure au seuil critique, le front de chlorures est de 0 mm, ce qui ne signifie pas forcément une absence de chlorures dans l'échantillon).

⁽²⁾ : durée de vie résiduelle basée sur l'hypothèse simplifiée que les fronts de carbonatation et de chlorures évoluent suivant une loi en $\sqrt{t}$.

Le mode opératoire de la mesure de la teneur en chlorures est décrit dans la Fiche B2-3 : « Prélèvements de poudre de béton pour mesure de la teneur en agents agressifs » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema.

Les PV des profils de teneur en chlorures libres sont présentés en **annexe C**.

Rappel : le seuil critique de chlorures retenu est de 0,4 % par rapport à la masse de ciment.

Le profil de teneurs en chlorures montre une pollution par les chlorures qui reste à ce stade relativement modérée. La teneur est supérieure au seuil critique dans le premier centimètre avant de baisser rapidement par la suite ; à une profondeur de 3 cm, le taux de chlorures n'est plus que de 0,17 %

Le tableau et les graphes ci-après présentent les résultats des teneurs en chlorure.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment ^(I)				
Zone	Emplacement	Teneur maximale en Cl ⁻ libres	Teneur en Cl ⁻ libres à une profondeur de 3 cm	Front de chlorures (mm) ^(II)
Cl-L-1	Longrine support du dispositif de retenue	0,498	0,18	10

(I) : la teneur en Cl⁻ libres est donnée en fonction de la masse de ciment. Le seuil critique est alors de 0,4 %.

(II) : profondeur à partir de laquelle le taux de chlorures passe sous le seuil critique de 0,4 % (si ce taux ne dépasse jamais les 0,4 %, alors le front est de 0 mm).

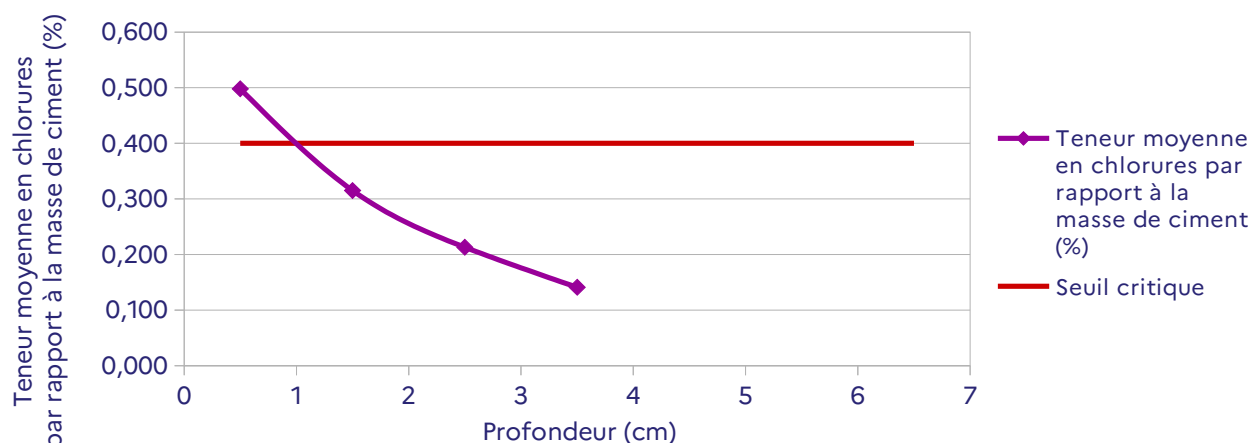


Illustration 94: Profil de teneur en chlorures sur la face avant de la longrine support de dispositif de retenue.

Les plans à notre disposition indiquent une épaisseur d'enrobage théorique de 40 mm pour les armatures transversales de la longrine (armatures de fixation des corniches – illustrations 95 et 96).

Sans informations autres que théoriques sur les enrobages et pour se placer délibérément dans un cas défavorable, l'interprétation du risque de corrosion vis-à-vis des chlorures s'est basée sur 3 cas d'épaisseurs d'enrobages caractéristiques : 30 mm / 25 mm / 20 mm.

Pour chacun de ces cas, la durée de vie résiduelle vis-à-vis de la pénétration des chlorures a été calculée à partir des éléments suivants : un front de chlorures X_d de 10 mm, un ouvrage de 36 ans et une hypothèse d'une propagation des chlorures dans l'épaisseur du béton suivant une loi en racine carré du temps. Même dans le cas le plus défavorable (enrobages de 20 mm), la durée de vie résiduelle estimée est de l'ordre de 100 ans (rappel : la notion de durée de vie résiduelle est **une approximation à interpréter avec précaution** et à utiliser comme une indication utile dans la planification de travaux de protection comme de réparation).



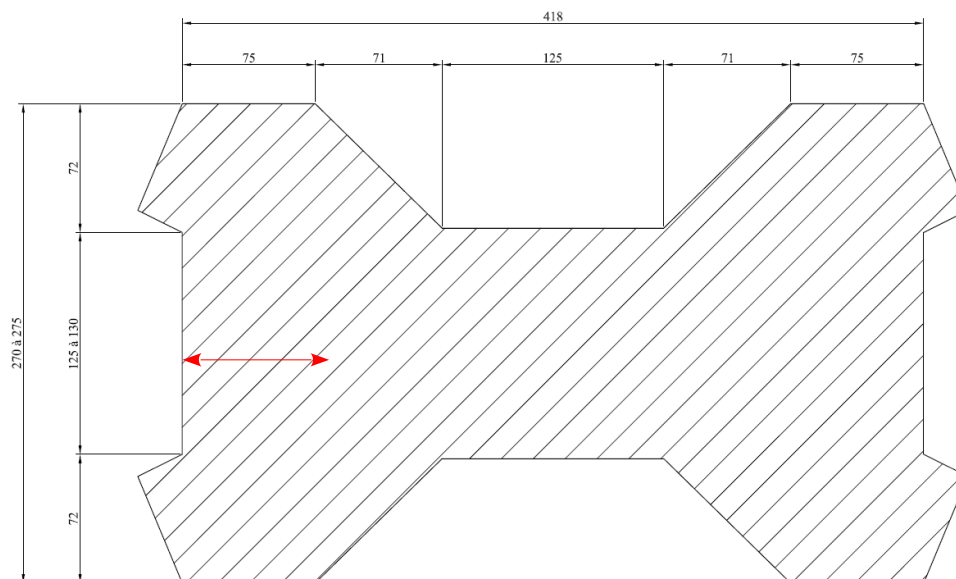


Illustration 97: Section type d'une pile avec position approximative des carottes (flèches). Ces carottes sont légèrement décalées par rapport à l'axe de la pile en raison de la présence d'armatures verticales à l'axe.

Base pile P6 – carotte prélevée dans une zone visuellement dégradée :

Date prélèvement : 03 juin 2021

Longueur mesurée dans le trou de carottage : 86 à 87 cm

La carotte a été prélevée sur la face côté TGV de la pile à 61 cm de l'extrémité Mâcon et 74 cm de l'extrémité Charolles en deux tronçons nommés P6-1 et P6-2. On note un bel aspect du béton avec un léger bullage (bulles de petit diamètre).

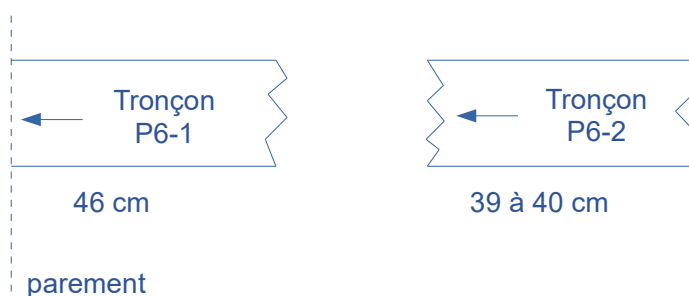


Illustration 98: schéma de la carotte prélevée à la base de la pile P6.



Illustration 99: Vue sur la face côté TGV de la pile P6 avec l'emplacement de la carotte.



Illustration 100: Vue sur le tronçon P6-1.



Illustration 101: Tronçon P6-1 : face avant.



Illustration 102: Tronçon P6-1 : face arrière.



Illustration 103: Vue sur le tronçon P6-2.



Illustration 104: Vue dans l'intérieur du trou de carotte.

Base pile P6 – carotte prélevée dans une zone visuellement dégradée :

Date prélèvement : 03 juin 2021

Longueur mesurée dans le trou de carottage : 84 cm

La carotte a été prélevée sur la face côté TGV de la pile à 54 cm de l'extrémité Mâcon et 71 cm de l'extrémité Charolles en deux tronçons nommés P5-1 et P5-2.

On note un bel aspect du béton (en dehors du parement) avec très peu de bullage.

Aspect médiocre du parement qui sonnait le creux sur de grandes dimensions avec un délaminage constaté sur la carotte (carotte cassée au carottage) : le plan de délaminage est situé entre 0,5 et 1 cm de profondeur et des granulats sont fendus (cf illustrations 106 à 112 ci-après).

L'origine de ces désordres n'est pas évidente à déterminer et a probablement les mêmes causes que le délaminage constaté sur le prélèvement de poudre sur l'intrados du hourdis au droit d'une tEc.

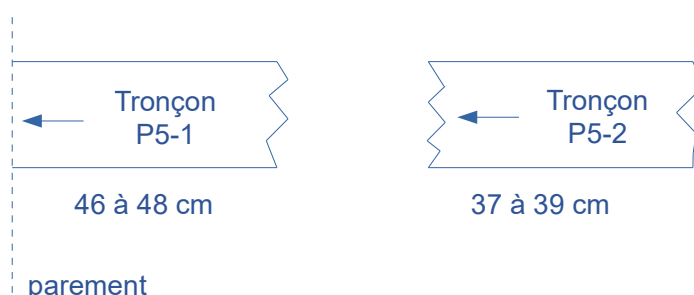


Illustration 105: schéma de la carotte prélevée à la base de la pile P5.



Illustration 106: Vue sur la face TGV de la pile P5 avec l'emplacement de la carotte et l'aspect médiocre du parement.



Illustration 107: Vue sur le tronçon P5-1 avec le côté parement cassé lors du carottage (plan de délaminage).



Illustration 108: Tronçon P5-1 : vue sur le plan de délamination.



Illustration 109: Zoom photo précédente.



Illustration 110: Tronçon P5-1 : vue sur la face arrière (pour comparaison avec le plan de délamination).



Illustration 111: Vue sur le plan de délamination à l'arrière du parement.



Illustration 112: Autre vue du plan de délamination : ce plan passe à travers de granulats.



Illustration 113: Vue sur le tronçon P5-2.

Base pile P7 – carotte prélevée dans une zone visuellement saine (carotte de référence) :

Date prélèvement : 09 juin 2021

Longueur mesurée dans le trou de carottage : 85 à 86 cm

La carotte a été prélevée sur la face côté La Roche de la pile à 54 cm de l'extrémité Mâcon et 74 cm de l'extrémité Charolles en deux tronçons nommés P7-1 et P7-2.

On note un bel aspect du béton avec un bullage léger.

Note : nous avons dû nous y prendre à deux reprises pour ce prélèvement ; lors du premier carottage la vis de scellement a légèrement bougé nous empêchant de reprendre le carottage pour le deuxième tronçon.

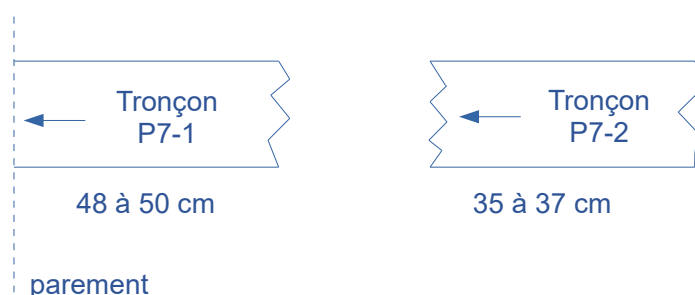


Illustration 114: schéma de la carotte prélevée à la base de la pile P7.



Illustration 115: Base de la pile P7 côté La Roche : vue sur les emplacements des carottes (la carotte de droite a du être interrompue en raison d'un mouvement de la vis de scellement du bâti).



Illustration 116: Vue sur le tronçon P7-1 : léger bullage.



Illustration 117: Vue sur la face arrière du tronçon P7-1.



Illustration 118: Vue sur le tronçon P7-2.



Illustration 119: Vue sur la face arrière du tronçon P7-2.



Illustration 120: Vue sur l'intérieur du trou de carotte.

7. Conclusion

Le diagnostic de corrosion des armatures internes au béton du viaduc de la Roche (ouvrage construit en 1984-1985 donc âgé de 36-37 ans lors du diagnostic) a porté sur :

- les culées (chevêtres et murs garde-grève),
- les piles,
- l'extérieur du caisson (intrados du hourdis inférieur, âmes et encorbellements),
- l'intérieur du caisson (âmes),
- les équipements (corniches et longrines supports de dispositifs de retenue).

Il ressort de ce diagnostic que **le risque de corrosion des armatures sur le viaduc est entièrement lié à la pollution par les chlorures**, qui est par endroit très conséquente mais reste relativement localisée (en particulier sur le caisson). Cette pollution a plusieurs origines :

- des défauts d'étanchéité des joints de dilatation (sur chaussée et surtout sur longrines / corniches) qui ont pour conséquence des écoulements sur les murs garde-grève se prolongeant sur les chevêtres. En plus du remplacement des joints de dilatation, il conviendrait de mettre en place un dispositif de récupération des eaux sous les joints pour pallier à d'éventuels (et probables) futurs défauts d'étanchéité. Il conviendra également de s'assurer que les cunettes en pied de garde-grève sont fonctionnelles et non bouchées pour protéger les chevêtres ;
- des défauts d'étanchéité aux raccords des gargouilles avec l'étanchéité générale de l'ouvrage. Ces défauts apportent une pollution par les chlorures avec des teneurs importantes mais localisées sur le caisson (à noter que la précontrainte longitudinale de l'ouvrage passe dans l'épaisseur des âmes et du hourdis). Il conviendra de reprendre rapidement, ces points singuliers de l'étanchéité qui sont défectueux ;
- l'absence de canalisation des eaux drainées par les gargouilles qui se déversent directement depuis l'encorbellement côté TGV (présence de gargouilles d'un seul côté de l'ouvrage) en contrebas du viaduc. Ces écoulements entraînent une pollution sur les piles qu'il est très difficile de circonscrire car elle dépend entre autres de la position des gargouilles par rapport aux piles et de l'orientation de leurs faces. Il conviendra de trouver un moyen afin de canaliser ces écoulements ;
- l'absence de traitement des joints entre éléments de corniche qui a entraîné des écoulements et une pollution aux chlorures prononcée aux extrémités de ces éléments. La mise en œuvre de joints souples permettrait de limiter ce phénomène.

Le traitement des défauts d'étanchéité décrits ci-dessus est à prévoir **rapidement et en amont** de tout traitement de leurs conséquences. Dans le cas contraire il ne saurait y avoir de réparation pérenne et les désordres iraient en s'aggravant.

Rappel : à terme risque de corrosion localisée pour certains câbles de précontrainte si rien n'est fait pour stopper la pollution apportée par les défauts de connexion des gargouilles à l'étanchéité.

Au-delà du diagnostic réalisé, l'ouvrage devra faire l'objet d'un projet de réparation de niveau APROA (Avant-Projet de Réparation Ouvrages d'Art) mené par un bureau d'étude compétent.

En fonction des options de gestion (cf norme NF EN 1504-9) à fixer par le gestionnaire de l'ouvrage, il appartiendra au bureau d'étude d'étudier différents scénarios appropriés de réparation et de protection du béton armé de l'ouvrage.

Sur la base des résultats du diagnostic du béton armé réalisé, sont présentées ci-après des **pistes de réflexion possibles** quant à la conduite du projet de réparation et aux suites à donner **après traitement des divers défauts d'étanchéité**.

Culées :

Sur les **chevêtres**, les armatures sont encore passivées et il n'y a pas de traitement curatif à prévoir autre que des réparations de surface locales :

- dégager le béton au droit des éclats et des débuts d'éclats suivant les prescriptions de la norme NF P95-101 (détourage des armatures apparentes ou apparaissant lors du dégagement du béton sur environ 2 cm à l'arrière, dégagement longitudinal devant se prolonger jusqu'à ce que les armatures concernées ne présentent plus de trace de corrosion sur au moins 5 cm, etc.) ;
- réparer avec un mortier de réparation structurale à base de liant hydraulique de classe R4 voire R3 (marquage CE suivant la norme EN 1504-3 – méthode 3.x) ;
- à titre préventif, réfléchir à l'opportunité de mettre en œuvre une imprégnation hydrophobe qualifiée (marquage CE suivant la norme EN 1504-2 – méthode 1.1 et niveau de performance 2 au sens du guide GA P18-902),

Note : les imprégnations hydrophobes, pour être efficaces, nécessitent une pente du support béton (ie elles ne sont pas efficaces sur les supports horizontaux).

Les **murs garde-grèves** présentent déjà un niveau de pollution par les chlorures tel qu'ils nécessitent des travaux curatifs plus lourds :

- purger le béton d'enrobage sur une profondeur de l'ordre de 3 à 4 cm (étudier l'opportunité de compléter le présent diagnostic par 1 ou 2 prélèvements supplémentaires, notamment sur la culée C0, pour mieux cerner la profondeur de purge nécessaire). Ces travaux devront être précédés d'une étude destinée à vérifier l'absence de conséquence structurale de cette purge ou à défaut à définir un phasage adapté. Les armatures apparaissant lors de cette purge devront être détournées pour permettre une bonne mise en œuvre du béton d'enrobage reconstitué (selon préconisations NF P95-101) ;
- dans un deuxième temps reconstitution du béton d'enrobage (par exemple par projection si la place disponible derrière le caisson le permet) avec un béton ou un mortier hydraulique. Il conviendra de porter une attention particulière aux vibrations apportées par la circulation ; il sera peut-être nécessaire d'interdire la circulation des PL pendant cette phase de travaux et la durée de prise du produit de réparation.

Piles:

Reprise ci-après d'un extrait du §3.6 :

« Le risque de corrosion des armatures internes au béton sur les piles du viaduc de La Roche dépend de la pollution par les chlorures ayant pour origine les gargouilles situées sous l'encorbellement côté TGV de l'ouvrage. Pour chaque pile, toutes les faces ne sont pas exposées de la même façon à ce risque et sur les 4 prélèvements réalisés en 2021, les résultats vont de l'absence de pollution (CI-P-4) à un front de chlorures situé à une profondeur de 33 mm (CI-P-1). Il est ainsi très difficile d'extrapoler les résultats obtenus à l'ensemble des 8 piles de l'ouvrage. L'exposition à la pollution par les chlorures dépend de :

- la position des gargouilles par rapport à l'axe des piles,
- l'orientation des faces (les faces côté La Roche semblent protégées),
- la position « en altitude » dans les piles, les têtes de pile étant moins exposées (la limite au-dessus de laquelle, sur une face donnée, le béton est moins exposé n'a pas de raison d'être identique d'une pile à l'autre...),
- probablement des vents dominants (ouest). »

Il est ainsi préconisé de compléter le diagnostic par des prélèvements de poudre pour déterminer les profils de teneur en chlorures pour mieux circonscrire les zones à traiter. Pour définir le nombre et l'implantation de ces nouveaux prélèvements, il est possible de s'appuyer sur la position des gargouilles par rapport aux piles cf illustration 27 et **annexe F**.

À défaut, se placer dans le cas le plus défavorable (front de chlorures à 33 mm) et l'extrapoler à l'ensemble des piles conduirait à préconiser des travaux très lourds et non justifiés. L'éventuelle purge du béton pollué par les chlorures devrait être précédée d'une étude destinée à vérifier l'absence de conséquence structurale ou à défaut à définir un phasage adapté.

À noter enfin que sur la pile P5 (carotte pour examen au MEB sur la face côté TGV) comme pour l'intrados du hourdis (prélèvement de poudre au droit d'une trace d'écoulements), un plan de délaminage a été constaté à proximité du parement avec présence de granulats fracturés. Nous n'avons pas d'idée précise quant à l'origine de ces désordres ; une des hypothèses possibles serait l'emploi de granulats gélifs.

Caisson :

Sur les **faces extérieures du caisson** de l'ouvrage (intrados du hourdis inférieur, âmes et encorbellements) le risque de corrosion est circonscrit aux traces d'écoulements en provenance des gargouilles. Partout ailleurs, les témoins de durabilité montrent que les armatures restent dans le domaine de la passivation. Il est ainsi possible d'envisager des réparations de surface « locales » (ie, sur des surfaces limitées) du béton armé :

- purger le béton au droit des traces d'écoulement (en prenant une marge pour s'assurer de bien éliminer le béton pollué) sur une profondeur d'au moins 6 à 7 cm (cas le plus défavorable rencontré lors du diagnostic). Ces travaux devront être précédés d'une étude destinée à vérifier l'absence de conséquence structurale de cette purge ou à défaut à définir un phasage adapté. Les armatures apparaissant lors de cette purge devront être détournées pour permettre une bonne mise en œuvre du béton d'enrobage reconstitué (selon préconisations de la norme NF P95-101) et les armatures présentant une corrosion par dissolution avec perte de section ou trop endommagées devront être remplacées ;
- reconstituer le béton d'enrobage par une technique appropriée aux dimensions et volumes mis en œuvre avec un béton ou un mortier à base de liant hydraulique. Il conviendra de porter une attention particulière aux vibrations apportées par la circulation ; il sera probablement nécessaire d'interdire la circulation des PL pendant cette phase de travaux et la durée de prise du produit de réparation ;

Il est par ailleurs surprenant que le béton du caisson ait laissé pénétrer aussi profondément les chlorures. Si des mesures complémentaires sont programmées sur l'ouvrage (piles), il est préconisé de réaliser également des prélèvements dans le béton du caisson pour mesurer les indicateurs de durabilité : porosité accessible à l'eau, perméabilité au gaz et coefficient apparent de diffusion des chlorures.

D'après les mesures réalisées, le béton est plus carbonaté à l'**intérieur du caisson** (front de carbonatation de 17 mm) qu'à l'extérieur (front de 10 mm). Il est ainsi suggéré :

- de compléter le diagnostic avec quelques prélèvements complémentaires et la réalisation d'estimations d'épaisseurs d'enrobage pour affiner le diagnostic.

Équipements:

Les **corniches** présentent une très forte pollution (position du front de chlorures ≥ 60 mm) concentrée aux extrémités et dans l'épaisseur des éléments préfabriqués en raison de l'absence de traitement des joints entre éléments.

Compte-tenu des épaisseurs de béton pollué, de l'enjeu des pièces concernées (problème non structurel) et de l'exiguïté et inaccessibilité des zones concernées (épaisseurs des éléments), les techniques d'extractions telles que la purge du béton pollué par les chlorures ou la déchloruration électrochimique, voire la protection cathodique, ne semblent pas pertinentes.

Il semble préférable d'envisager le remplacement des corniches à moyen terme. En attendant leur remplacement, et pour assurer la sécurité des riverains sous l'ouvrage, il conviendra de prévoir par exemple la mise en place de filets de protection empêchant la chute d'éclats de béton ou de prévoir des purges régulières.

Sur les **longrines supports de dispositifs de retenue**, seul un prélèvement pour la mesure des teneurs en chlorures a été effectué, la réalisation de carottages pour mesure de la profondeur de carbonatation et l'estimation des épaisseurs d'enrobage des armatures n'ayant pas été possibles.

Vis-à-vis du risque de corrosion associé aux chlorures, la position du front de chlorure mesurée en 2021 (10 mm) et les valeurs des épaisseurs d'enrobage **théoriques** (a minima 40 mm) suggèrent que les arma-

tures sont à ce stade encore protégées par le béton d'enrobage. Il n'y a pas de traitement curatif à prévoir autre que des réparations de surface locales :

- dégager le béton au droit des éclats et des débuts d'éclats suivant les prescriptions de la norme NF P 95-101 (détourage des armatures apparentes ou apparaissant lors du dégagement du béton sur environ 2 cm à l'arrière, dégagement longitudinal devant se prolonger jusqu'à ce que les armatures concernées ne présentent plus de trace de corrosion sur au moins 5 cm, etc.) ;
- réparer avec un mortier de réparation structurale à base de liant hydraulique de classe R4 (marquage CE suivant la norme EN 1504-3 – méthode 3.x).

Annexes

Annexe A - Formulation du béton et caractéristiques physico-chimiques du ciment



LABORATOIRE REGIONAL des PONTS
et CHAUSSEES d'AUTUN

E 400 6.1

DEMANDE D'ESSAIS DE RESISTANCE MECANIQUE BETONS

Entreprise : GTM

Chantier RN 79 Route express DIGON MACON

Ouvrage : Viaduc de la Roche

Partie Ouvrage Toulon, T17, MS. entretienne d'about

Fabrication du Béton : LES Béton Maçon Maçon

Transport : concrete mixer + lorry

Lieu et Date Prélèvement Chantier le 19/12/88

ESSAI	DE	COMPRESSION	machon / tendac
Dimension Eprouvette	$\phi 16 \times 32$	cm	$\phi 16 \times 32$
Nature du moule	carton		Plastique
Serrage du béton	Aiguille vibrante		A.V.
Conservation chantier		cais	se
Conservation labo	eau 20°C		eau 20°C

COMPOSITION du BETON m³

C		ORIGINE	DOSAGE	CIMENT	MARQUE et USINE	DOSAGE
0,5	}	Riffier	695 kg	CPA 55 R	Nicat Crechy	400
5/15		Saône	380 kg	Adjuvants	TYPE et MARQUE	DOSAGE
15/25		Maron	750 kg			
			kg			
			kg			

[illegible]

Conditions météo : $T_{ext} = +5^{\circ}C$
 Pluieux.

Observations : *Code 2 Num 3* (N.E. nombre éprouvett

NOTA : Sauf consignes particulières du demandeur les résidus des éprouvettes ayant subi les essais ne seront pas conservés après la signature du P.V.

Nature des commentaires demandés: Portée et conclusions à tirer des résultats .
☐ non demandées ☒ demandées dans un document séparé ☐ demandées dans un
procès verbal d'essais (1) (1) Rayer les mentions inutilisées

Consignes d'exécution : Opérateur : STACON
PISTON

Confection de 9 cyl.

Demandeur ou donneur d'ordre

DDE ₹1

UTUN le _____ Visa Chef UTR.

2A ROCHE

Po

DATE _____ Signature : _____



LABORATOIRE REGIONAL des PONTS
et CHAUSSEES d'AUTUN

Ed Winston

Q 400.6-h

DEMANDE D'ESSAIS DE RESISTANCE MECANIQUE BETONS

Entreprise: GIM (Mailhard et Duclos)

Chantier RN 79 Route express Digne-MACON

Ouvrage : Viaduc de la Roche

Partie Ouvrage : Pile P8 élévation A

Fabrication du Béton : UEB Béton Marché Marché

Transport : camion mixer + benne

Lieu et Date Prélèvement Chonher le 15/10/81

ESSAI	DE	COMPRESSION	hauteur rendage
Dimension Eprouvette	$\phi 16 \times 32$ cm	$\phi 16 \times 32$ cm	$\phi 16 \times 32$ cm
Nature du moule	carbon	carbon	carbon
Serrage du béton	Tout à la main	A.V. (entrepreneur)	A.V. (entrepreneur)
Conservation chantier	extérieure		
Conservation labo	eau 20°C		eau 20°C

COMPOSITION du BETON m³

Granulats	ORIGINE	DOSAGE	CIMENT	MARQUE et USINE	DOSAGE
0/5	} Riffier Saône Macon	695 kg	CPA 55 R	Vicat Crechy	400 kg
5/15		380 kg	Adjuvants	TYPE et MARQUE	DOSAGE
15/25		750 kg			
		kg			
		kg			

[illegible]

Conditions météo : *Beau*

Observations : Auto contrôle Maillard et Dulas - (N.E. nombre éprouvettes) - Cube $\approx 10, 150$

NOTA : Sauf consignes particulières du demandeur les résidus des éprouvettes ayant subi les essais ne seront pas conservés après la signature du P.V.

Nature des commentaires demandés : Portée et conclusions à tirer des résultats.

☐ non demandées ☐ demandées dans un document séparé ☐ demandées dans un procès verbal d'essais (1)

(1) Rayer les mentions inutiles

Consignes d'exécution : Opérateur : ^{entreprise} ~~XXXXXXXXXX~~
Construction de la cylindres

Demandeur ou donneur d'ordre

AUTUN le _____ Visa Chef UTR.

DATE _____ Signature : _____

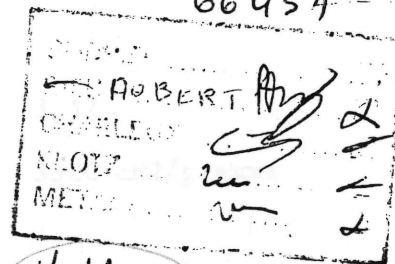
F 8201

66434

C P A 5 5 R

Usine de CRECHY (03)

Label NF - VP - Norme NF P 15-301



Ce produit figure également sur la liste COPLA des ciments pour béton précontraint non soumis à traitement thermique.

1 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

1.1 Caractéristiques chimiques du clinker

C ₃ A	7,8	Standard de chaux	96,0
C ₄ AF	9,7	Module silicique	2,6
C ₃ S	68,2	Indice alumino ferrique	1,6
C ₂ S	8,7		

1.2 Valeurs garanties par la norme NF P 15-301

1.2.1 Résistances minimales à la compression (NF P 15-451)

2 jours : 17 Mégapascals - 28 jours : 45 Mégapascals

1.2.2 Début de prise sur pâte pure (NF P 15-431) supérieur à 1 H

1.2.3 Retrait à 28 jours (NF P 15-433) inférieur à 1000 microns/mètre

1.2.4 Expansion (NF P 15-432) inférieure à 10 mm

1.2.5 Teneur en SO₃ (NF P 15-432) inférieure à 4 %

1.2.6 Teneur en magnésie inférieure à 5 %

1.2.7 Teneur en chlore inférieure à 0,05 %

.../...

2 - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

- 2.1 Masse volumique 3,12
- 2.2 Surface spécifique Blaine (NF P 15-442) 3500 cm²/gramme
- 2.3 Essai de prise (NF P 15-431)
Début de prise sur pâte pure 3^h 00
- 2.4 Essai d'expansion (NF P 15-432) totale 1
- 2.5 Exothermie (P 15-436)
Chaleur d'hydratation à 12 heures 192 Joules/gramme
- 2.6 Essai de retrait sur mortier (NF P 15-433)
Retrait à 28 jours 810 microns/mètre
- 2.7 Essais mécaniques (NF P 15-451)
Résistances en mortier normal (exprimées en MPa)

Echéances	Compression	Ecart type
2 jours	31	2,0
7 jours	42	2,0
28 jours	53	2,0

Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes : elles peuvent varier légèrement dans les limites autorisées par la Norme.

VICAT

USINE DE :

CRECHY

RESULTATS STATISTIQUES 1983

CPA 55 R	DIAMETRE MEDIAN LASER (Micromètre)	RESISTANCE COMPRESSION A L'EXPEDITION			ECART TYPE		
		2 J.	7 J.	28 J.	2 J.	7 J.	28 J.
JANVIER	16,9	31,8	44,2	53,2	1,6	1,3	1,0
FEBVRIER	15,4	31,9	44,7	53,5	1,7	1,8	0,8
MARS	15,4	32,9	46,4	54,5	1,9	1,1	1,4
1 ^{ER} TRIMESTRE	15,8	32,2	45,1	53,7	1,7	1,7	1,2
AVRIL	15,8	33,6	47,5	54,6	1,8	1,7	2,2
MAI	16,0	32,9	45,7	52,8	1,5	1,0	1,3
JUN	15,2	32,5	45,9	54,9	1,8	1,2	1,6
2 ^{ME} TRIMESTRE	15,6	33,0	46,4	54,2	1,7	1,5	1,9
JUILLET	15,1	32,3	45,3	53,6	2,0	2,2	2,0
AOUT	16,6	33,9	45,7	52,7	2,3	1,7	1,5
SEPTEMBRE	15,3	34,6	45,2	54,1	2,5	2,0	2,8
3 ^{ME} TRIMESTRE	15,7	33,6	45,4	53,5	2,4	1,9	1,8
OCTOBRE							
NOVEMBRE							
DECEMBRE							
4 ^{ME} TRIMESTRE							
S 8							

Annexe B - Plans des zones étudiées avec relevé des désordres, emplacements des armatures et des prélèvements

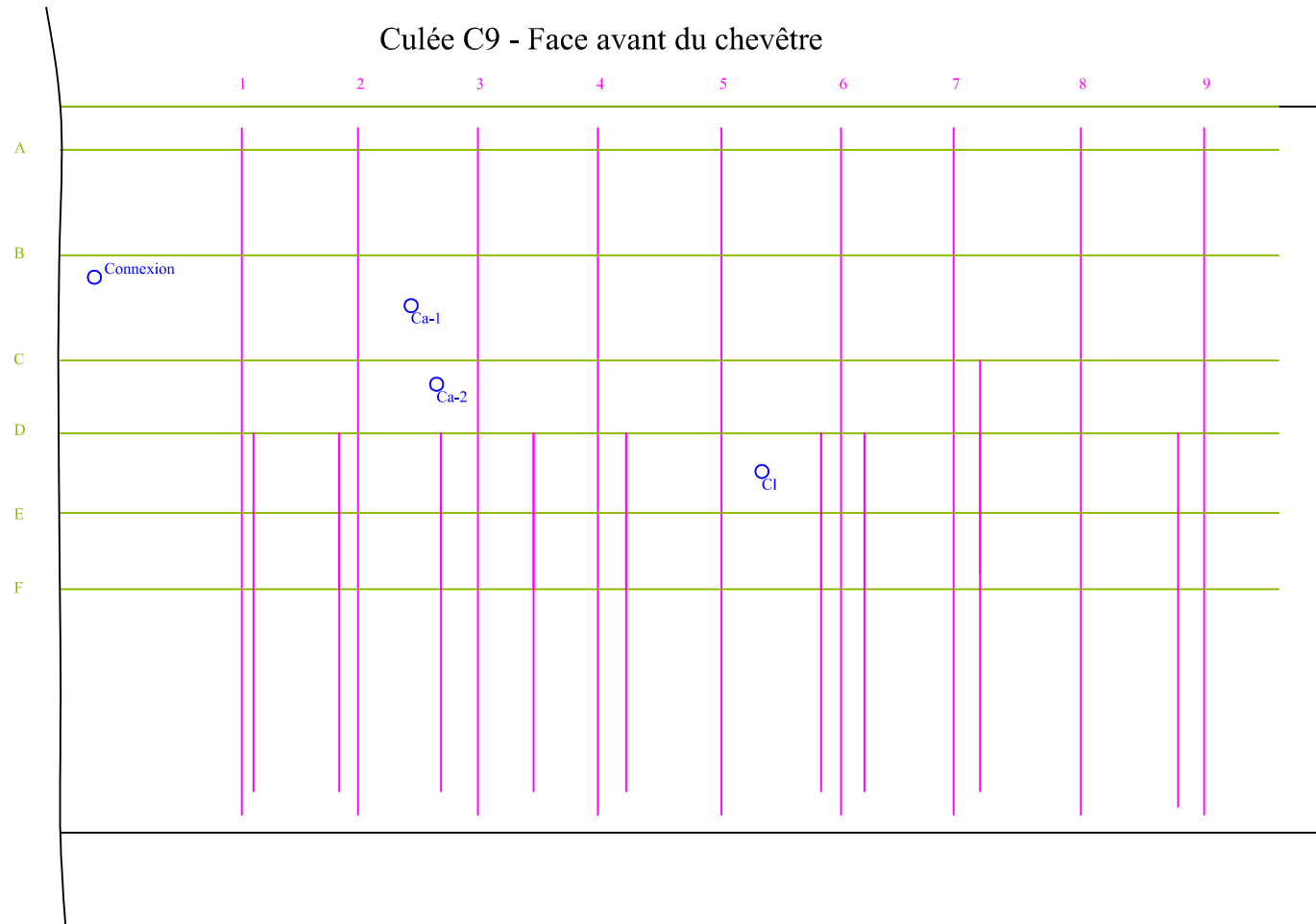
Viaduc de la roche

Culée C9

Face avant chevêtre

Légende :

- 1, 2, 3..... : repère aciers verticaux
- A, B : repère aciers horizontaux
- Ca : zone de prélèvement pour détermination de la profondeur de carbonatation du béton
- Cl : zone de prélèvement de poudre pour détermination des profils de teneurs en chlorures libres du béton



CEREMA - Agence d'Autun

Autocad 2016 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Date de visite : Avril 2021

Echelle : 1/20e

Viaduc de la roche

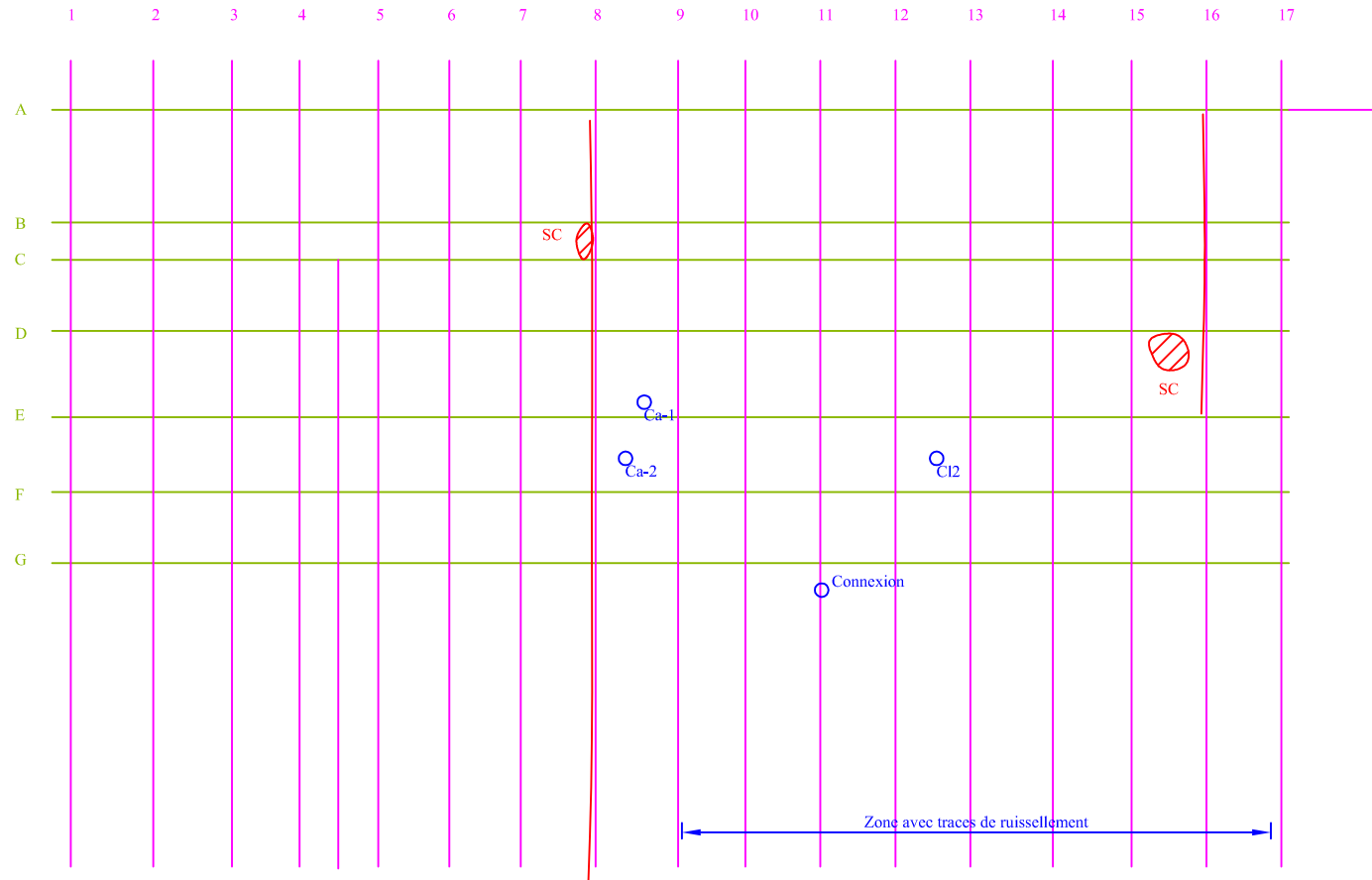
Culée C9

Mur garde grève

Culée C9 - Mur garde grève

Légende :

- 1, 2, 3..... : repère aciers verticaux
- A, B : repère aciers horizontaux
- Ca : zone de prélèvement pour détermination de la profondeur de carbonatation du béton
- Cl : zone de prélèvement de poudre pour détermination des profils de teneurs en chlorures libres du béton
- Sc : sonde creux



CEREMA - Agence d'Autun

Autocad 2016 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Date de visite : Avril 2021

Echelle : 1/20e

Viaduc de la roche

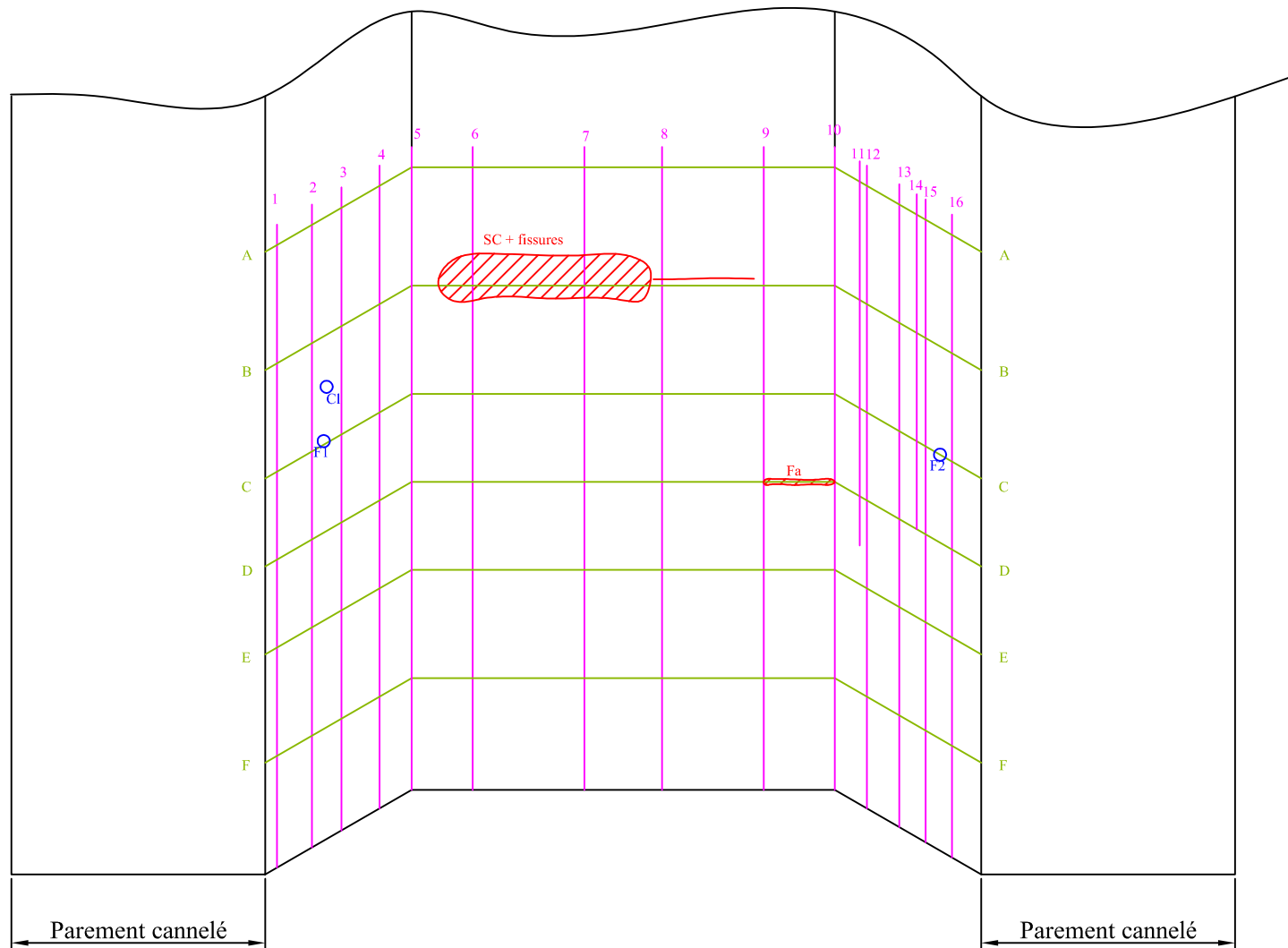
Pile P5

Face côté Moulins

Pile P5 - Face Moulins

Légende :

- 1, 2, 3,... : repère aciers verticaux
- A, B : repère aciers horizontaux
- Cl : zone de prélèvement de poudre pour détermination des profils de teneurs en chlorures libres du béton
- F1,2... : ouverture de fenêtre sur acier
- Sc : sonde creux
- Fa : fer apparent



CEREMA - Agence d'Autun

Autocad 2016 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Date de visite : Avril 2021

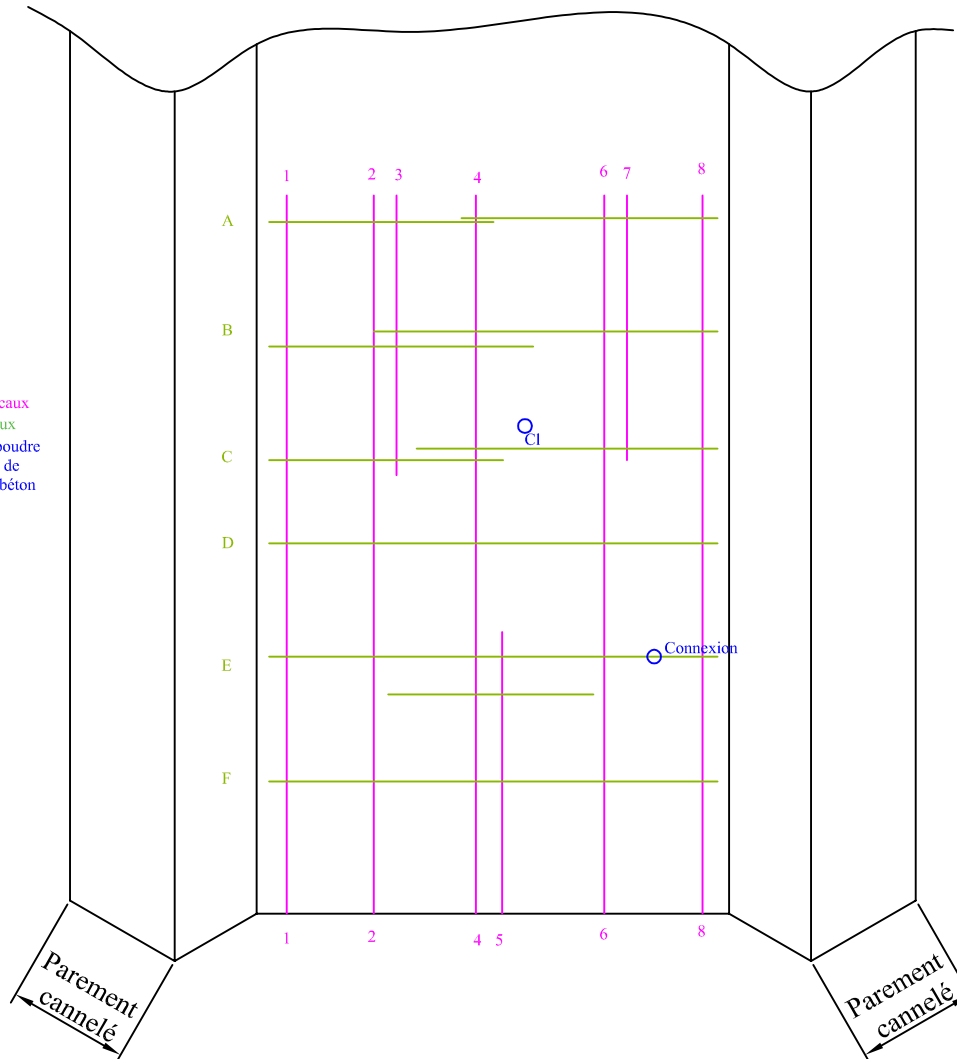
Echelle : 1/20e

Viaduc de la roche
Pile P5
Face côté La Roche

Pile P5 - Face La Roche

Légende :

- 1, 2, 3..... : repère aciers verticaux
- A, B : repère aciers horizontaux
- Cl : zone de prélèvement de poudre pour détermination des profils de teneurs en chlorures libres du béton



CEREMA - Agence d'Autun

Autocad 2016 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Date de visite : Avril 2021

Echelle : 1/20e

Viaduc de la roche

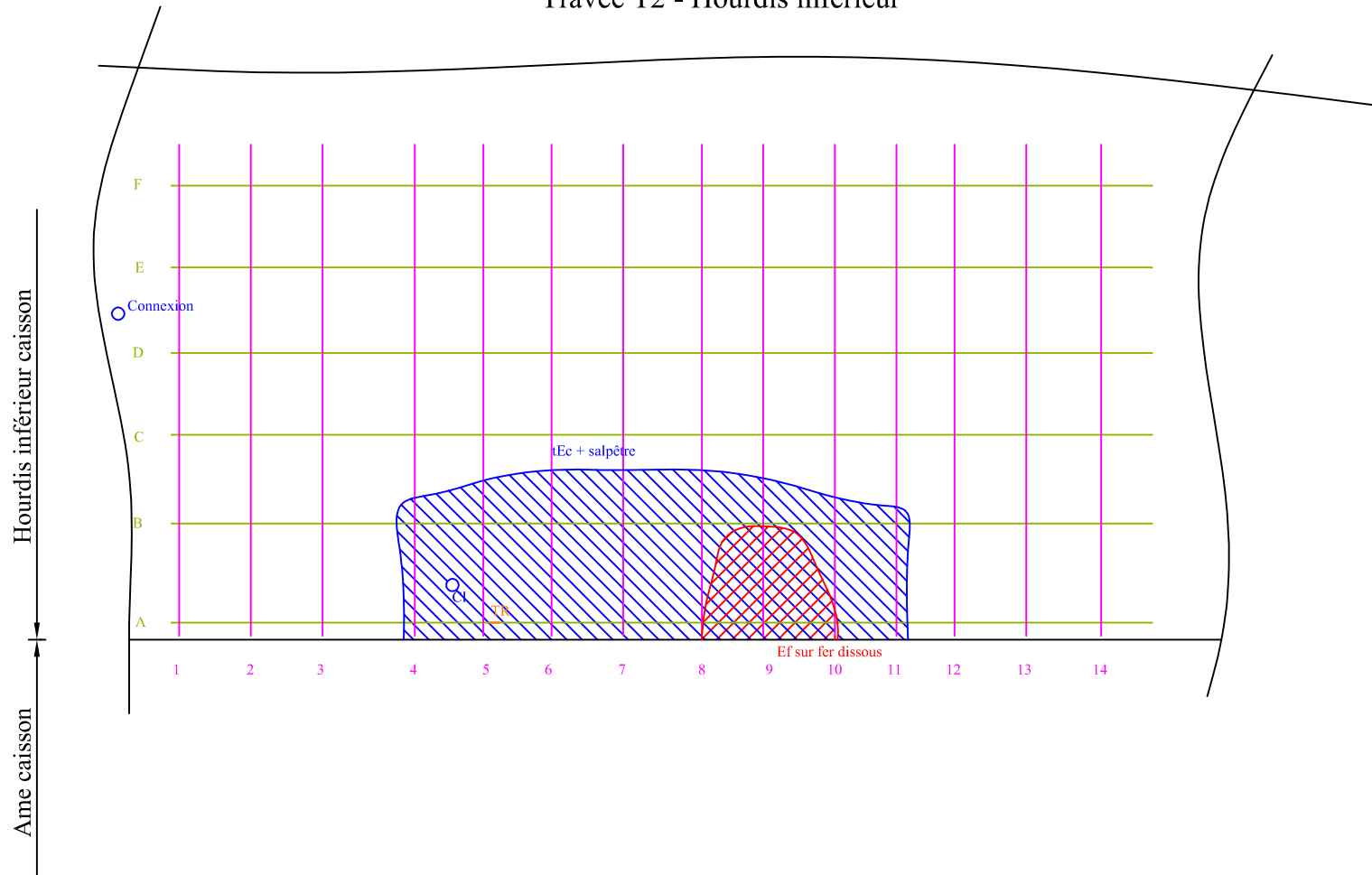
Travée T2

Hourdis inférieur

Travée T2 - Hourdis inférieur

Légende :

- 1, 2, 3..... : repère aciers verticaux
- A, B : repère aciers horizontaux
- Cl : zone de prélèvement de poudre pour détermination des profils de teneurs en chlorures libres du béton
- Ef : éclat sur fers
- Tee : traces d'écoulement
- TR : trace de rouille



CEREMA - Agence d'Autun

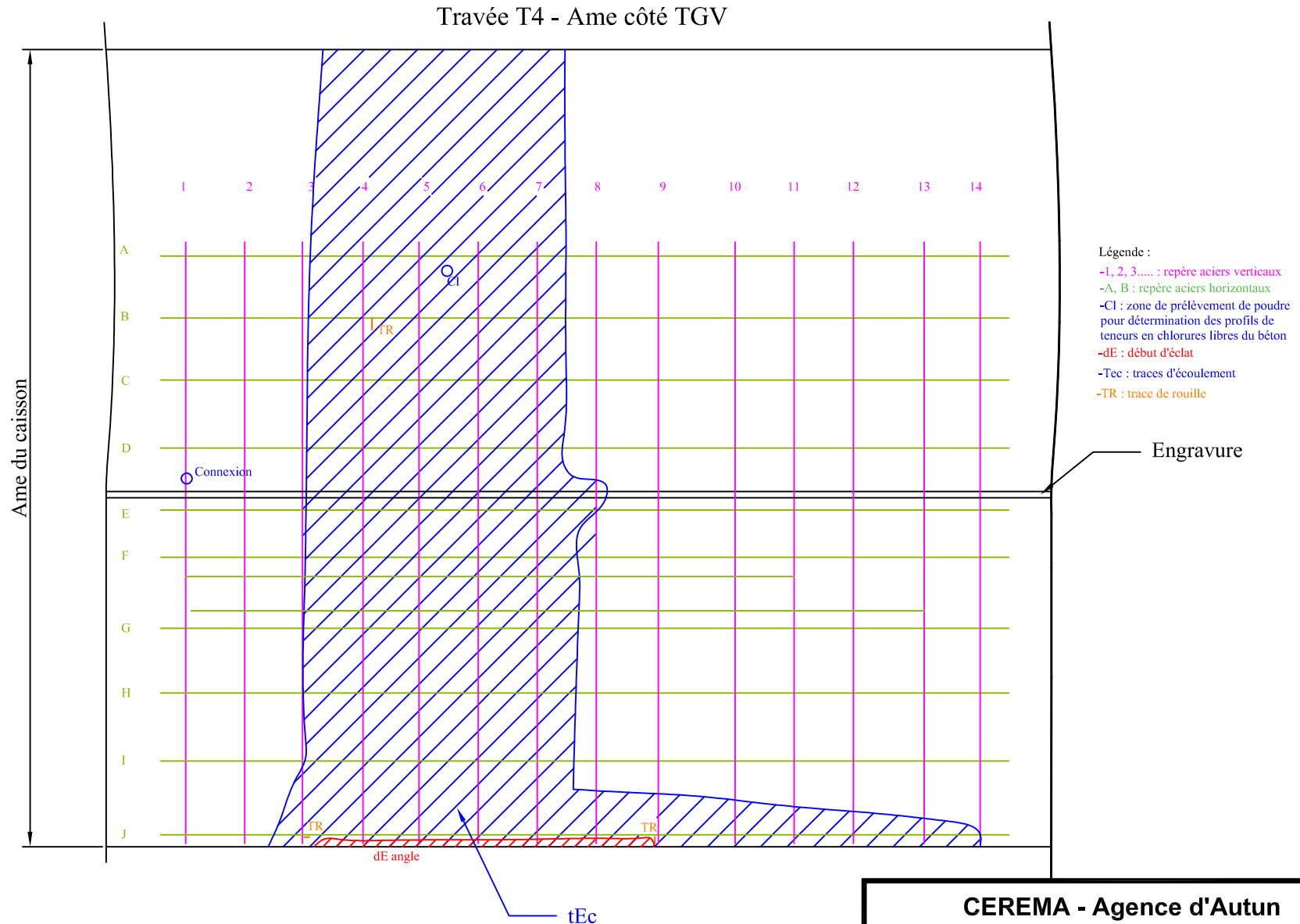
Autocad 2016 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Date de visite : Avril 2021

Echelle : 1/20e

Viaduc de la roche Travée T4 Ame côté TGV



CEREMA - Agence d'Autun

Autocad 2016 : MAYER Guillaume

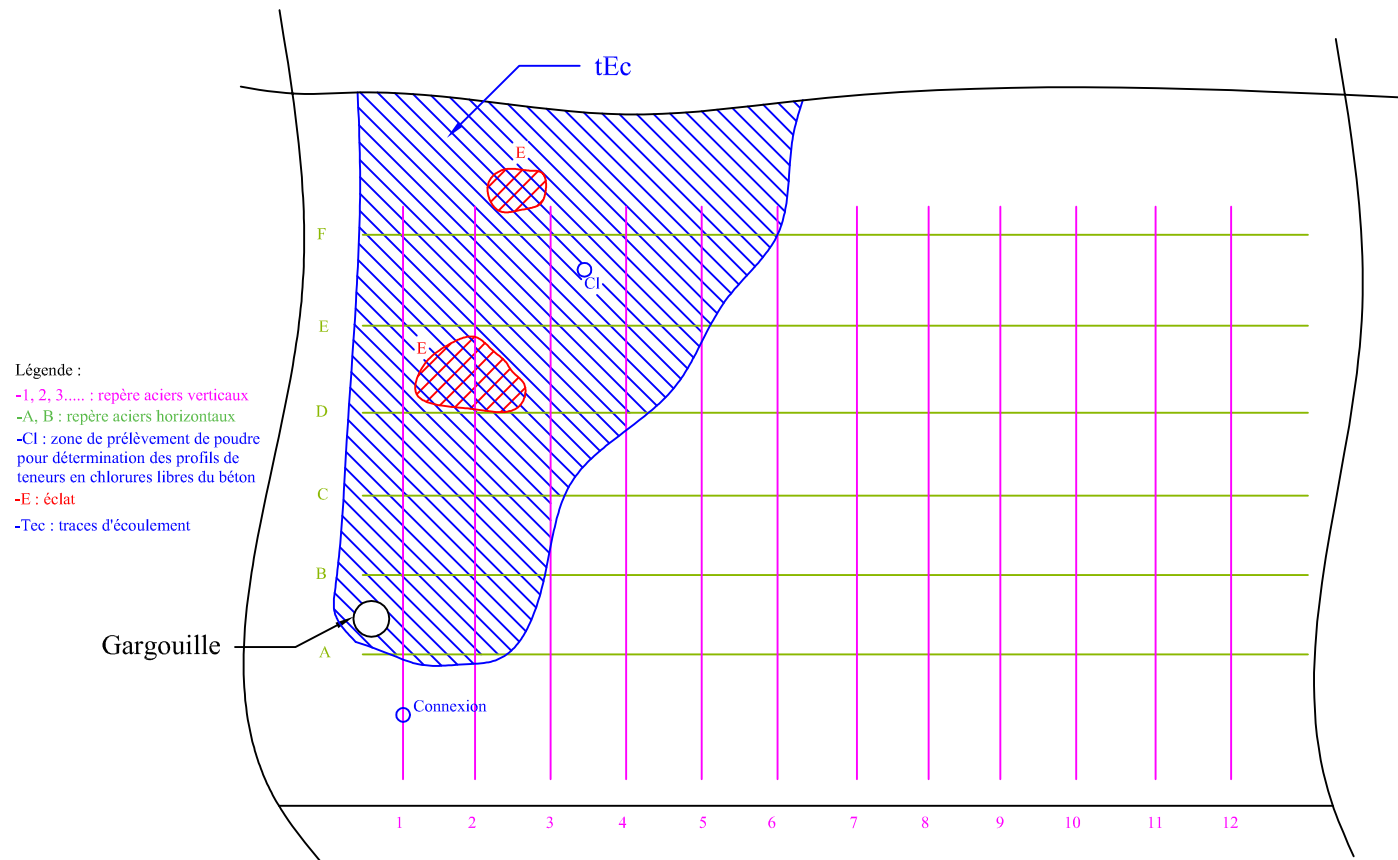
Ouvrages d'Art

Date de visite : Avril 2021

Echelle : 1/20e

Viaduc de la roche Travée T4 Encorbellement côté TGV

Travée T4 - Encorbellement côté TGV



CEREMA - Agence d'Autun

Autocad 2016 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Date de visite : Avril 2021

Echelle : 1/20e

Annexe C - PV des profils des teneurs en chlorures

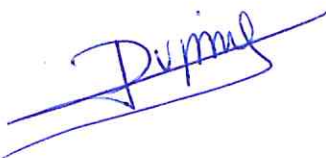
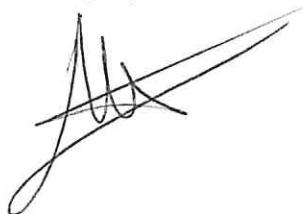
Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon

Nom de l'ouvrage :	Viaduc de la Roche	Année de construction :	1985
Nom de l'échantillon :	CI-P-1	Date(s) de prélèvement :	27/04/21
Descriptif de la zone de prélèvement :	Base de la Pile P5 – Face Charolles		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais :	06-07/05/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres ☐ Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m ³) :	400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	2,7		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

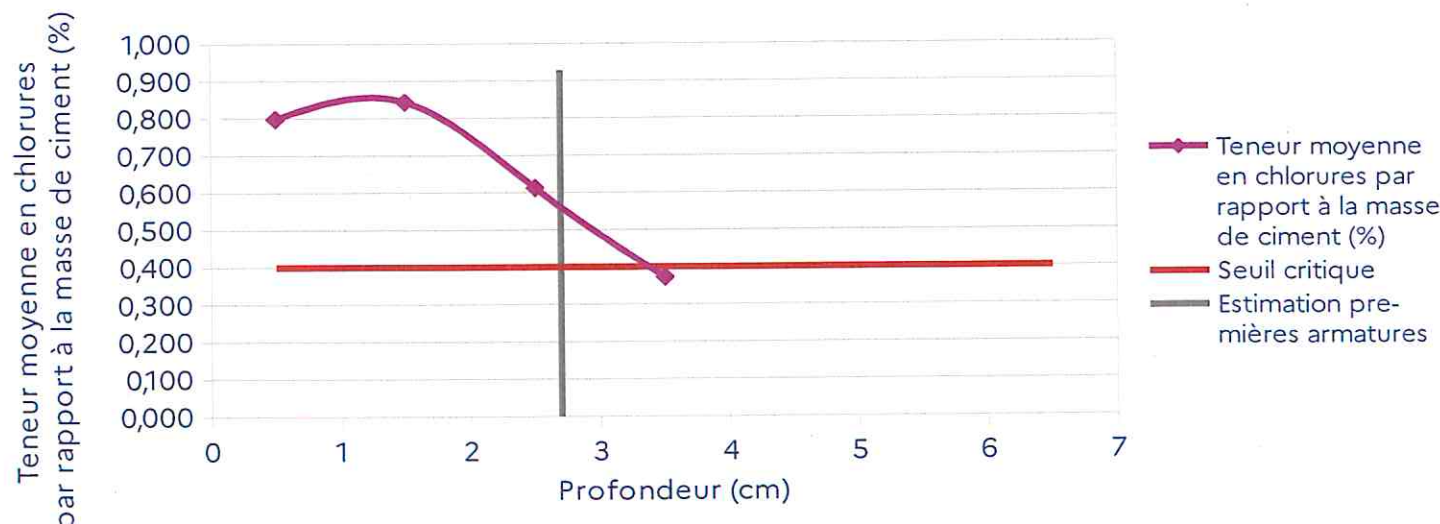
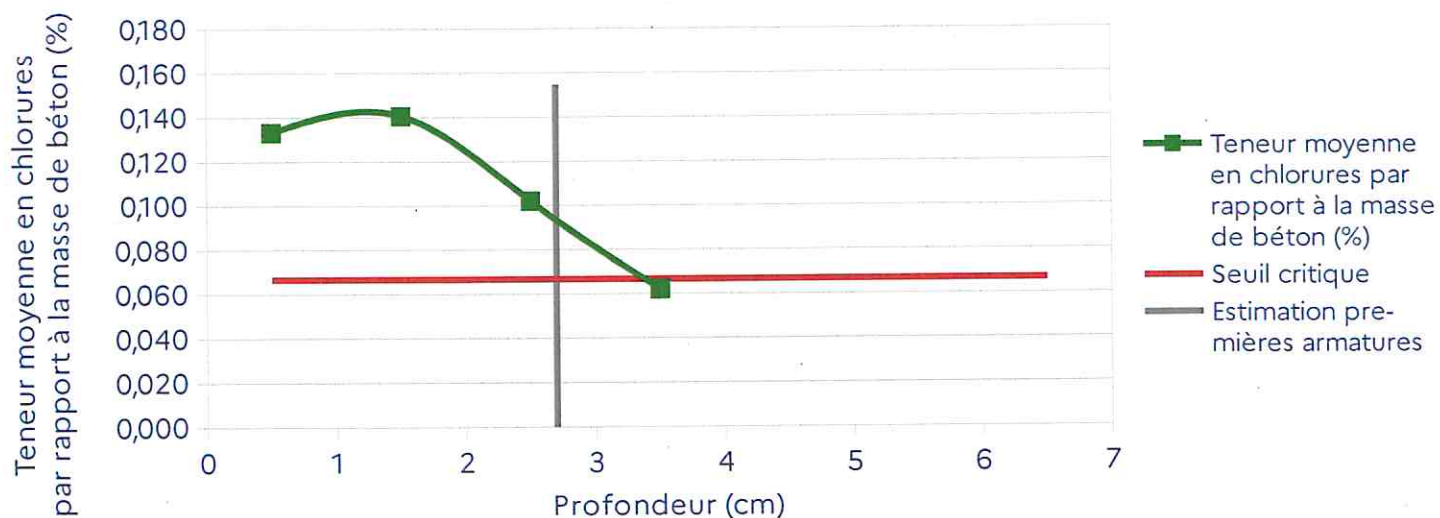
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00452	0,133	0,133	0,798
		0,133		
1-2	5,00413	0,141	0,141	0,843
		0,140		
2-3	5,00127	0,100	0,102	0,612
		0,104		
3-4	5,00401	0,062	0,062	0,372
		0,062		
4-5				
5-6				
6-7				



Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
 totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon				
Nom de l'ouvrage: Viaduc de la Roche		Année de construction : 1985		
Nom de l'échantillon : CI-P-2		Date(s) de prélèvement : 29/04/21		
Descriptif de la zone de prélèvement :		Haut de la Pile P5 – Face Charolles		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte	
Date(s) des essais : 06-07/05/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres	☐ Chlorures totaux	
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :		400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :		2,7		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

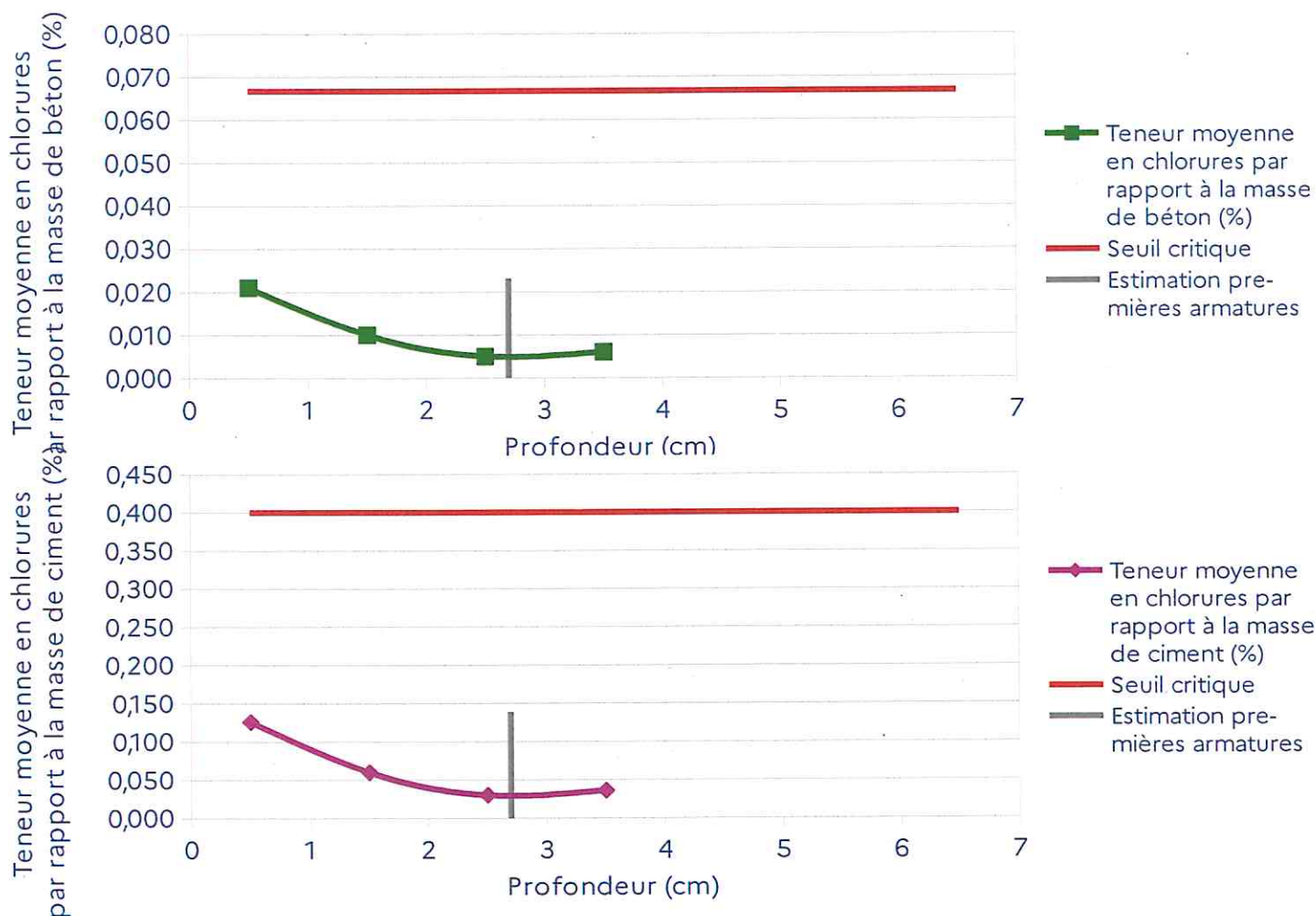
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00638	0,020	0,021	0,126
		0,022		
1-2	5,00734	0,008	0,010	0,060
		0,012		
2-3	5,00389	0,006	0,005	0,030
		0,004		
3-4	5,00275	0,006	0,006	0,036
		0,006		
4-5				
5-6				
6-7				



Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon

Nom de l'ouvrage :	Viaduc de la Roche	Année de construction :	1985
Nom de l'échantillon :	CI-P-3	Date(s) de prélèvement :	29/04/21
Descriptif de la zone de prélèvement :	Haut de la Pile P4 – Face Charolles		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais :	06-07/05/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres ☐ Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m ³) :	400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	2,7		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

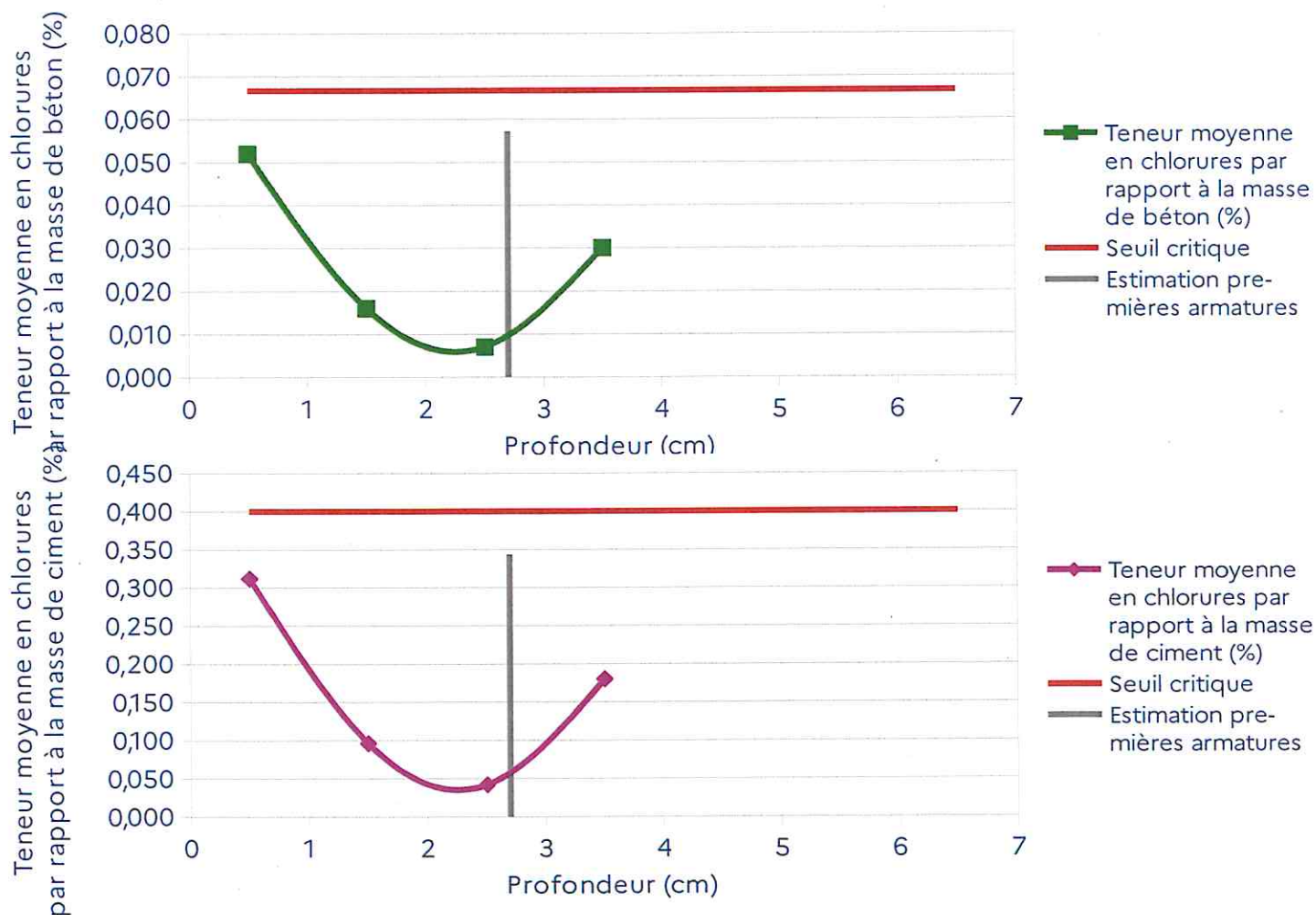
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00883	0,050	0,052	0,312
		0,054		
1-2	5,00792	0,016	0,016	0,096
		0,016		
2-3	5,00025	0,007	0,007	0,042
		0,007		
3-4	5,00152	0,029	0,030	0,180
		0,031		
4-5				
5-6				
6-7				

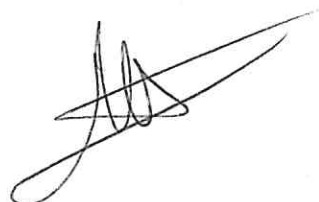


Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon				
Nom de l'ouvrage: Viaduc de la Roche		Année de construction : 1985		
Nom de l'échantillon : Corniche CI-C-2		Date(s) de prélèvement : 08/06/21		
Descriptif de la zone de prélèvement :		Corniche côté la Roche – Travée T6 : sous-face		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte	
Date(s) des essais : 07-08/07/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres	☐ Chlorures totaux	
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :		400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :		3		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

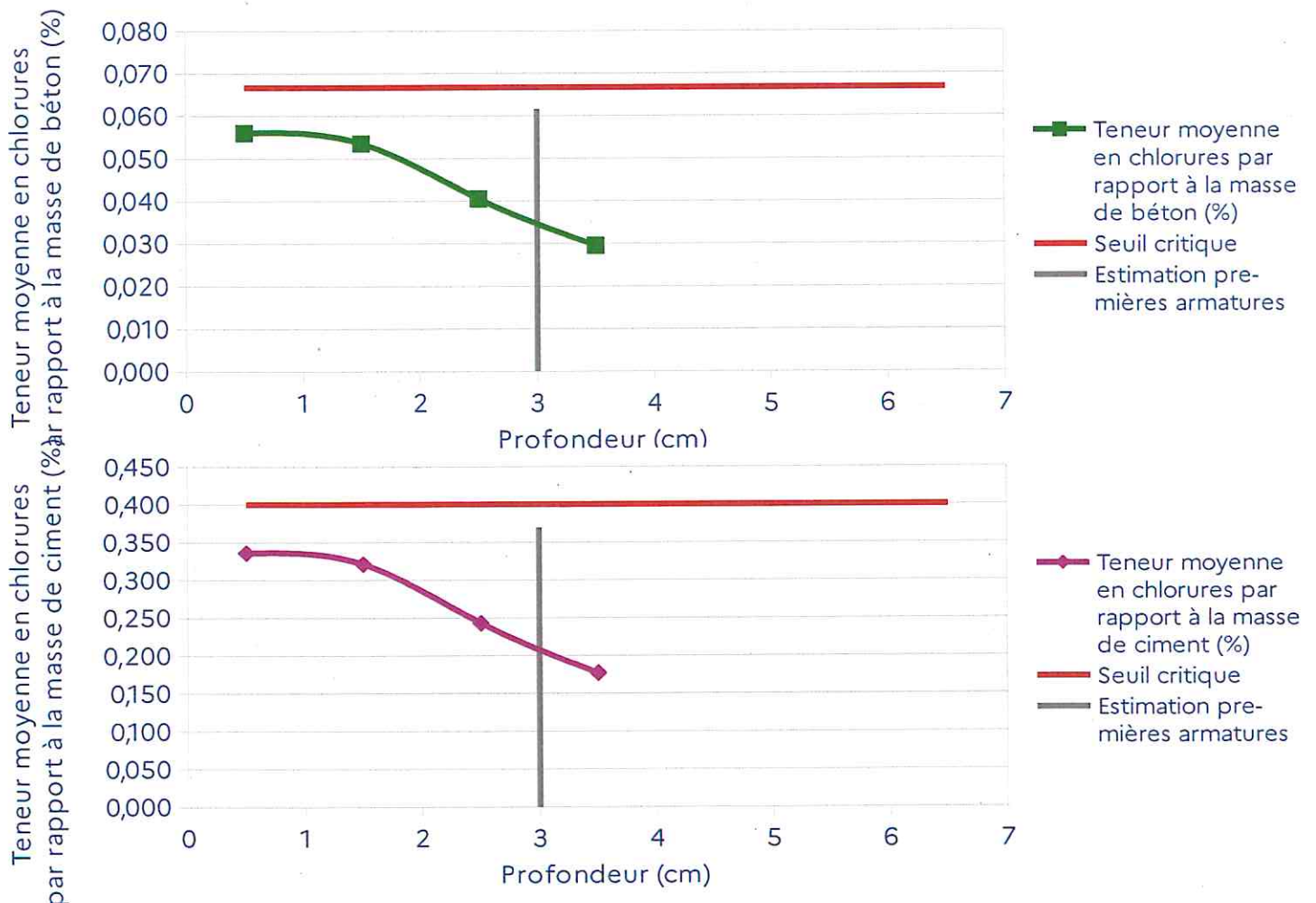
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00633	0,055	0,056	0,336
		0,057		
1-2	5,00688	0,052	0,054	0,321
		0,055		
2-3	5,00986	0,039	0,041	0,243
		0,042		
3-4	5,00478	0,029	0,030	0,177
		0,030		
4-5				
5-6				
6-7				



Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon

Nom de l'ouvrage :	Viaduc de la Roche	Année de construction :	1985
Nom de l'échantillon :	Pile P5 Face la Roche – CI-P-4	Date(s) de prélèvement :	09/06/21
Descriptif de la zone de prélèvement :	Base Pile P5 – Face la Roche		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais :	07-08/07/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres ☐ Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m ³) :	400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	2,7		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

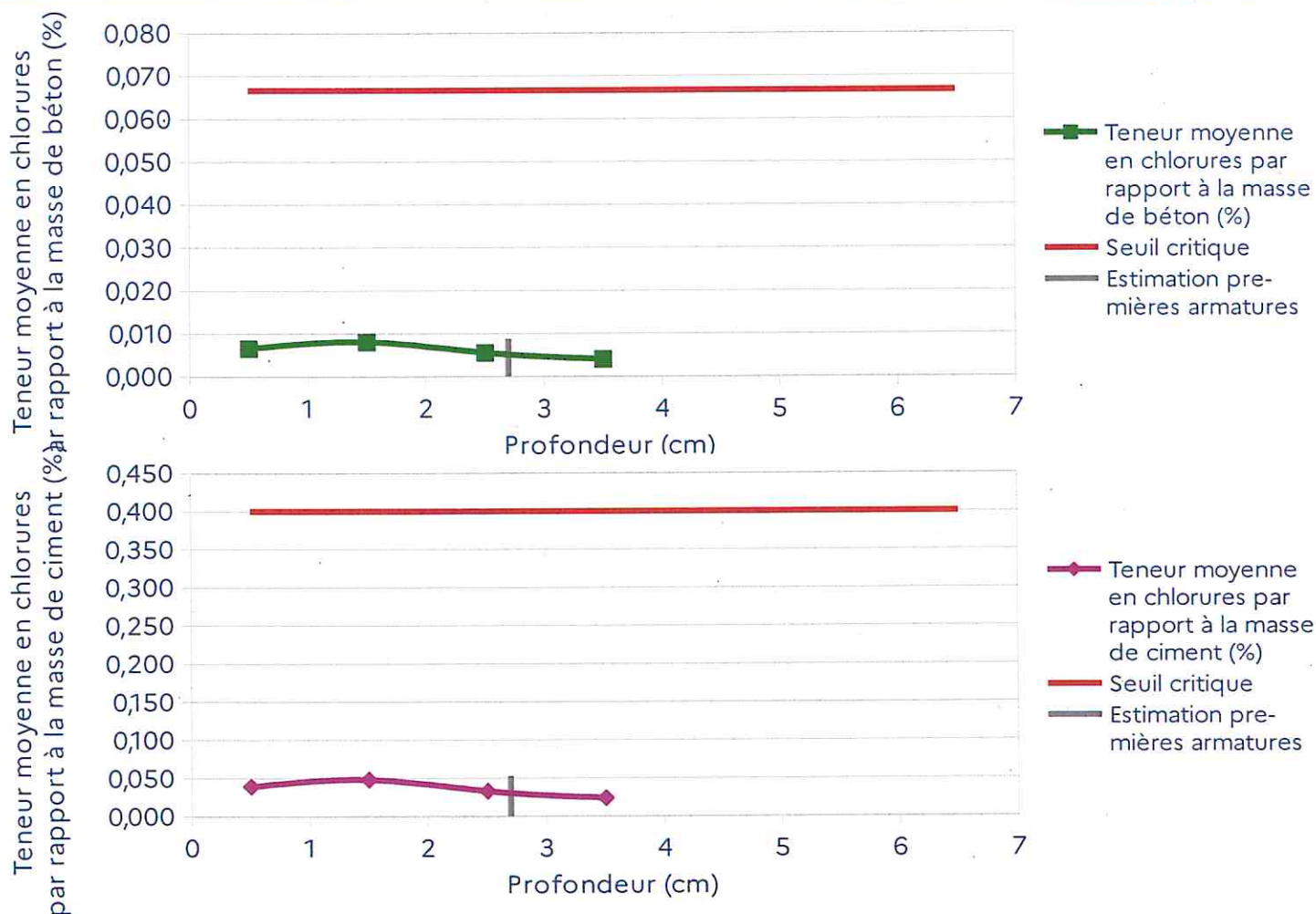
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00657	0,005	0,007	0,039
		0,008		
1-2	5,00430	0,009	0,008	0,048
		0,007		
2-3	5,00334	0,005	0,006	0,033
		0,006		
3-4	5,00600	0,005	0,004	0,024
		0,003		
4-5				
5-6				
6-7				



Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
 totaux d'un béton

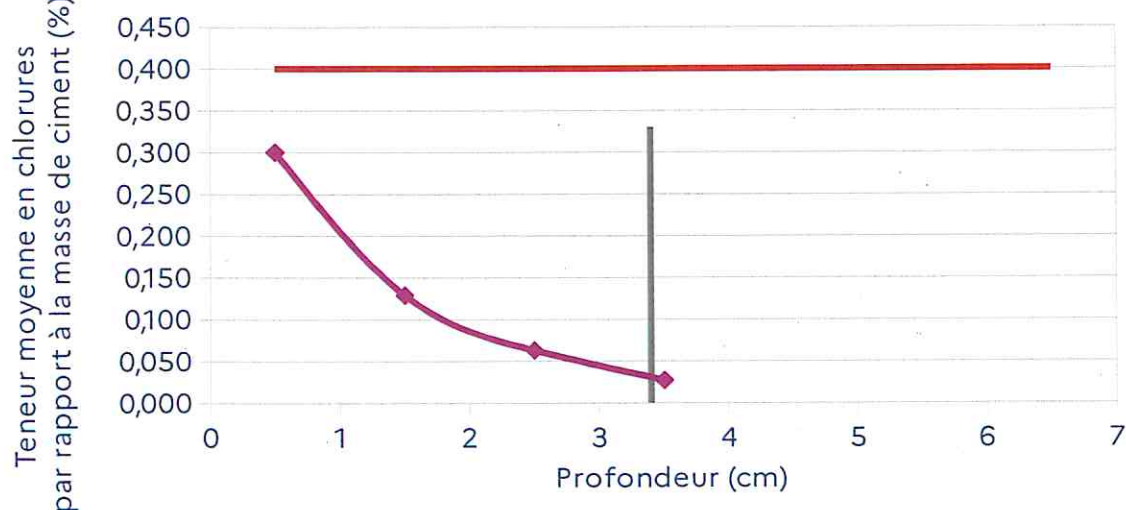
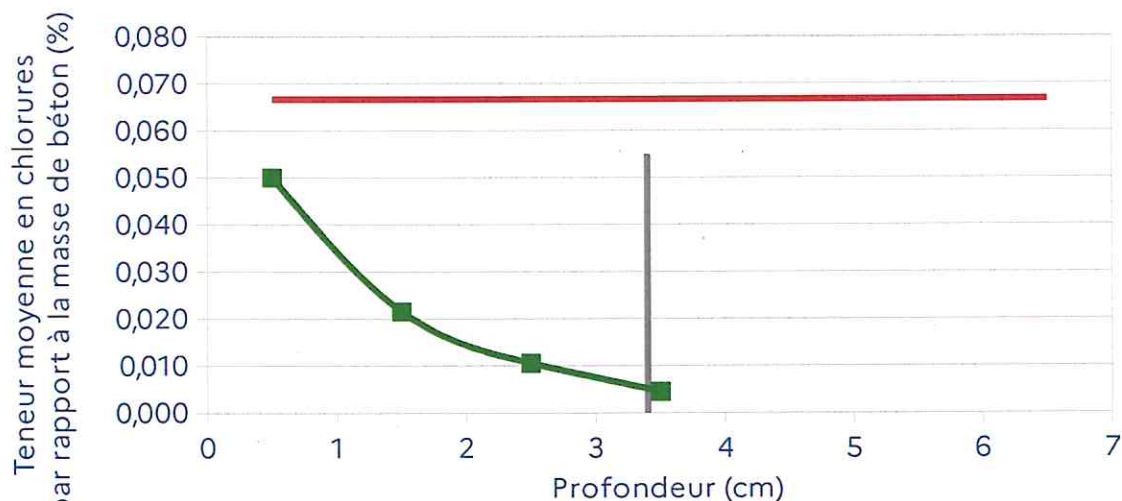
N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon

Nom de l'ouvrage :	Viaduc de la Roche	Année de construction :	1985
Nom de l'échantillon :	C9 – Front – Cl-C-1	Date(s) de prélèvement :	04/06/21
Descriptif de la zone de prélèvement :	Culée C9 – Face avant du chevet		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais :	23-24/06/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres ☐ Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	3,4		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage				
Balance: modèle 1404 MP de Sartorius				
Étuve: modèle MP115 de Binder				
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm				
Résultats des essais				
La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.				
Chlorures libres				
Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00776	0,051	0,050	0,300
		0,049		
1-2	5,00932	0,022	0,022	0,129
		0,021		
2-3	5,00502	0,009	0,011	0,063
		0,012		
3-4	5,00369	0,004	0,005	0,027
		0,005		
4-5				
5-6				
6-7				



Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
 totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon

Nom de l'ouvrage :	Viaduc de la Roche	Année de construction :	1985
Nom de l'échantillon :	C9-GG-CI-C-2	Date(s) de prélèvement :	04/06/21
Descriptif de la zone de prélèvement :	Culée C9 – Mur garde-grève		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais :	23-24/06/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres ☐ Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m ³) :	400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	3,4		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

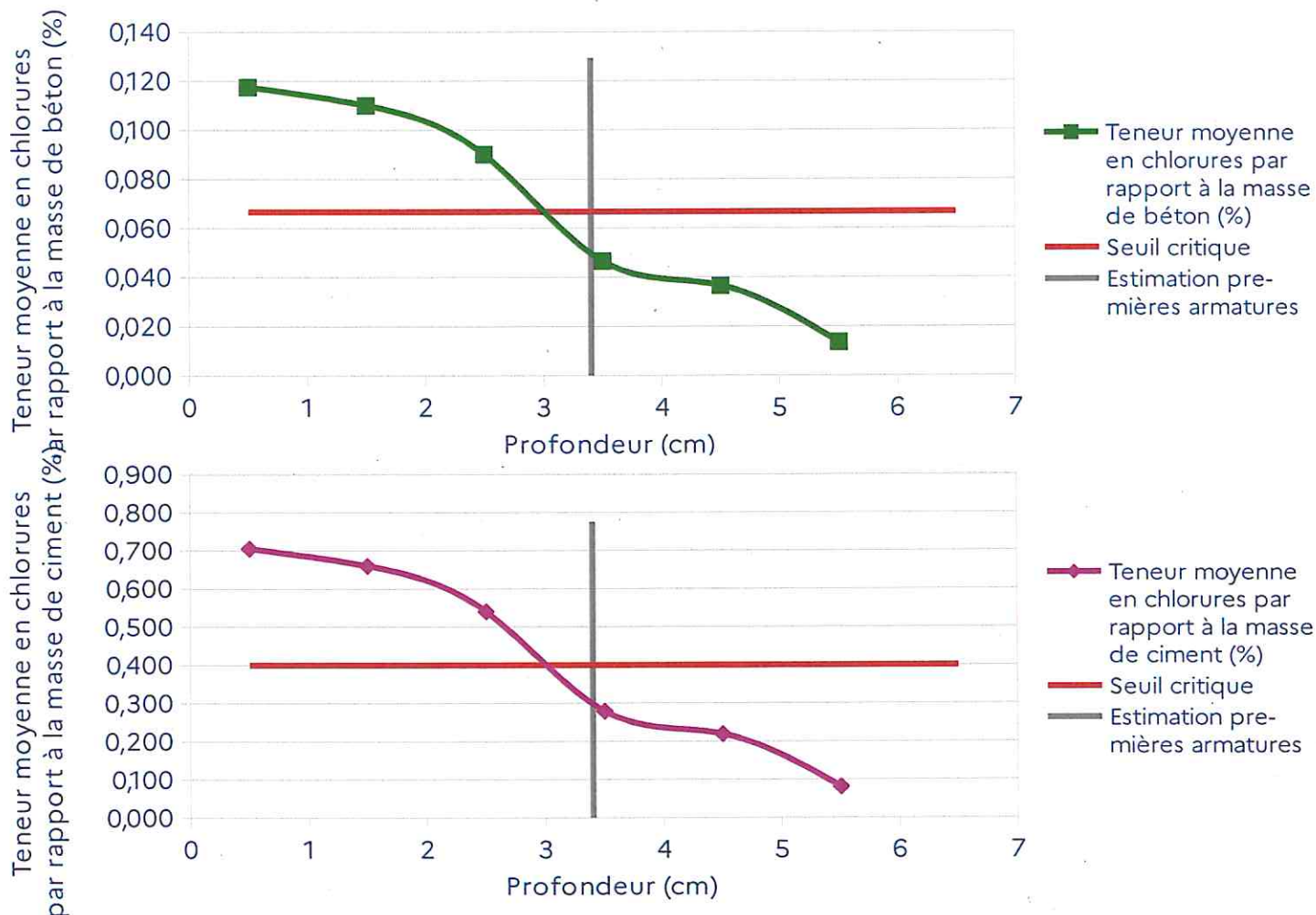
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00630	0,116	0,118	0,705
		0,119		
1-2	5,00458	0,109	0,110	0,660
		0,111		
2-3	5,00647	0,091	0,090	0,540
		0,089		
3-4	5,00897	0,046	0,047	0,279
		0,047		
4-5	5,00303	0,036	0,037	0,219
		0,037		
5-6	5,00774	0,014	0,014	0,081
		0,013		
6-7				



Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon				
Nom de l'ouvrage: Viaduc de la Roche		Année de construction : 1985		
Nom de l'échantillon : Corniche T6 – CI-C-1		Date(s) de prélèvement : 08/06/21		
Descriptif de la zone de prélèvement :		Corniche côté la Roche – Travée T6 : Face arrière		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte	
Date(s) des essais : 07-08/07/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres	☐ Chlorures totaux	
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :		400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :		3,5		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

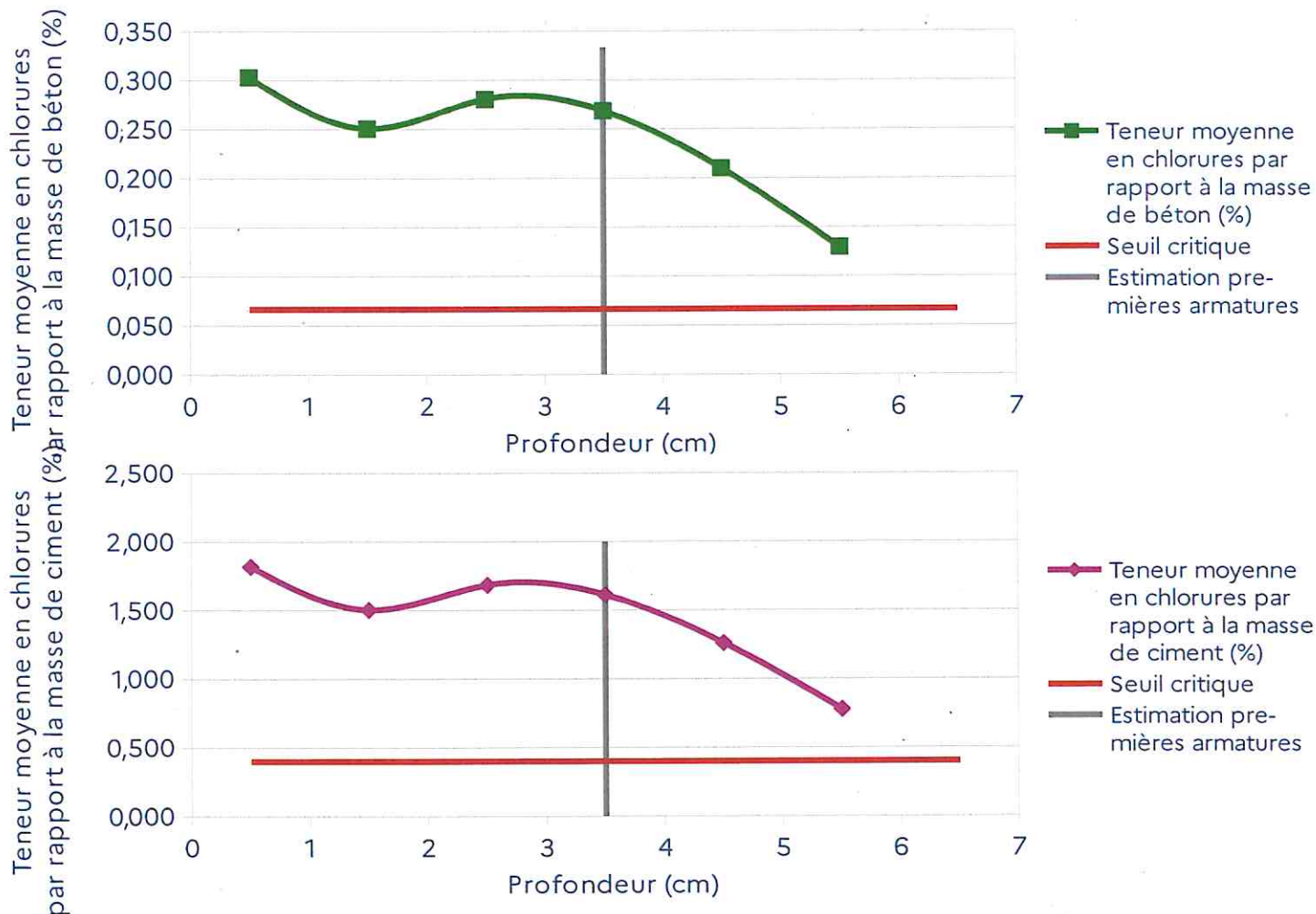
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00145	0,302	0,303	1,818
		0,304		
1-2	5,00866	0,248	0,251	1,503
		0,253		
2-3	5,00172	0,278	0,281	1,683
		0,283		
3-4	5,00338	0,268	0,269	1,611
		0,269		
4-5	5,00656	0,207	0,210	1,260
		0,213		
5-6	5,00324	0,129	0,130	0,777
		0,130		
6-7				

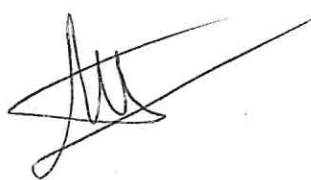


Procès Verbal d'essai

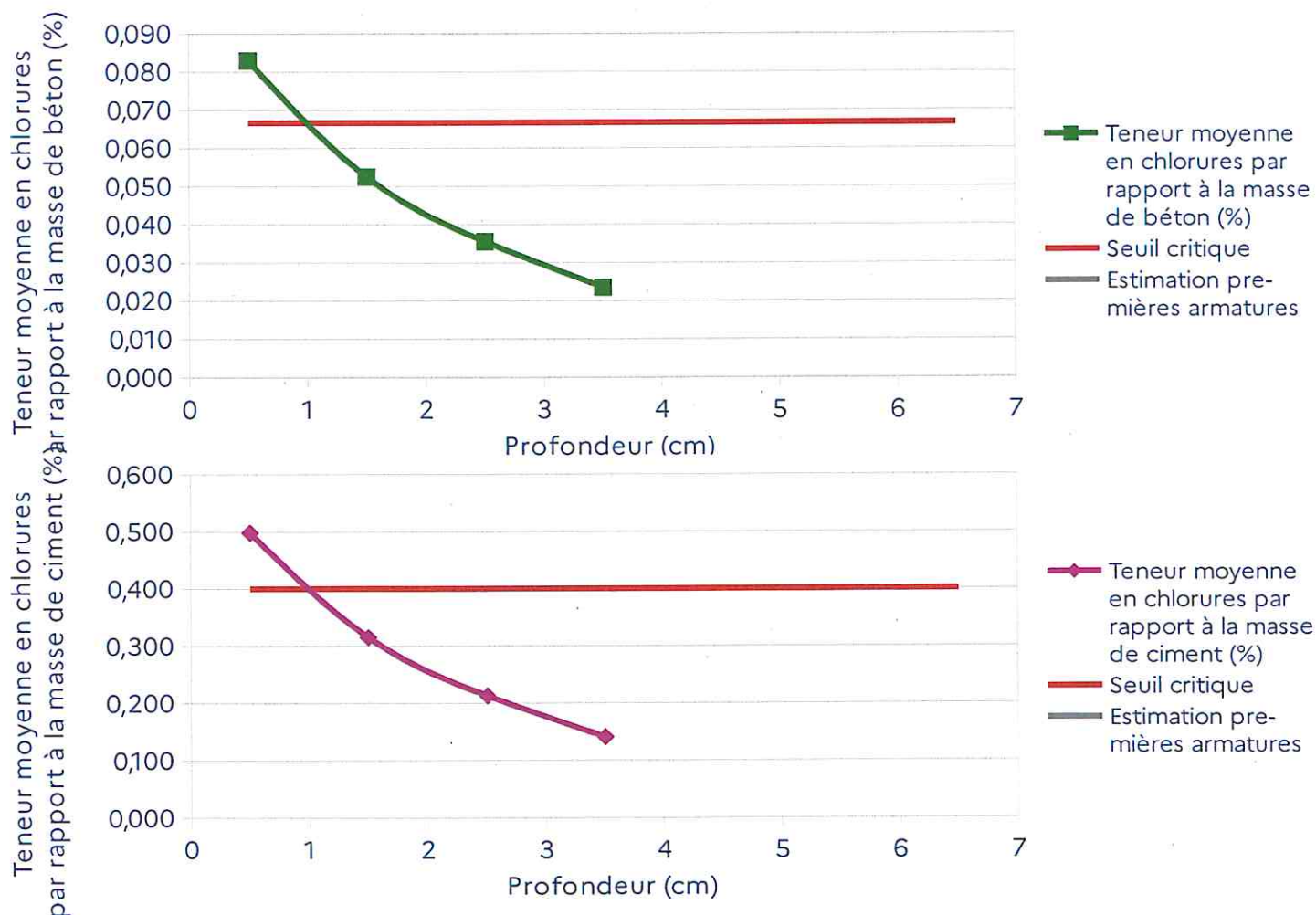
Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon					
Nom de l'ouvrage :	Viaduc de la Roche			Année de construction :	1985
Nom de l'échantillon :	Longrine			Date(s) de prélèvement :	04/06/21
Descriptif de la zone de prélèvement :	Longrine côté la Roche – Extrémité Mâcon				
Type d'échantillonnage :	☒	Poudre	☐	Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais :	23-24/06/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒	Chlorures libres	☐ Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m ³) :				400	
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :				N.D.	

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage				
Balance: modèle 1404 MP de Sartorius				
Étuve: modèle MP115 de Binder				
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm				
Résultats des essais				
La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.				
Chlorures libres				
Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00473	0,084	0,083	0,498
		0,082		
1-2	5,00874	0,053	0,053	0,315
		0,052		
2-3	5,00806	0,034	0,036	0,213
		0,037		
3-4	5,00831	0,025	0,024	0,141
		0,022		
4-5				
5-6				
6-7				



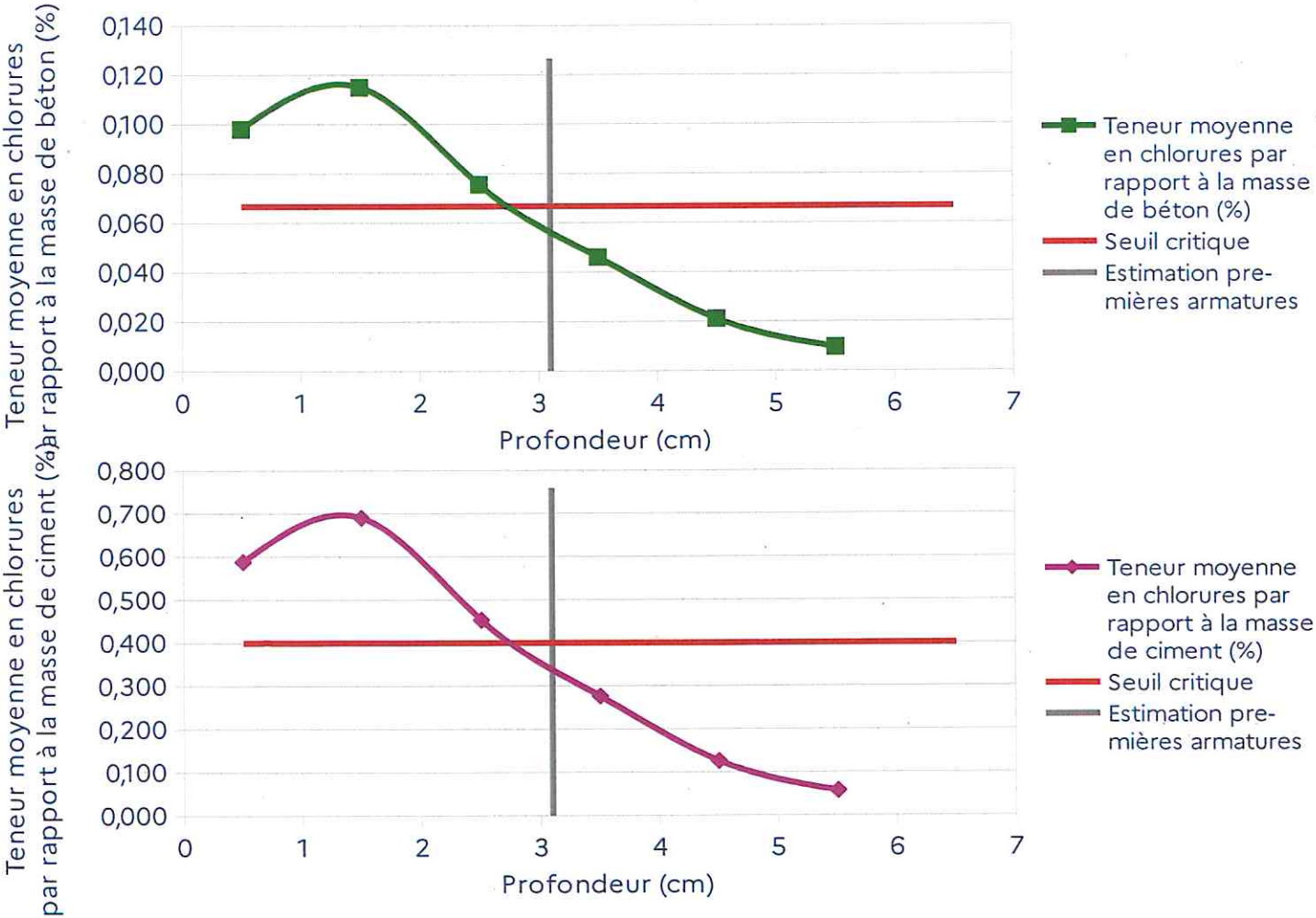
Procès Verbal d'essai
*Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton*

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon				
Nom de l'ouvrage: Viaduc de la Roche		Année de construction : 1985		
Nom de l'échantillon : Âme T4 – Cl-A-2		Date(s) de prélèvement : 07/06/21		
Descriptif de la zone de prélèvement :		Âme travée T4 – Zone avec écoulements		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte	
Date(s) des essais : 07-08/07/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres	☐ Chlorures totaux	
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :		400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :		3,1		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage				
Balance: modèle 1404 MP de Sartorius				
Étuve: modèle MP115 de Binder				
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm				
Résultats des essais				
La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.				
Chlorures libres				
Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,0031	0,099	0,098	0,588
		0,097		
1-2	5,00693	0,112	0,115	0,690
		0,118		
2-3	5,00184	0,077	0,076	0,453
		0,074		
3-4	5,00537	0,045	0,046	0,276
		0,047		
4-5	5,00208	0,020	0,021	0,126
		0,022		
5-6	5,00326	0,010	0,010	0,057
		0,009		
6-7				



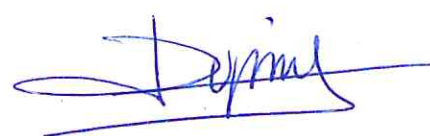
Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

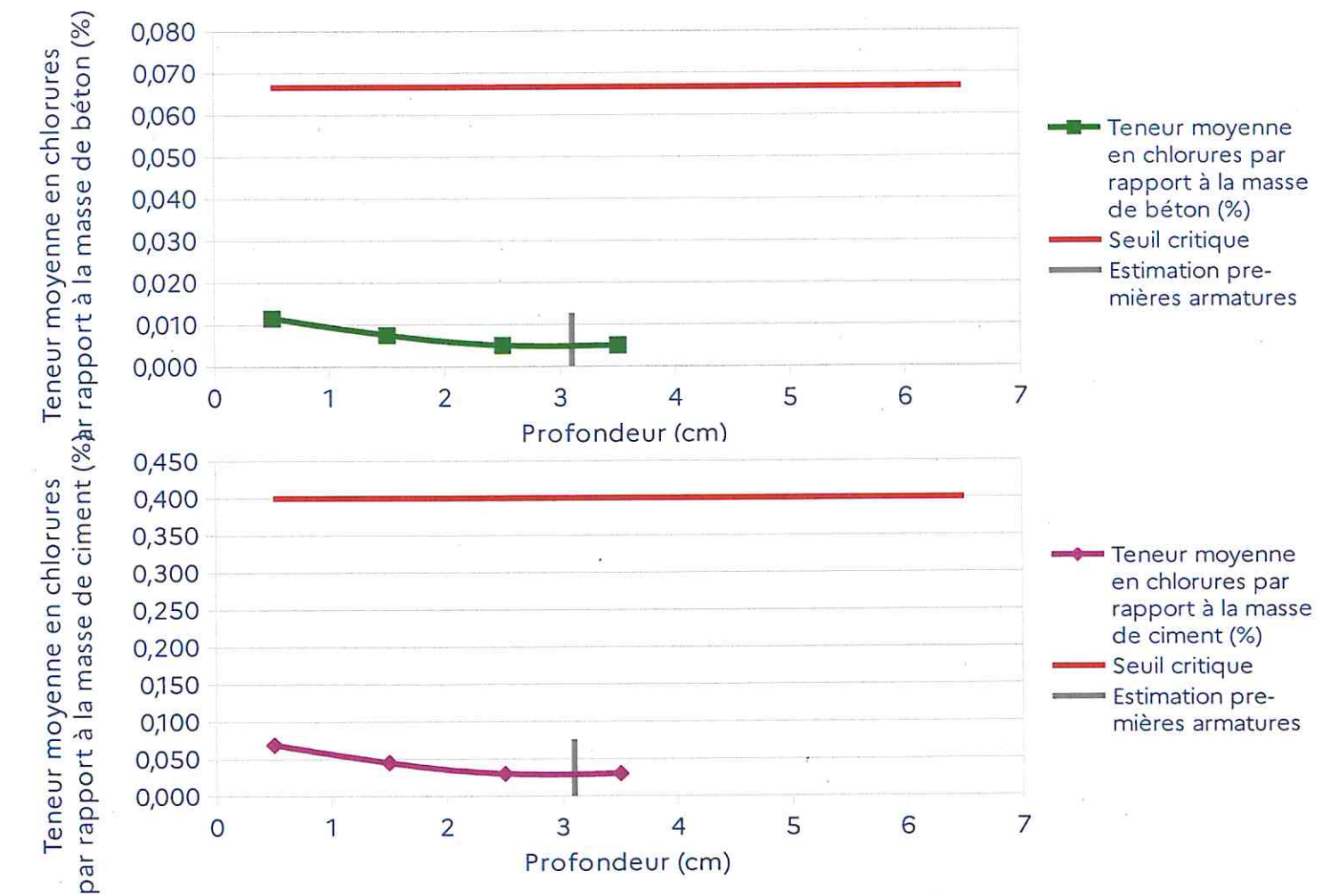
N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon

Nom de l'ouvrage :	Viaduc de la Roche	Année de construction :	1985
Nom de l'échantillon :	Cl-A-3	Date(s) de prélèvement :	08/06/21
Descriptif de la zone de prélèvement :	Âme travée T6 – Zone saine		
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais :	24-25/06/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres ☐ Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m ³) :	400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	3,1		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage				
Balance: modèle 1404 MP de Sartorius				
Étuve: modèle MP115 de Binder				
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm				
Résultats des essais				
La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.				
Chlorures libres				
Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00733	0,011	0,012	0,069
		0,012		
1-2	5,00565	0,006	0,008	0,045
		0,009		
2-3	5,00679	0,006	0,005	0,030
		0,004		
3-4	5,00348	0,006	0,005	0,030
		0,004		
4-5				
5-6				
6-7				

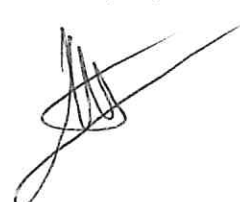


Procès Verbal d'essai

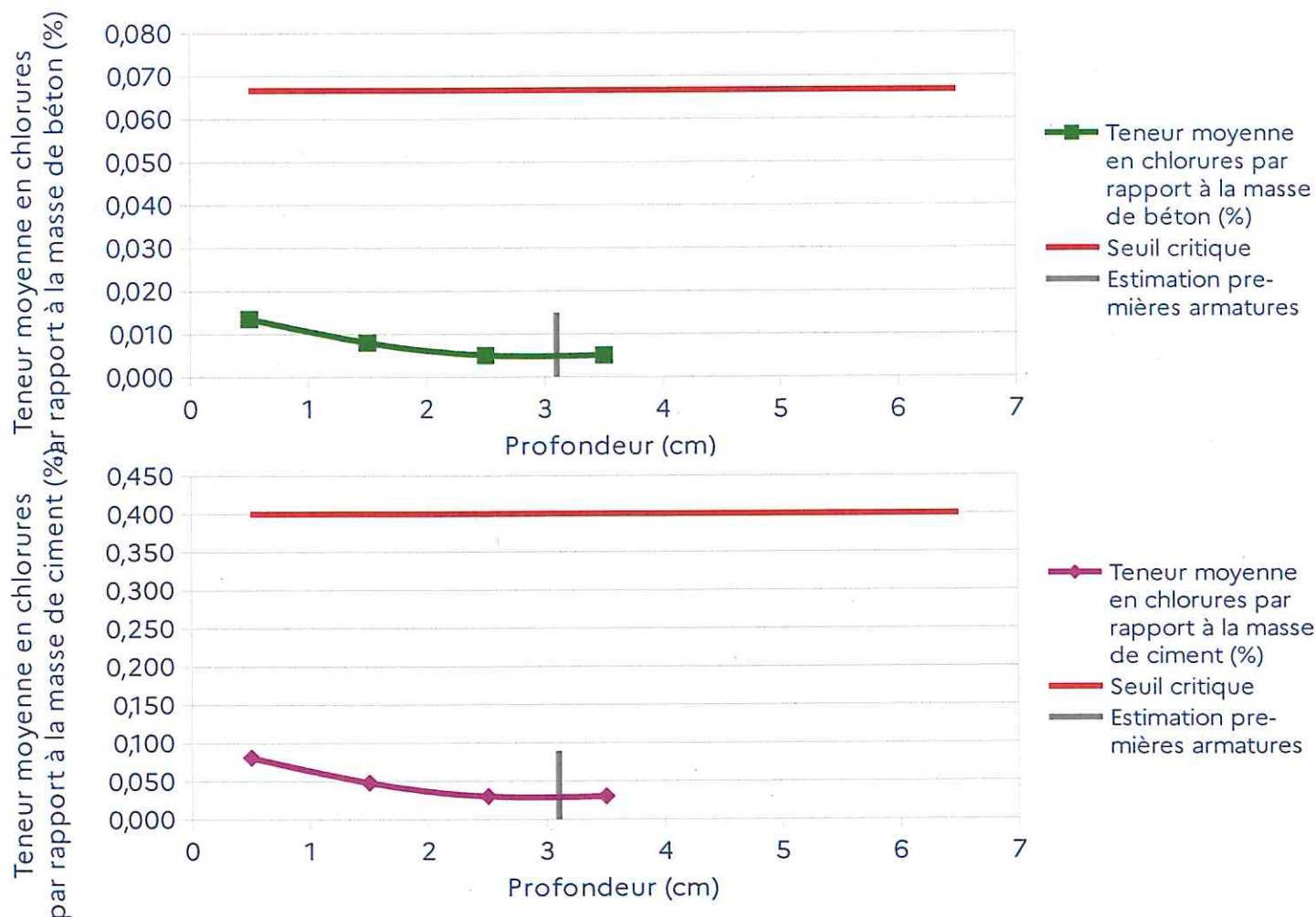
Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon					
Nom de l'ouvrage: Viaduc de la Roche		Année de construction : 1985			
Nom de l'échantillon : Âme T4 CI-A-1		Date(s) de prélèvement : 07/06/21			
Descriptif de la zone de prélèvement :		Âme travée T4 – zone saine			
Type d'échantillonnage :	☒	Poudre	☐	Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais : 29-30/06/2021	Profil(s) demandé(s) :		☒	Chlorures libres	Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :			400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :			3,1		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage				
Balance: modèle 1404 MP de Sartorius				
Étuve: modèle MP115 de Binder				
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm				
Résultats des essais				
La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.				
Chlorures libres				
Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00266	0,014	0,014	0,081
		0,013		
1-2	5,00658	0,008	0,008	0,048
		0,008		
2-3	5,00326	0,004	0,005	0,030
		0,006		
3-4	5,00523	0,005	0,005	0,030
		0,005		
4-5				
5-6				
6-7				



Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon					
Nom de l'ouvrage: Viaduc de la Roche		Année de construction : 1985			
Nom de l'échantillon : Encorbellement CI-E-1		Date(s) de prélèvement : 07/06/21			
Descriptif de la zone de prélèvement :		Encorbellement travée T4 – Zone avec écoulements			
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre	☐ Fragment	☐ Carotte		
Date(s) des essais : 08-09/07/2021	Profil(s) demandé(s) :	☒ Chlorures libres	☐ Chlorures totaux		
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :		400			
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :		2,5			

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

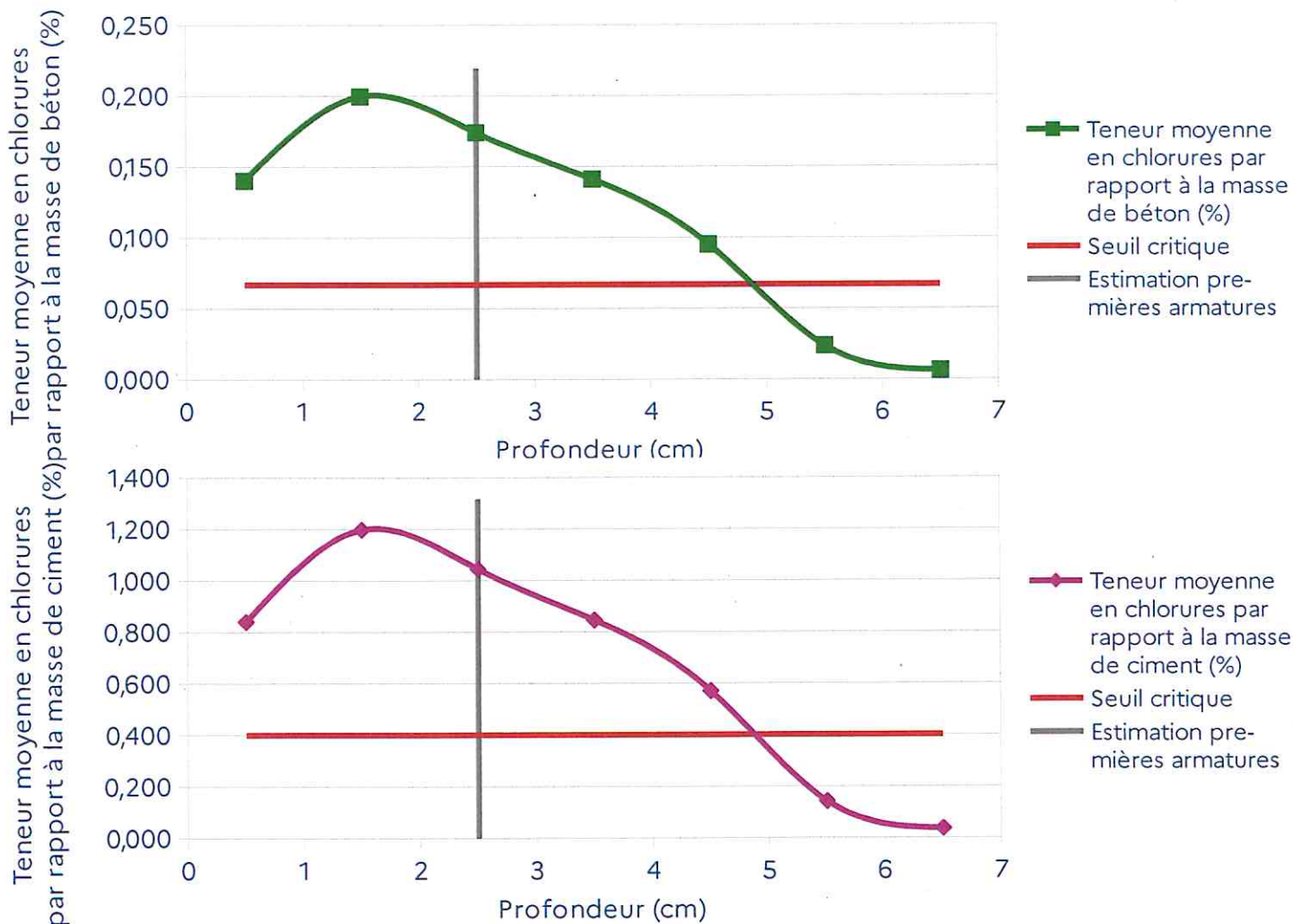
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00107	0,141	0,140	0,840
		0,139		
1-2	5,00185	0,199	0,200	1,197
		0,200		
2-3	5,00709	0,171	0,174	1,044
		0,177		
3-4	5,00503	0,141	0,141	0,846
		0,141		
4-5	5,00674	0,094	0,095	0,570
		0,096		
5-6	5,00740	0,024	0,024	0,141
		0,023		
6-7	5,00738	0,006	0,006	0,036
		0,006		



Procès Verbal d'essai

Détermination du profil de teneur en chlorures libres et/ou
totaux d'un béton

N°affaire
21-CE-0762
Client
DIR Centre-Est
Libellé de l'affaire
Investigations sur le viaduc de la Roche

Informations sur l'échantillon					
Nom de l'ouvrage: Viaduc de la Roche		Année de construction : 1985			
Nom de l'échantillon : Hourdis T2 CI-H-2		Date(s) de prélèvement : 07/06/21			
Descriptif de la zone de prélèvement :		Hourdis travée T2 – Zone avec écoulements			
Type d'échantillonnage :	☒	Poudre	☐	Fragment	☐ Carotte
Date(s) des essais : 08-09/07/2021	Profil(s) demandé(s) :		☒	Chlorures libres	Chlorures totaux
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :			400		
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :			2,6		

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN-DUPIN	09/07/21 
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	28/04/22 

Appareillage

Balance: modèle 1404 MP de Sartorius

Étuve: modèle MP115 de Binder

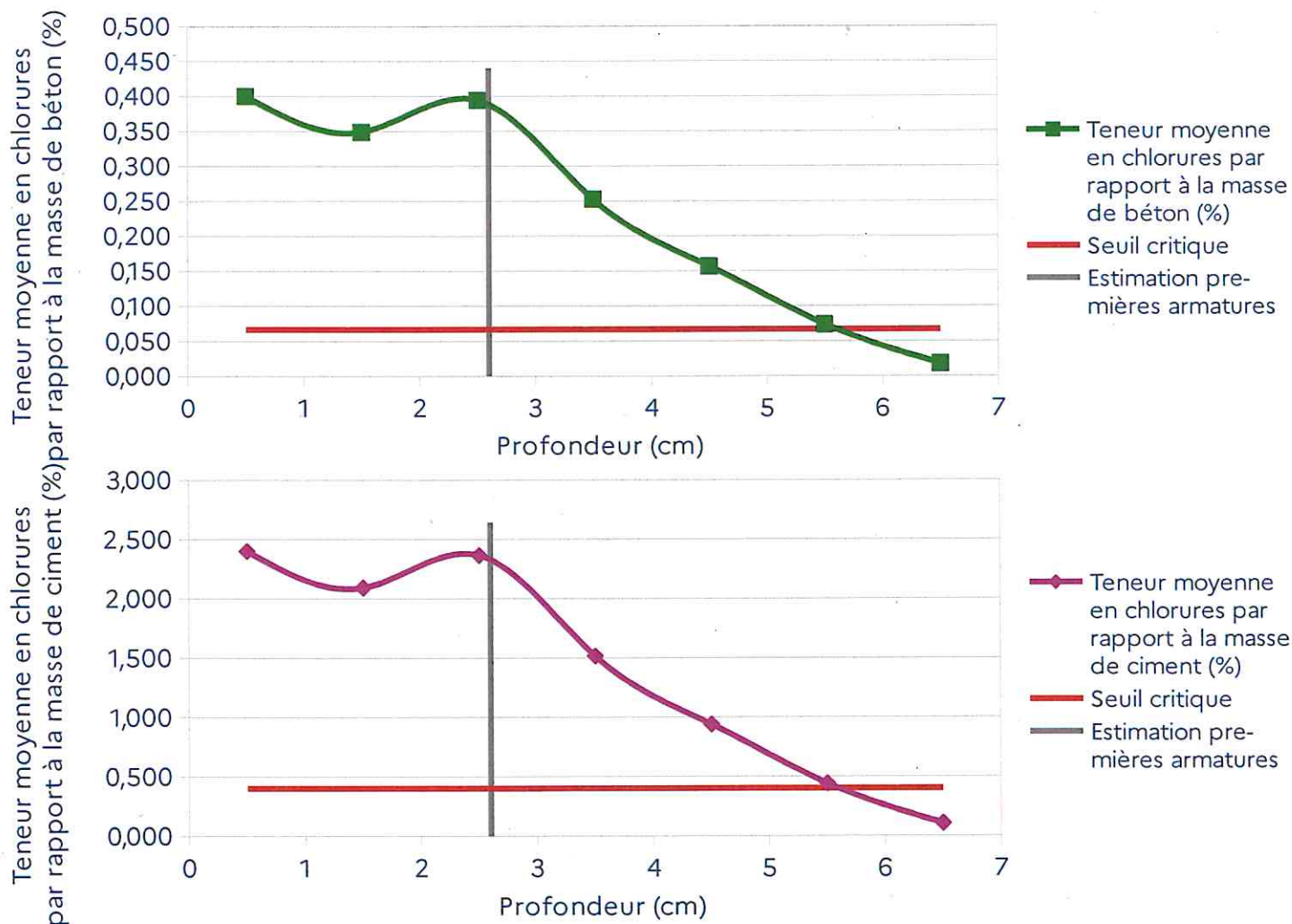
Titrateur: modèle 848 Titrino Plus de Metrohm

Résultats des essais

La mesure du taux de chlorures libres et totaux dans le béton est effectuée conformément au mode opératoire décrit dans le recueil de l'AFPC-AFREM de 1998 ainsi que conformément à la norme NF EN 14629. Deux déterminations sont réalisées par tranche d'épaisseur.

Chlorures libres

Profondeur (cm)	Masse échantillon (g)	Teneur en chlorures mesurée (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de béton (%)	Teneur moyenne en chlorures par rapport à la masse de ciment (%)
0-1	5,00231	0,399	0,400	2,400
		0,401		
1-2	5,00406	0,348	0,349	2,091
		0,349		
2-3	5,00645	0,392	0,394	2,364
		0,396		
3-4	5,00734	0,253	0,253	1,515
		0,252		
4-5	5,00474	0,156	0,157	0,939
		0,157		
5-6	5,00439	0,072	0,074	0,441
		0,075		
6-7	5,00412	0,017	0,018	0,105
		0,018		



Annexe D - Guide technique « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » du LCPC de décembre 2002 (pages 44-45) + logigramme de la fiche D1-1 du cahier interactif UGE-Cerema « Auscultations des ouvrages d'art »

Guide Technique ✦ Protection des bétons par application de produits à la surface du parement

Le tableau suivant donne pour chaque défaut rencontré, les familles de systèmes utilisables.

Systèmes	Lasures	Peintures	Revêtements
Défauts			
Variations de teintes		X	X
Tâches noires		X	X
Pommelages		X	X
Traces de rouille		X	X
Ressuage		X	X
Nids de sable ou de cailloux	X après ragréage	X après ragréage	X après ragréage
Bullage			X
Fissures			X souples

Mise en peinture après ragréage



✦ État de la corrosion

Le tableau suivant indique ce que l'on peut faire en fonction des taux de carbonatation et de chlorures.

Cas possibles	Atteinte des armatures par la carbonatation ?		Taux de chlorures au niveau de la première nappe d'armatures en % de Cl^- / poids du béton				Actions
	NON	OUI	< 0,01 %	0,01 %	< % Cl^- < 0,10 %	> 0,10 %	
1	X		X				Aucune protection n'est nécessaire, sauf à titre préventif.
2	X				X		Ralentir la pénétration des chlorures supplémentaires à l'aide de peintures ou revêtements ou inhiber la réaction à l'aide d'inhibiteurs qualifiés.

Critères de choix de la protection

Cas possibles	Atteinte des armatures par la carbonatation ?		Taux de chlorures au niveau de la première nappe d'armatures en % de Cl^- / poids du béton				Actions
	NON	OUI	< 0,01 %	0,01 %	< % Cl^- < 0,10 %	> 0,10 %	
3	X					X	Diminuer le taux de chlorures par une technique d'extraction adaptée pour se ramener au cas n° 2
4		X	X				La corrosion est forcément commencée et ne peut que se développer. Augmenter le pH par réalcalinisation ou utiliser des inhibiteurs efficaces. Ce traitement peut être complété par l'application de revêtements qualifiés vis-à-vis de la résistance à la pénétration des gaz. Dans certains cas il sera plus économique, sous réserve d'absence de conséquences structurelles, d'éliminer et remplacer le béton atteint, sans oublier de traiter les aciers dégagés.
5		X			X		Combiner les actions 2 et 4
6		X				X	Combiner les actions 3 et 4

Nota : le % de Cl^- est exprimé ici par rapport au poids du béton alors que la norme NF EN 196-21 l'exprime en fonction du poids de ciment.

✖ État du béton vis-à-vis du gel

Il faut déterminer visuellement et par sondages si le béton a subi ou non des dégradations par cycles de gel-dégel (délitages, écaillage, gonflements). Il faut distinguer le cas d'un gel interne de celui d'un écaillage en présence de sels de déverglaçage.

Dans le cas où le béton présente des symptômes de gel interne, des réparations de grande ampleur, nécessitant l'élimination des parties dégradées, sont nécessaires : **il n'existe pas de moyen pour arrêter ou même ralentir le gel du béton dans sa masse. L'application d'un système de protection sur un tel béton n'a aucun effet.**

Si le béton a subi des dégradations dues aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage, l'écaillage superficiel qui en résulte devra être éliminé avant toute application de produit.

Pour un béton apparemment sain mais pouvant être soumis à de tels cycles, on vérifiera à la fois sa résistance au gel interne (par mesure du facteur d'espacement des bulles d'air ou par essais de résistance au gel-dégel sur prélèvements) et sa résistance à l'écaillage.

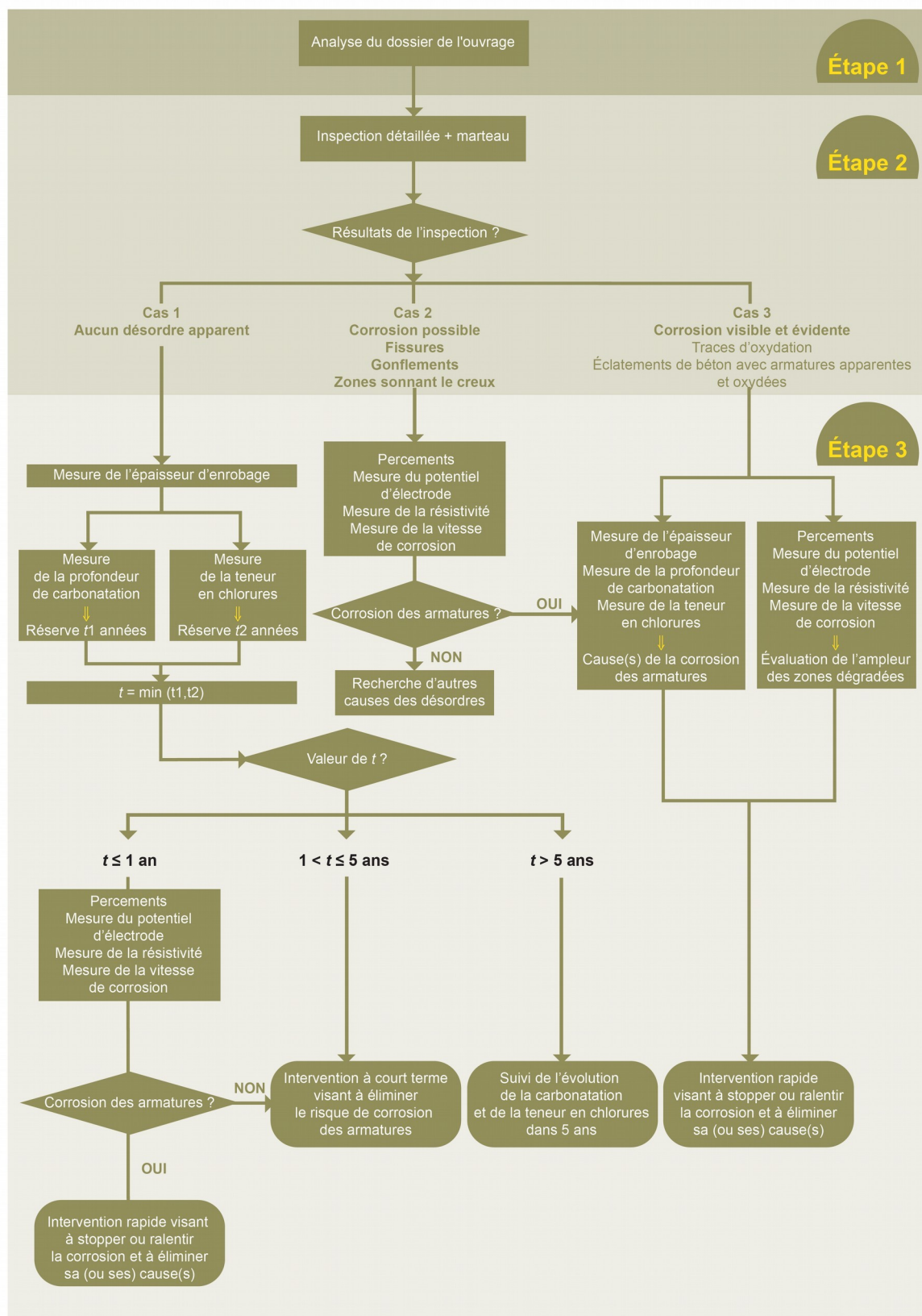
Les systèmes de protection seront jugés efficaces contre l'écaillage si cet écaillage est nul après 56 cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

Les inhibiteurs et les imprégnations ne sont pas qualifiables vis-à-vis du gel. Leur utilisation en protection nécessite de vérifier leur efficacité par des essais préalables sur le béton de l'ouvrage.

✖ État du béton vis-à-vis d'une réaction de gonflement interne

Le suivi du gonflement des ouvrages soupçonnés d'être atteints d'une réaction de gonflement interne est généralement assuré par distancemétrie et mesure de l'indice de fissuration (méthode d'essai LPC n° 47) dont le suivi dans le temps permet d'apprécier l'évolution du phénomène.

D1-1 : DIAGNOSTIC DE CORROSION DU BÉTON ARMÉ



Annexe E - Mesures électrochimiques réalisées sur le viaduc de La Roche

Face avant du chevron de la culée C9

Mesures de résistivité électrique du béton :

Mesures de résistivité prises dans les mailles du ferrillage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures).

L'appareil utilisé est le Resipod® de la société Proceq

résistivité électrique du béton d'enrobage (kΩ.cm)										
Valeur moyenne des mesures réalisées en étoile dans chaque maille (kΩ.cm)										
	avant 1	entre 1 et 2	entre 2 et 3	entre 3 et 4	entre 4 et 5	entre 5 et 6	entre 6 et 7	entre 7 et 8	entre 8 et 9	entre 9 et 10
avant A		168	171	212	264	135	94	175	118	188
entre A et B		198	134	108	153	97	135	116	112	160
entre B et C		164	116	118	106	98	118	175	128	
entre C et D		161	132	122	116	138	101	146	119	112
entre D et E		150	150	123	123	111	95	116	125	
entre E et F		95	95	100	93	105	86	121	123	121
entre F et G		346	134	114	106	95	90	103	146	201

À titre indicatif, la proportion de mesures de résistivité dans les différentes classes de risque de corrosion proposées par la recommandation RILEM TC154, pour béton CEM I, est présentée dans le tableau ci-après.

Résistivité électrique (kΩ.cm)*	Risque de corrosion*	Pourcentage de mesures
$Re \geq 100$	Négligeable	82%
$50 \leq Re < 100$	Faible	18%
$10 \leq Re < 50$	Modéré	0%
$Re < 10$	Elevé	0%

(*) : classement et valeur seuils établis à 20°C pour un béton CEM I (RILEM TC 154 – résistivité, Tab2)

Les mesures de résistivité du béton semblent mettre en évidence un béton peu favorable à la propagation de la corrosion.

Potentiels d'armatures :

Les mesures de potentiels sont obtenues avec le Profometer® de Proceq. Les mesures sont réalisées au droit des armatures avec un pas de 10 cm.

Type d'électrode de référence : Cu / Cu++SO4--

Les tableaux suivants présentent les résultats des mesures de potentiels sur les armatures verticales qui correspondent aux armatures les plus proches du parement. Les résultats sont présentés sous la forme de deux tableaux : un tableau donnant les résultats des potentiels et un tableau présentant les gradients de potentiels entre deux mesures consécutives sur une même armature.

Chevron de la culée C9 - armatures verticales (POTENTIELS mV)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-166	-188	-196	-199	-230	-250	-262	-260	-193
10	-182	-190	-201	-152	-201	-208	-205	-242	-187
20	-187	-179	-178	-165	-239	-219	-201	-225	-193
30	-213	-194	-174	-172	-210	-212	-199	-226	-189
40	-234	-209	-160	-208	-188	-197	-190	-200	-178
50	-219	-243	-166	-231	-207	-195	-200	-205	-188
60	-226	-236	-189	-225	-206	-198	-212	-186	-204
70	-247	-246	-194	-243	-229	-224	-219	-212	-191
80	-250	-253	-199	-233	-194	-206	-226	-206	-200
90	-263	-243	-200	-228	-199	-201	-200	-210	-203
100	-228	-244	-221	-235	-196	-216	-211	-219	-197
110	-248	-239	-217	-244	-216	-233	-239	-247	-200
120	-257	-265	-224	-258	-225	-244	-241	-247	-224
130	-289	-308	-276	-297	-272	-285	-276	-266	-286
140	-335	-350	-334	-342	-308	-344	-326	-359	-392
150	-359	-383	-369	-367	-336	-348	-363	-369	-415
160	-427	-447	-416	-413	-378	-411	-398	-424	-477

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiels sont données **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (voir tableau ci-après).

Potentiels d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion
> -200	Faible
-200 à -350	Moyenne
< -350	Forte

Il est rappelé que l'approche ASTM, basée sur des seuils, ne fait pas l'unanimité au sein de la communauté scientifique (influence de divers paramètres sur les valeurs de potentiels : enrobages, humidité, teneur en chlorures, carbonatation, etc.).

Les recommandations actuelles (RILEM TC154) préconisent d'étudier préférentiellement les gradients de potentiels.

Chevêtre de la culée C9 – armatures verticales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

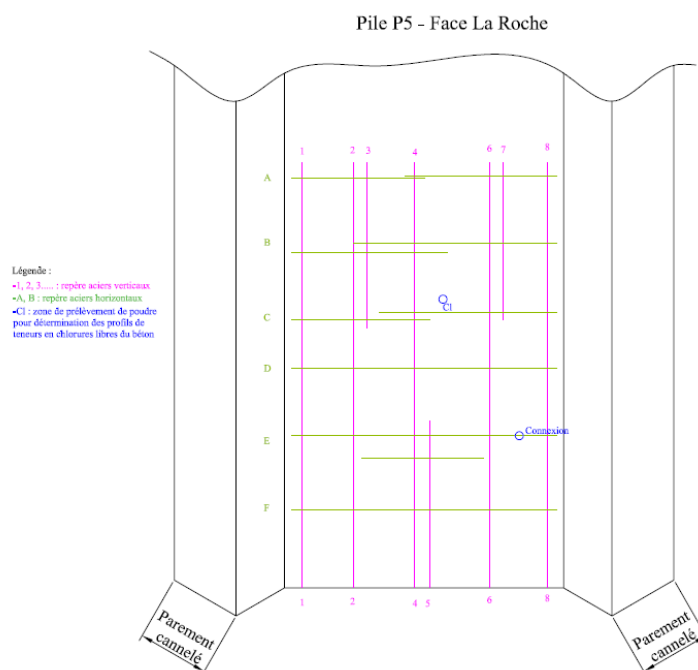
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0									
10	1,6	0,2	0,5	4,7	2,9	4,2	5,7	1,8	0,6
20	0,5	1,1	2,3	1,3	3,8	1,1	0,4	1,7	0,6
30	2,6	1,5	0,4	0,7	2,9	0,7	0,2	0,1	0,4
40	2,1	1,5	1,4	3,6	2,2	1,5	0,9	2,6	1,1
50	1,5	3,4	0,6	2,3	1,9	0,2	1	0,5	1
60	0,7	0,7	2,3	0,6	0,1	0,3	1,2	1,9	1,6
70	2,1	1	0,5	1,8	2,3	2,6	0,7	2,6	1,3
80	0,3	0,7	0,5	1	3,5	1,8	0,7	0,6	0,9
90	1,3	1	0,1	0,5	0,5	0,5	2,6	0,4	0,3
100	3,5	0,1	2,1	0,7	0,3	1,5	1,1	0,9	0,6
110	2	0,5	0,4	0,9	2	1,7	2,8	2,8	0,3
120	0,9	2,6	0,7	1,4	0,9	1,1	0,2	0	2,4
130	3,2	4,3	5,2	3,9	4,7	4,1	3,5	1,9	6,2
140	4,6	4,2	5,8	4,5	3,6	5,9	5	9,3	10,6
150	2,4	3,3	3,5	2,5	2,8	0,4	3,7	1	2,3
160	6,8	6,4	4,7	4,6	4,2	6,3	3,5	5,5	6,2

Les valeurs absolues plus électronégatives en partie inférieure de la zone auscultée peuvent avoir pour origine un béton plus humide (on se rapproche des parties enterrées) et ne sont pas forcément significative de corrosion (note : par rapport aux mesures de potentiel, les mesures de résistivité ont été arrêtées plus haut : leur fin correspond environ à la ligne 140 du tableau des mesures de potentiels).

Base de la pile P5 – face La Roche

La zone étudiée fait 125 cm de long pour 180 cm de haut et comprends 8 armatures verticales (numérotées de 1 à 8) et 6 armatures horizontales (armatures A à F). Sur les armatures verticales, 3 correspondent à des zones de recouvrement : les armatures n°3, 5 et 7

Aucun désordre n'a été relevé sur cette zone et les armatures les plus proches du parement sont les armatures horizontales.



Mesures de résistivité électrique du béton :

Mesures de résistivité prises dans les mailles du ferrailage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures).

L'appareil utilisé est le Resipod® de la société Proceq

	résistivité électrique du béton d'enrobage (kΩ.cm)						
	Valeur moyenne des mesures réalisées en étoile dans chaque maille (kΩ.cm)						
	entre 1 et 2	entre 2 et 3	entre 3 et 4	entre 4 et 5	entre 5 et 6	entre 6 et 7	entre 7 et 8
avant A							
entre A et B	76		120		138		112
entre B et C	126		118		129		95
entre C et D	199		181		141		126
entre D et E	136		124		105		135
entre E et F	115		104		111		95
entre F et G	92		96		86		57

A titre indicatif, la proportion de mesures de résistivité dans les différentes classes de risque de corrosion proposées par la recommandation RILEM TC154 pour béton CEM I est proposée ci-après.

Résistivité électrique (kΩ.cm)*	Risque de corrosion*	Pourcentage de mesures
$Re \geq 100$	Négligeable	71%
$50 \leq Re < 100$	Faible	29%
$10 \leq Re < 50$	Modéré	0%
$Re < 10$	Elevé	0%

(*) : Classement et valeur seuils établis à 20°C pour un béton CEM I (RILEM TC154 – Résistivité, Tab2)

Ces mesures indiquent que sur cette face les armatures se trouvent dans un béton peu propice au développement de la corrosion.

Potentiels d'armatures :

Les mesures de potentiels sont obtenues avec le Profometer® de Proceq. Les mesures sont réalisées au droit des armatures avec un pas de 10 cm.

Les tableaux suivants présentent les résultats des mesures de potentiels sur les armatures verticales et horizontales. Pour chaque orientation d'armatures, sont présentés un tableau donnant les résultats des potentiels et un autre tableau présentant les gradients entre deux mesures consécutives sur une même armature.

Armatures horizontales :

Pour une meilleure lisibilité, les tableaux ont été divisés en deux parties.

Base de la pile P5 face La Roche - armatures horizontales (POTENTIELS mV)

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
A	-75	-83	-73	-72	-71	-88	-93	-80	-352	-342	-295	-286	-310
B	-232	-189	-154	-158	-124	-134	-136	-119	-117	-142	-115	-121	-151
C	-127	-107	-92	-104	-87	-93	-105	-89	-87	-127	-105	-92	-135
D	-132	-132	-122	-127	-134	-132	-135	-124	-131	-156	-149	-128	-136
E	-210	-207	-186	-196	-193	-168	-170	-183	-179	-203	-258	-275	-193
F	-187	-173	-166	-175	-167	-169	-188	-182	-180	-203	-210	-231	-256

Les niveaux de couleur des valeurs de potentiel sont donnés **à titre indicatif** et correspondent aux différentes classes de risque de corrosion proposées par l'ancienne version de la norme ASTM (cf tableau ci-après).

Potentiels d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	81%
-200 à -350	Moyenne	18%
< -350	Forte	1%

Base de la pile P5 face La Roche – armatures horizontales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
A		0,8	1	0,1	0,1	1,7	0,5	1,3	27,2	1	4,7	0,9	2,4
B		4,3	3,5	0,4	3,4	1	0,2	1,7	0,2	2,5	2,7	0,6	3
C		2	1,5	1,2	1,7	0,6	1,2	1,6	0,2	4	2,2	1,3	4,3
D		0	1	0,5	0,7	0,2	0,3	1,1	0,7	2,5	0,7	2,1	0,8
E		0,3	2,1	1	0,3	2,5	0,2	1,3	0,4	2,4	5,5	1,7	8,2
F		1,4	0,7	0,9	0,8	0,2	1,9	0,6	0,2	2,3	0,7	2,1	2,5

Des gradients localisés supérieurs à 8-10 mV/cm peuvent être l'indication de zones anodiques et donc de présence de corrosion.

Les potentiels sont dans l'ensemble assez peu électro-négatifs. Cependant, et contrairement à ce que pourrait laisser penser les témoins de durabilité, les mesures électrochimiques suggèrent un fort risque de corrosion sur l'armature A entre 80 et 120 cm (gradient de potentiel très élevé et potentiels assez électro-négatifs en comparaison avec le reste de la zone).

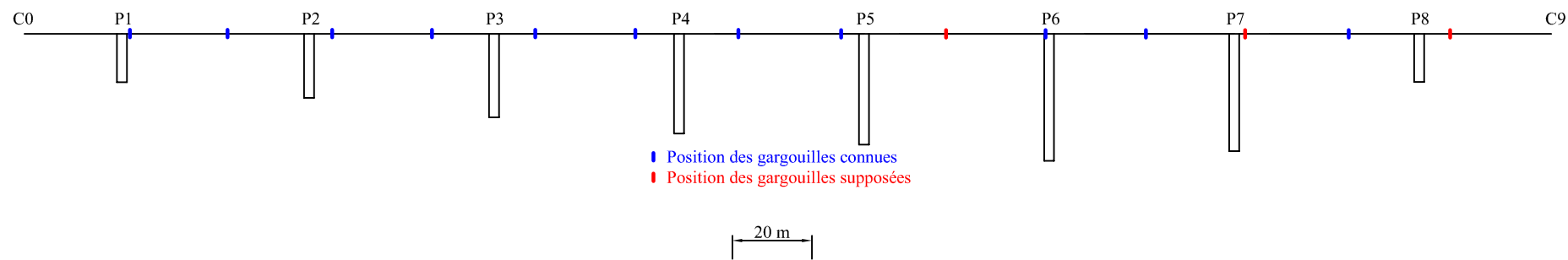
Ces mesures mettent également en avant un risque moyen de corrosion sur l'armature E entre 110 et 120 cm (gradient de potentiel de l'ordre de 8 mV/cm). Cette zone correspond à la fenêtre réalisée pour la connexion électrique à la nappe de ferrailage : **aucune trace de corrosion constatée** pour une épaisseur d'enrobage mesurée de 25 mm (cf photo ci-contre).



Annexe F - Positions approximatives des gargouilles par rapport aux axes des piles (plan basé sur les relevés de désordre de la dernière inspection)

Viaduc de la Roche

Position des gargouilles



CEREMA - AGENCE D' AUTUN

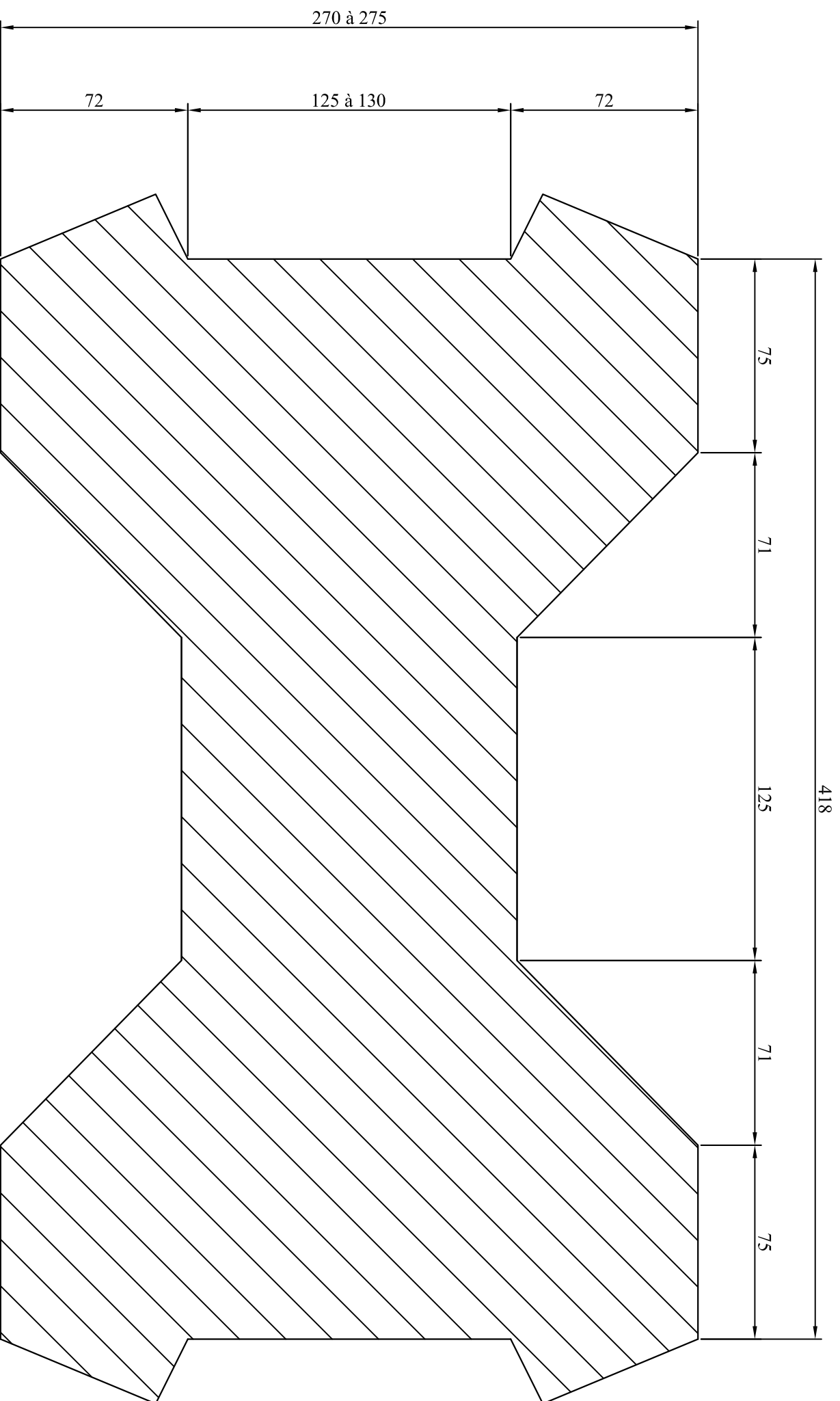
Autocad 2016 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Date de visite : AVRIL 2020

Echelle : QCQ

Annexe G - Section du pied des piles (basée sur les cotes prélevées sur site)



Viaduc de la Roche
Pile
Section type

CEREMA - AGENCE D' AUTUN

Autocad 2016 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Date de visite : AVRIL 2021

Echelle : 1/20e



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN