

Pont du Vaudioux sur la Lemme

Diagnostic de corrosion des armatures du béton armé

RAPPORT D'ETUDE

Septembre 2024

DIR EST

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Pont du Vaudioux sur la Lemme

Diagnostic de corrosion des armatures du béton armé

Commanditaire : DIR Est

Auteur : Jean-Luc Saussol

Responsable du rapport

Christophe AUBAGNAC – Agence d'Autun – Groupe Ouvrages d'Art

Tél. : +33(0)3 85 86 67 02

Courrier : christophe.aubagnac@cerema.fr

1 Boulevard Giberstein – ZI de Saint Andoche – BP 141 71400 Autun

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
v1f	13/09/24	Première version finale

Références

N° d'affaire : 23-CE-0075

N° CRM :

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Jean-Luc SAUSSOL	Agence d'Autun	Auteur principal	02/09/24	
Guillaume MAYER	Agence d'Autun	Relecteur	02/09/24	
Fabien RENAUDIN	DRIM	Relecteur	13/09/24	
Christophe AUBAGNAC	Agence d'Autun	Valideur	13/09/24	

À la demande de la DIR Est le Cerema est intervenu pour réaliser un diagnostic de corrosion des armatures du béton armé sur le pont du Vaudioux sur la Lemme (RN5).

Vis-à-vis du risque de corrosion, la partie la plus critique de l'ouvrage est constituée des entretoises sur appuis et des sommiers des appuis qui présentent une très forte pollution par les chlorures, apportée par les écoulements en provenance des lignes de joints (3 lignes de joints).

Le traitement probablement le plus pérenne de cette pathologie consiste à la démolition / reconstruction des parties d'ouvrage concernées, ce qui aura une forte incidence sur l'exploitation de l'ouvrage (nécessité de créer des appuis provisoires et de vérifier les travées). D'autres solutions sont néanmoins envisageables (sous réserve de démontrer leur faisabilité par des investigations complémentaires) et sont présentées en conclusion de ce rapport.

Compte tenu du site (environnement hivernal rigoureux avec gel sévère et salage fréquent), une étanchéité durable des joints de dilatation est à rechercher. Dans ce contexte, le projet de réparation pourrait intégrer une réflexion visant à supprimer une, voire la totalité des lignes de joints (attelage des travées sur pile / transformation des abouts de l'ouvrage avec conception semi-intégrale...) en intégrant les contraintes d'exploitation de la voie portée.

Une autre option de gestion peut consister à envisager des réparations locales du béton armé de l'ouvrage, âgé de 70 ans, à assurer un suivi rigoureux de celui-ci et à prévoir son remplacement à terme.

Les autres parties de l'ouvrage présentent des risques vis-à-vis de la corrosion des armatures (carbonatation, chlorures) à des degrés divers, qui peuvent être traités par des réparations relativement modestes.

Diagnostic	Profil de teneurs en chlorures
Corrosion	
Armatures du béton armé	
Épaisseurs d'enrobage	
Profondeur de carbonatation	

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- ☐ Accès libre : document accessible au public sur internet
- ☐ Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- ☒ Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

SOMMAIRE

1	PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE	5
1.1	Contexte	5
1.2	Présentation succincte de l'ouvrage.....	5
1.3	Nature des auscultations réalisées.....	6
1.4	Documents, hypothèses et principe de référence	7
1.5	Formulation des bétons employés	8
2	ÉPAISSEURS DE CHAUSSEE SUR OUVRAGE.....	9
3	ÉPAISSEURS D'ENROBAGES DES ARMATURES	11
4	TÉMOINS DE DURABILITÉ	14
4.1	Carbonatation du béton	14
4.2	Profils de teneurs en chlorures	16
5	OUVERTURES DE FENETRES	21
6	MESURES ÉLECTROCHIMIQUES	22
6.1	Hourdis entre poutres	22
6.2	Entretoise sur appui	26
7	MESURES DE DIAMÈTRES RÉSIDUELS	29
8	DIAGNOSTIC DE CORROSION (CONCLUSION)	31
	Annexe A - Photos (carbonatation & fenêtres)	1
	Annexe B - Profils de teneurs en chlorures	1
	Annexe C - Guide technique « protection des bétons par application de produits à la surface du parement » du Icp de décembre 2002 (pages 44-45) + logigramme de la fiche D1-1 du cahier interactif UGE-CEREMA « AUSCULTATION DES OUVRAGES D'Art »	1
	Annexe D - Schémas des zones de mesures électrochimiques	1

1 PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

1.1 Contexte

Le Service Ouvrages d'Art de la Direction Interdépartementale des Routes Est (DIR Est) a sollicité le Cerema Centre-Est pour établir un diagnostic de l'état du pont dit du Vaudioux, situé sur la commune du Vaudioux (39) et permettant le franchissement de la Lemme par la RN5.

La mission d'assistance du Cerema comprend deux volets :

- un diagnostic de corrosion des armatures internes au béton armé de l'ouvrage permettant d'obtenir des données et informations objectives nécessaires à l'évaluation structurale de l'ouvrage ainsi qu'à la définition des scénarios réalistes de réparation / reconstruction de l'ouvrage ;
- une évaluation structurale (estimation de la capacité portante) du tablier de l'ouvrage.

Le présent rapport correspond au diagnostic de corrosion des armatures internes au béton armé.

1.2 Présentation succincte de l'ouvrage

Le pont du Vaudioux permet le franchissement de la Lemme par la RN5 au PR 277+500.

Le tablier de l'ouvrage est du type « à poutres sous chaussée en béton armé ». Il est biais et composé de deux travées indépendantes. Ses principales caractéristiques sont décrites ci-après :

- années de construction : 1953 - 1954
- 2 travées indépendantes de 25 m de portée ;
- chaque travée est constituée de 4 poutres principales entretoisées (4 entretoises intermédiaires + 2 entretoises sur appuis) ;
- hourdis en béton armé de 20 cm d'épaisseur ;
- appuis (pile & culées) en béton non armé (béton cyclopéen pour les culées) avec parement en maçonnerie, comportant un sommier en béton armé supérieur.

L'ouvrage a fait l'objet de travaux conséquents en 1994 (source : rapport d'inspection détaillée périodique) :

- reprise des rives avec démolition / reconstruction des encorbellements et corniches avec un béton B35 G+S ;
- réfection de l'étanchéité (feuille PARAFOR PONT avec préparation du support) :
 - ragréage au mortier hydraulique des zones très altérées,
 - ragréage au mortier de résine SIKADUR 43 avec couche d'accrochage SIKAFLOOR 94 ;
- réfection des joints de dilatation (joints à revêtement amélioré) ;
- réparation du béton armé du tablier et démolition / reconstruction des murs garde-grèves. Cette réparation a consisté en la reprise des talons des poutres de rives et des entretoises avec un béton projeté fibré (fibres synthétiques) après mise en place, pour certaines poutres, d'un treillis soudé, ainsi qu'en la mise en œuvre d'un enduit teinté SIKATOP 107 sur les talons et les faces extérieures des poutres de rive, en sous-face des encorbellements et sur les corniches ;
- remplacement des appareils d'appui à balancier en béton armé sur culées par des appareils d'appui en élastomère fretté.

Note : la chaussée sur l'ouvrage a été refaite peu de temps avant la réalisation des auscultations (la couche de roulement recouvre les joints de dilatation et les fissures transversales ne sont pas encore apparues...). **Ceci peut laisser craindre le fait que l'ouvrage présente une surcharge en enrobés.** Dans l'évaluation structurale de l'ouvrage, nous avons supposé une épaisseur de chaussée de 8 cm pondérée par un coefficient de 1,4. **Les mesures radar réalisées** donnent une épaisseur moyenne de la couche de chaussée au-dessus du hourdis de 14,9 cm et **confirment un rechargement de chaussée qui dépasse l'épaisseur maximale de 11,2 cm prise en compte dans les calculs.**

Au sens du fascicule de documentation FD P18-326, l'ouvrage est situé en zone de gel sévère.

1.3 Nature des auscultations réalisées

Les auscultations réalisées sur le pont du Vaudioux consistent en l'estimation des épaisseurs de couche de chaussée sur l'ouvrage par méthode radar et en la réalisation d'un diagnostic de corrosion des armatures des parties en béton armé qui comprend :

- l'estimation des épaisseurs d'enrobage des armatures internes au béton par méthode non ou peu destructive (radar, Ferroskan® de Hilti et fenêtres de reconnaissance),
- l'estimation de la profondeur de carbonatation du béton,
- la détermination de profils de teneurs en chlorures du béton,
- la réalisation de fenêtres au droit d'armatures afin de vérifier visuellement leur état et de caler les mesures non destructives pour l'estimation des épaisseurs d'enrobage,
- la réalisation de mesures électrochimiques de potentiels électrode.

Les prélèvements nécessaires au présent diagnostic ont concerné les parties d'ouvrage suivantes :

- Carbonatation (zones de mesures / prélèvements) :
 - 5 zones sur les **faces intérieures des âmes des poutres et sur les entretoises** (béton non revêtu),
 - 1 zone sur la **face extérieure de l'âme d'une poutre de rive** (béton revêtu de l'enduit SIKATOP 107),
- Chlorures (zones de mesures / prélèvements) :
 - 2 zones sur les **entretoises sur culées** (1 zone par culée),
 - 1 zone sur la **face intérieure de l'âme d'une poutre** (zone protégée),
 - 4 zones sur les **sommiers des appuis** (nombreux écoulements constatés),
 - 2 zones sur le **hourdis entre poutres**,
 - 2 zones sur le **hourdis en encorbellement**.
- Estimations d'épaisseurs d'enrobage et ouvertures de petites fenêtres :
 - au droit des **zones de prélèvements**,
- Mesures électrochimiques :
 - sur le hourdis entre poutres (zone avec défaut d'étanchéité),
 - en partie inférieure de l'âme d'une entretoise sur appui.

Note : un à deux prélèvements pour la détermination des profils de teneurs en chlorures étaient initialement prévus sur les murs garde-grèves (nombreux écoulements constatés). **Ces prélèvements n'ont pas été réalisés** car lors de l'implantation des armatures nous avons constaté l'absence de lit de ferrailage sur la face avant de ces parties d'ouvrage (cf chapitre 2 sur les estimations d'épaisseurs d'enrobage).

Les mesures et prélèvements sur site ont été réalisés **du 23 au 27 octobre 2023** sous une météo pluvieuse par JL. Saussol, chargé d'études Ouvrages d'Art et R. Maupou, agent d'investigations OA de l'agence d'Autun du Cerema.

L'intervention a nécessité la location d'une nacelle négative ABC 125 de la société Albert tandis que le balisage sur l'ouvrage était assuré par les agents de la DIR Est (CEI de St-Laurent en Grandvaux).

Pour se repérer, les entretoises ont été numérotées de E0 à E11 de la rive gauche vers la rive droite (E0 à E5 sur la travée RG avec E0 au droit de la culée et E5 au droit de la pile & E6 à E11 sur la travée RD, avec E6 sur la pile et E11 sur la culée RD).

Les poutres ont été numérotées de P1 à P4 de l'amont vers l'aval.

1.4 Documents, hypothèses et principe de référence

Le mode opératoire de la mesure de l'épaisseur 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. L'estimation des épaisseurs d'enrobage est obtenue par méthodes non destructives (scanner EMBF Ferroskan® de Hilti et radar à saut de fréquence GP8800 de Proceq) complétées par quelques mesures ponctuelles peu destructives.

Vis-à-vis du risque de corrosion induit par la carbonatation ou par la pollution par les chlorures, l'épaisseur d'enrobage des armatures considérée est l'enrobage caractéristique e_{95} , correspondant à la moyenne moins l'écart-type de l'ensemble des valeurs de l'échantillon concerné. Dans l'hypothèse d'une distribution sous forme de gaussienne, 95 % des enrobages mesurés sont supérieurs à e_{95} .

Le mode opératoire de la mesure de profondeur de carbonatation du béton 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 en laboratoire sur des cassures fraîches des carottes prélevées sur site à l'aide d'un indicateur coloré, la phénolphthaléine. Cet indicateur est rose sur un béton non carbonaté ($\text{pH} > 9$) et incolore sur un béton carbonaté ($\text{pH} < 9$).

Le mode opératoire de la mesure de la teneur en chlorures du béton 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.

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 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 (document présenté en annexe D), si les témoins de durabilité (profondeurs des fronts de carbonatation et de chlorures ou profil de teneurs en chlorures libres) ne mettent pas en évidence de risque de corrosion des armatures dans la zone auscultée, les mesures électrochimiques ne seront pas exploitées ;
- les mesures de résistivité électrique du béton 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 potentiels électrode se base prioritairement (mais pas uniquement) sur les gradients de potentiel, 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 (ouverture de petites fenêtres dans le béton) est un élément prépondérant pour l'exploitation des mesures.

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 C) ;
- la procédure de diagnostic D1-1 « Diagnostic de corrosion du béton armé » du Cahier Interactif « Auscultation des Ouvrages d'Art » UGE-Cerema (<https://cahier-interactif-auscultation-ouvrages-art.univ-gustave-eiffel.fr/>), dont le logigramme est présenté en annexe C.

1.5 Formulation des bétons employés

La note de calcul ne traite que succinctement des bétons. Il est précisé que « le béton pour béton armé est dosé à **400 kg** de ciment artificiel **par m³** et les armatures sont en acier de la nuance Ac 42 ».

Le béton employé en 1994 pour la reprise des encorbellements et corniches (B35 G+S) a la composition suivante :

- Sable 0/4 : 670 kg Vincent Chalumeau
- Granulats 5/15 : 290 kg Vincent Chalumeau
- Granulats 15/20 : 780 kg Vincent Chalumeau
- Ciment : 410 kg CPA 55 PM Origny
- Plastifiant : Resi Reducto 1,15 l soit 0,28%
- Entraîneur d'air : Resi Air 1,02 l soit 0,25%
- Super plastifiant Resiflow N 40 : 1,43 l (compris entre 0,35 et 0,40 %)
- Résultats des contrôles :
 - teneur en air occlus entre 3,8 et 5,9 %
 - résistance à la compression moyenne de 41,4 MPa à 28 jours.

Ainsi, le présent diagnostic se base sur un **béton dosé à 410 kg de ciment par m³** pour les corniches et encorbellements et dosé à **400 kg de ciment par m³** pour le reste de l'ouvrage.

Note : l'annexe synthèse du dossier d'ouvrage du dernier rapport d'inspection ne donne pas d'information sur la composition du béton projeté de réparation des talons de poutre (travaux de 1994).

2 ÉPAISSEURS DE CHAUSSEE SUR OUVRAGE

D'après les documents en notre possession, la chape d'étanchéité est de type Feuille Préfabriquée Monocouche (FPM) PARAFOR PONT et date de 1994. Cette feuille repose sur un reprofilage en mortier hydraulique ou en mortier de résine selon la dégradation de l'extrados du hourdis.

Au moment de la réalisation des mesures, la couche de roulement est très récente : elle recouvre les joints de chaussée et n'a pas encore eu le temps de fissurer au droit de ceux-ci...

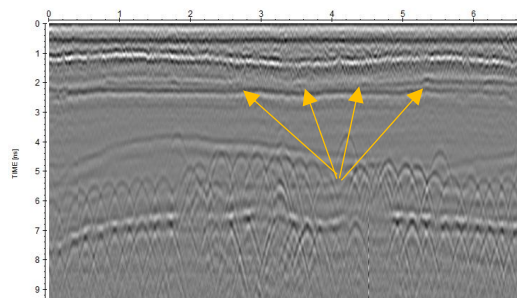


Figure 1 : profil en travers dans le sens amont - aval. Les recouvrements des lès tous les mètres sont identifiables (flèches).

Sur les profils radar (profil enregistré à l'axe de la voie amont, ie Champagnole → St Laurent et quelque profils transversaux), on distingue de « haut en bas » :

- une interface intermédiaire dans l'épaisseur de chaussée, très marquée et correspondant vraisemblablement à la réfection récente de la couche roulement ;
- une interface correspondant à la feuille préfabriquée (recouvrement des lès identifiable sur les profils transversaux ;
- une interface correspondant à l'extrados du hourdis (interface reprofilage / hourdis). Cette interface présente un aspect chaotique **sur environ les 8 premiers mètres depuis l'extrémité RD (ou St-Laurent)**, signe d'une **possible mauvaise adhérence entre le reprofilage et le hourdis**.

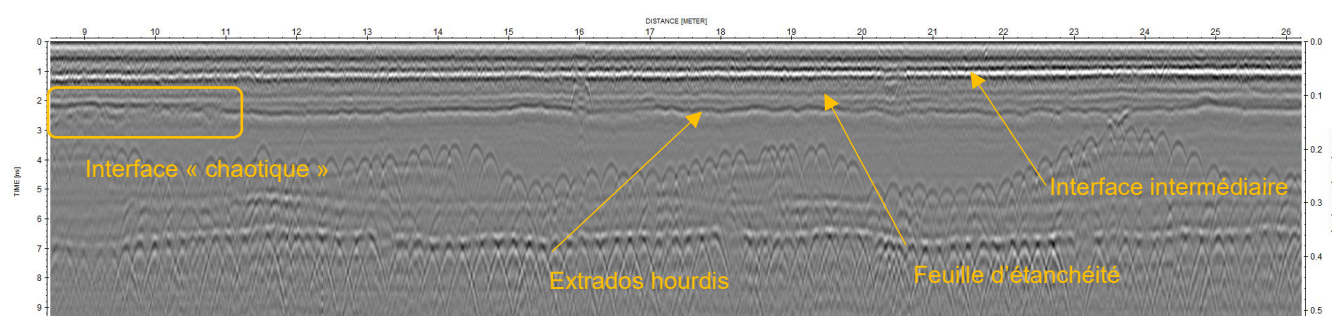


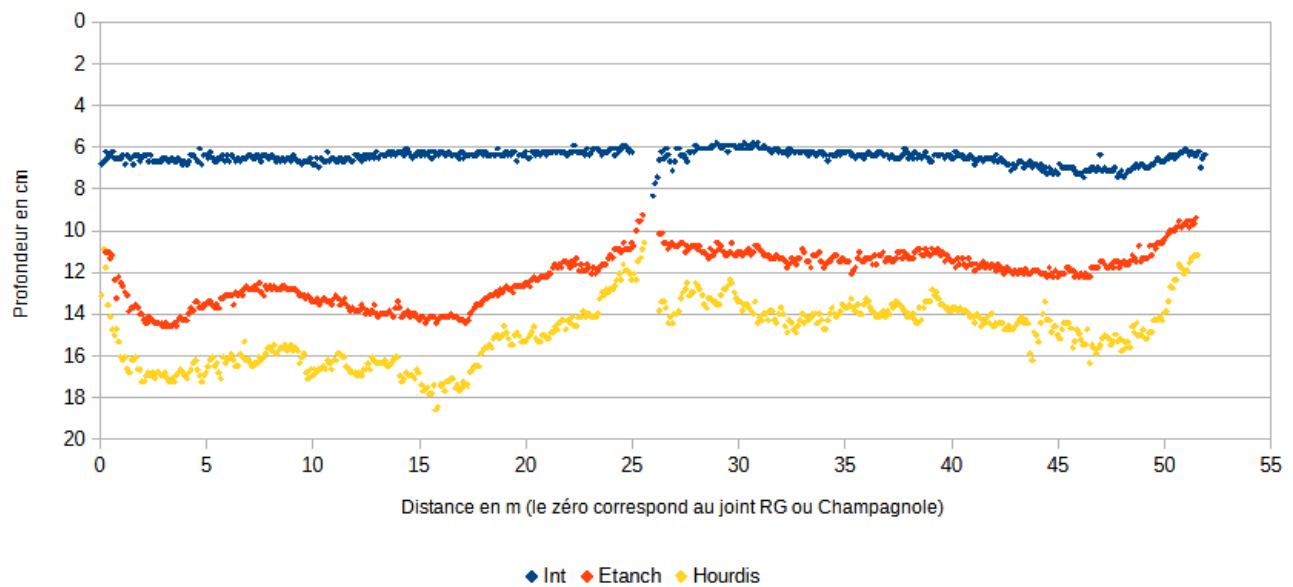
Figure 2 : extrait commenté du profil longitudinal enregistré à l'axe de la voie amont.

Les estimations des épaisseurs de chaussée sont présentées dans le tableau et le graphe ci-après. Elles sont basées sur une vitesse de propagation des ondes radar de 12,2 cm/ns correspondant à une constante diélectrique relative des matériaux traversés de 6.

Position des interfaces en cm depuis la face supérieure de la chaussée				
	Moyenne	Écart-type	Min	max
Intermédiaire	6,5	0,3	5,4	8,6
Étanchéité	12,2	1,2	8,9	14,7
Hourdis	14,9	1,5	10,6	18,7
Épaisseur reprofilage	2,7	0,6	0,6	4,9

Position couches de chaussée

Pont du Vaudioux - Axe voie amont (Champagnole -> St Laurent en Grandvaux)



3 ÉPAISSEURS D'ENROBAGES DES ARMATURES

Les estimations d'épaisseurs d'enrobage des armatures internes au béton ont été réalisées avec le radar à saut de fréquence GP8800 de Proceq. Le dépouillement des données a été réalisé avec le logiciel Reflex en utilisant les mesures d'enrobage obtenues lors de l'ouverture de fenêtres – et dans une moindre mesure celles obtenues avec le Ferroskan – pour caler les vitesses de propagation des ondes radar.

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-après. Pour rappel, l'enrobage caractéristique e_{95} correspond à la moyenne moins l'écart-type de l'ensemble des valeurs de la partie d'ouvrage étudiée.

Estimation des épaisseurs d'enrobages en mm (1/2)							
Zone	Localisation	Moyenne	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb valeurs
Sommiers (faces latérales)	Culée RD ⁽¹⁾	51	13	39	27	86	70
	Culée RG ⁽¹⁾	60	15	45	26	93	65
	Pile (face RG)	67	12	55	42	87	91
	Ensemble sommiers	60	15	46	26	93	226
Culées ⁽²⁾	Mur garde-grève	50	50	50	50	50	50
	Mur de front	50	50	50	50	50	50
Poutres ⁽³⁾ Âmes	Travée RG – P2 – Âme aval	29	12	17	2	59	72
	Travée RG – P3 – Âme aval	39	11	29	17	57	70
	Travée RG – P2 – Âme amont	39	10	29	22	66	71
	Travée RG – P1 – Âme extérieure	45	11	34	18	70	82
	Travée RD – P1 – Âme extérieure	45	10	35	15	80	81
	Travée RD – P1 – Âme intérieure	61	14	48	33	104	69
	Travée RD – P2 – Âme amont	65	19	45	33	105	69
	Travée RD – P3 – Âme amont	68	16	52	33	117	68
	Ensemble âmes	49	18	30	2	117	582
Poutres ⁽³⁾ Sous-face talons	Travée RG – P2	25	5	21	7	35	78
	Travée RG – P3	25	5	20	12	38	76
	Travée RD – P1	25	7	18	10	44	65
	Travée RD – P3	21	7	14	2	40	76
	Ensembles sous-face talons	24	6	18	2	44	295

(1) : il est difficile d'identifier les armatures sur les sommiers des culées (autre les cadres « classiques », présence d'épingles dues à la présence d'anciens murets-cache : cf Figure 3 et Figure 4)

(2) : absence d'armature dans les murs de front et absence d'armature sur le parement extérieur (face avant) des murs garde-grèves

(3) : les poutres ont été numérotées de P1 à P4 de l'amont vers l'aval.

Estimation des épaisseurs d'enrobages en mm (2/2)							
Zone	Localisation	Moyenne	Écart-type	e ₉₅	Min	Max	Nb valeurs
Entretoises Âmes ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾	Culée RD (E11)	95	19	76	42	125	35
	Culée RG (E0)	79	23	56	45	121	32
	Pile côté RD (E6)	46	14	32	25	74	19
	E1	31	13	19	2	59	51
	E3	46	28	18	4	127	53
	E4	47	20	26	12	94	51
	E7	51	10	41	24	78	52
	E8	42	15	27	20	66	51
	E9	56	16	40	25	86	51
	Ensemble entretoises	53	25	27	2	127	395
Hourdis Entre- poutres	Travée RG – entre P2-P3	37	5	32	17	48	101
	Travée RD – entre P2-P3	38	8	30	7	59	84
	Travée RD – entre P3-P4	37	7	31	2	49	83
	Ensemble intrados hourdis	37	6	31	2	59	268
Encorbel- lement	Intrados encorbellement amont	24	4	20	13	32	120

(4) : les estimations des épaisseurs d'enrobages sur les entretoises ont été réalisées sur les deux faces de leurs âmes, sauf pour les entretoises sur appuis où seule la face extérieure (avant) est accessible.

(5) : les entretoises sont numérotées de E0 à E11 de la rive gauche vers la rive droite (E5 et E6 sont au droit de la pile).

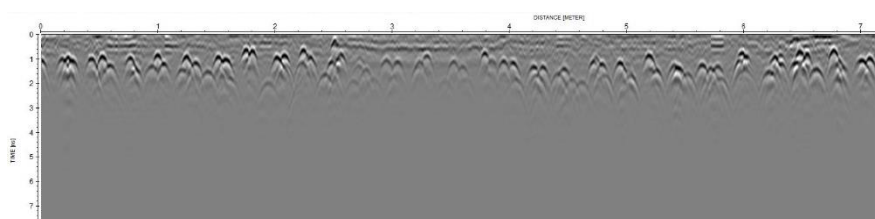


Figure 4 : profil radar sur la face latérale du sommier de la culée RD. Impossibilité de faire la distinction entre les cadres du sommier et les épingle de l'ancien muret-cache.

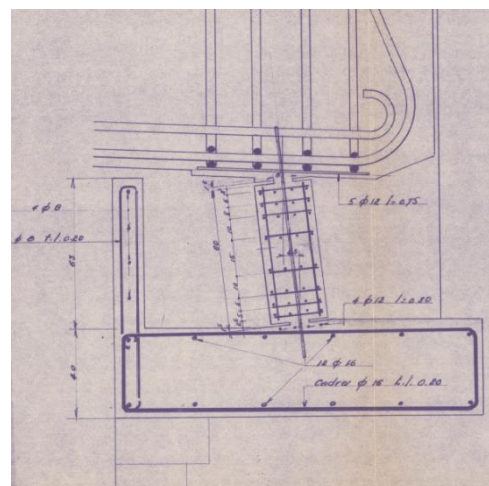


Figure 3 : plan d'origine des sommiers des culées avec la présence d'un muret-cache.

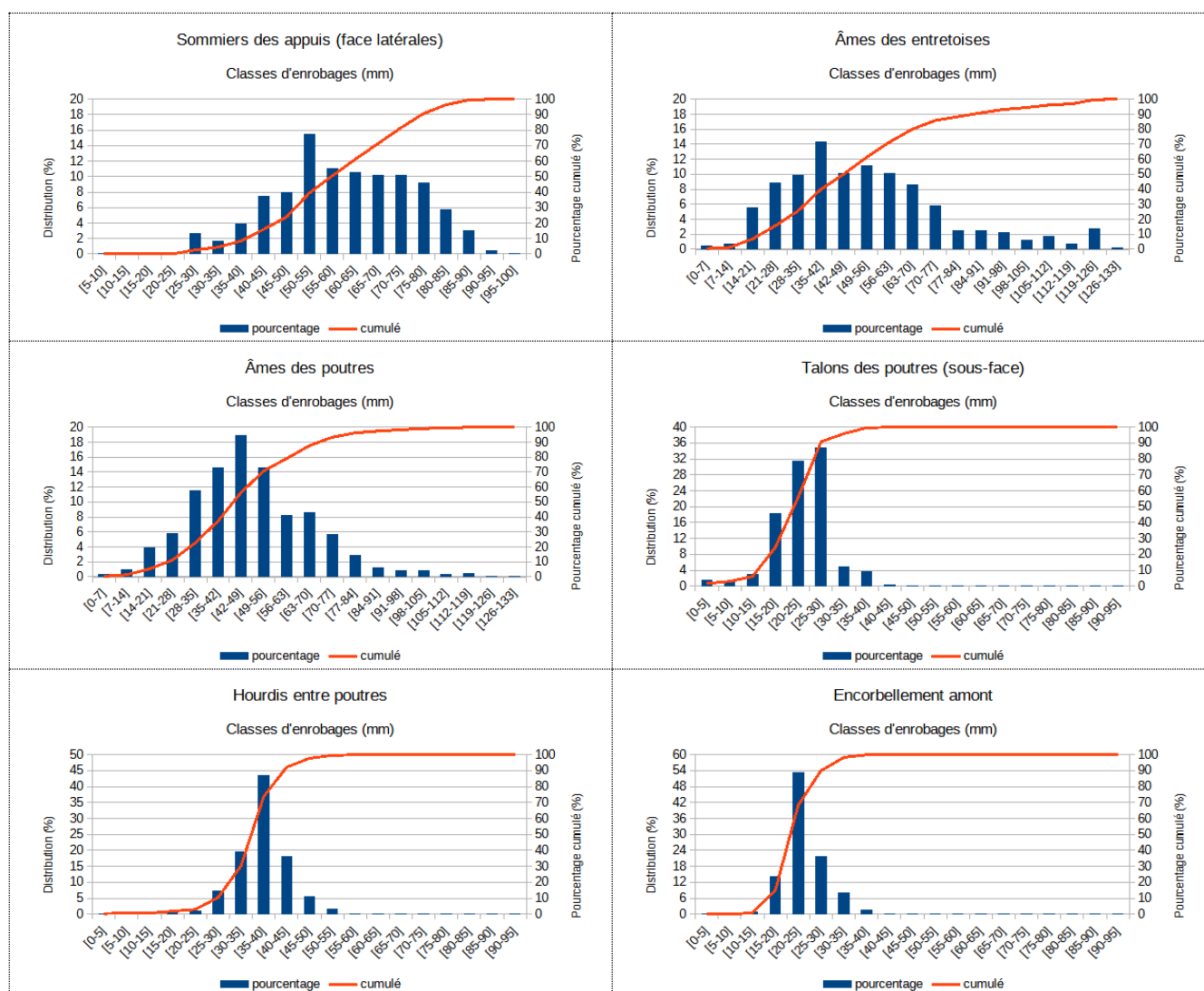
D'une façon générale, les épaisseurs d'enrobage des armatures des parties en béton armé du pont du Vaudioux sont en moyenne importantes à très importantes et très dispersées entre les différentes parties d'ouvrage auscultées et également au sein même des parties d'ouvrage, à l'exception des faces inférieures des pièces (hourdis, encorbellement et talons des poutres) où la mise en œuvre des cales d'enrobage est plus aisée et ainsi mieux réalisée.

Les enrobages caractéristiques e₉₅ estimés varient de 18 mm (sous-face des talons des poutres) à 46 mm (faces latérales des sommiers des piles).

Les estimations d'épaisseurs d'enrobages retenues pour la suite du diagnostic sont synthétisées dans le tableau ci-après.

Estimation des épaisseurs d'enrobages en mm						
Zone	Moyenne	Écart-type	e_{95}	Min	Max	Nb valeurs
Sommiers des appuis (faces latérales)	60	15	46	26	93	226
Poutres (âmes)	49	18	30	2	117	582
Poutres (sous-faces des talons)	24	6	18	2	44	295
Entretoises (âmes)	53	25	27	2	127	395
Hourdis (entre poutres)	37	6	31	2	59	268
Encorbellement	24	4	20	13	32	120

Les distributions des épaisseurs d'enrobage sont présentées sous forme graphique ci-après pour mieux visualiser la dispersion des estimations.



4 TÉMOINS DE DURABILITÉ

4.1 Carbonatation du béton

L'estimation de la profondeur du front de carbonatation est basée sur le prélèvement de 12 carottes sur 6 zones d'essai différentes (prélèvement de 2 carottes par zone d'essai en faisant pivoter le support de la carotteuse sur lui-même : sur une même zone, les carottes sont espacées d'environ une cinquantaine de cm).

Les prélèvements sont implantés sur les âmes des entretoises (3 zones d'essai – parement non revêtu) et sur les âmes des poutres (3 zones d'essai, 2 sur parement non revêtu et 1 sur parement revêtu en 1994 de l'enduit SIKATOP 107). Les carottes sont implantées dans des zones où le béton est visuellement sain, sans présence de nid de cailloux ou de fissure visible à l'œil nu.



Photo 1: important bullage sur P3-Ca-1.

Visuellement, on observe sur les carottes un aspect correct du béton (aspect légèrement « crayeux » vers le parement) et un bullage qui peut être important.

Les résultats de détermination de la profondeur du front de carbonatation (test à la phénolphthaléine) sont présentés dans les tableaux ci-après. Pour rappel, toutes les parties en béton armé de l'ouvrage ont été coulées avec la même formulation de béton, à l'exception des encorbellements et des corniches qui n'ont pas fait l'objet de prélèvement.

Profondeur du front de carbonatation en mm – 1/2					
Zone d'essai	N° carotte	Observations	Front Moyen / carotte	Front moyen / Zone	Front moyen / partie d'OA
Entretoises E2 - entre poutres P1-P2) - Âme RG	E-Ca-1	Léger bullage	23	21	27
	E-Ca-2	Bullage	20		
Entretoises E7 - entre poutres P2-P3) - Âme RG	E-Ca-3	Bullage modéré / Carotte cassée au fendage au niveau du front → lecture précise difficile	32	31	
	E-Ca-4	Bullage modéré	30		
Entretoises E9 - entre poutres P3-P4) - Âme RG	E-Ca-5	Léger bullage	30	28	
	E-Ca-6	Bullage	27		

Profondeur du front de carbonatation en mm – 2/2					
Zone d'essai	N° carotte	Observation	Front Moyen / ca-rotte	Front moyen / Zone	Front moyen / partie d'OA
Poutre P1 (amont) entre E2-E3 Travée RG Âme intérieure	P-Ca-1	Léger bullage // Carotte cassée au fendage au niveau du front → lecture précise impossible	/	19	21
	P-Ca-2	Léger bullage	19		
Poutre P3 entre E3-E4 Travée RG Âme aval	P-Ca-3	Léger bullage	19	19	
	P-Ca-4	Bullage important	19		
Poutre P1 (amont) Travée RD (~ mi-travée) Âme extérieure (béton revêtu d'un enduit depuis 1994)	P-Ca-5	Bullage	26	24	
	P-Ca-6	Bullage (avec bulles d'assez grandes dimensions)	23		

Bien que les poutres et entretoises aient été coulées avec la même formulation de béton, on observe une différence assez sensible entre ces pièces (les entretoises présentent une profondeur moyenne de front de carbonatation environ 30% supérieure à celle constatée sur les poutres).

Sur les trois zones d'essai sur les poutres, la profondeur de front de carbonatation la plus importante a été constatée, étonnamment, sur la zone où le parement était recouvert d'un enduit alors que les deux autres zones présentent des valeurs homogènes. L'enduit ayant notamment pour rôle de protéger le béton de la carbonatation (cela semble indiquer que le front de carbonatation a peu évolué depuis 1994 pour les zones non revêtues (ouvrage âgé de 70 ans et évolution du front de carbonatation proportionnelle à la racine carrée du temps).

Le front de carbonatation retenu est, en fonction des différentes parties de l'ouvrage, le suivant :

- ✓ Poutres **21 mm**
- ✓ Entretoises, hourdis entre poutres, sommiers des appuis **27 mm**
- ✓ Encoberlements et corniches **0 mm**

Les encoberlements et corniches ont été refaits en 1994 et protégés par un enduit. Ils ne sont donc pas concernés par le risque de carbonatation.

Pour illustrer les essais à la phénolphtaléine, sont présentées en annexe A, les photographies de l'ensemble des carottes.

4.2 Profils de teneurs en chlorures

Pour déterminer les profils de teneurs en chlorures du béton, 11 prélèvements ont été effectués dans différentes parties de l'ouvrage. Leurs implantations sont détaillées dans le tableau ci-après.

N° prélèvement	Implantation
C-CI-1	Face latérale du sommier de la culée RD Entre les poutres P1-P2 (à ~ 200 cm de l'axe de la poutre amont) Zone avec écoulements - Photo 2
C-CI-2	Face latérale du sommier de la culée RG Entre les 2 poutres centrales (P2-P3) // à ~ 70 cm de l'axe de P2 Zone avec écoulements très actifs
C-CI-3	Face latérale côté RG du sommier de la pile Au droit de la poutre amont (P1) Zone avec écoulements - Photo 4
C-CI-4	Face latérale côté RD du sommier de la pile Entre les 2 poutres centrales (P2-P3) Zone avec écoulements
E-CI-1	Âme extérieure de l' entretoise sur culée RD Entre les 2 poutres centrales (P2-P3) Réalisé au plus bas de l'entretoise / zone avec début d'éclat - Photo 3
E-CI-2	Âme extérieure de l' entretoise sur culée RG Entre les poutres P1-P2 Zone avec écoulement actif qui passe à travers l'entretoise par une fissure (Photo 7). Dans le trou laissé par le prélèvement, le béton semble humide sur une profondeur d'environ 2 cm.
H-CI-1	Intrados de l' encorbellement amont Travée RG (~ au droit de l'entretoise E3) Zone sans défaut apparent (encorbellement recouvert d'un enduit)
H-CI-2	Intrados de l' encorbellement amont Au niveau du joint de dilatation au droit de la pile Zone avec écoulements et enduit qui se décolle par plaques - Photo 5
H-CI-3	Intrados hourdis entre poutres Extrémité RG // entre les poutres centrales Zone avec défaut d'étanchéité , stalactite et nid de cailloux (maille E-F/3-4 de la zone de mesures électrochimiques) - Photo 6
H-CI-4	Intrados hourdis entre poutres Entre entretoises E4-E5 et entre les poutres centrales Zone sans défaut apparent
P-CI-1	Poutre P3 // âme côté amont Travée RD Zone sans défaut apparent

Rq : par convention, on note « âme extérieure » la face avant accessible des entretoises sur appuis.



Photo 2 : vue sur implantation du prélèvement C-Cl-1.



Photo 3 : vue sur implantation du prélèvement E-Cl-1.



Photo 4 : vue sur implantation du prélèvement C-Cl-3.



Photo 5 : vue sur implantation du prélèvement H-Cl-2.



Photo 6 : vue sur implantation du prélèvement H-Cl-3 (humidité du parement due au mouillage nécessaire à la réalisation des mesures électrochimiques)..



Photo 7 : vue sur implantation du prélèvement E-Cl-2.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après. Ils ont été établis en se basant sur l'hypothèse de l'emploi d'un béton dosé en ciment à 400 kg/m³ pour l'ensemble des parties en béton armé exceptés les encorbellements où la quantité de ciment est de 410 kg/m³. Les PV de ces essais sont présentés en annexe B (se référer aux PV pour visualiser les courbes de teneurs en chlorures libres en fonction de la profondeur).

Le seuil critique au-dessus duquel le risque de corrosion est élevé est de 0,4 % de chlorures par rapport à la masse de ciment.

Le front de chlorures est défini comme la profondeur à partir de laquelle la teneur en chlorures passe sous le seuil critique de 0,4 % dans le cas où ce seuil est dépassé (il est nul dans le cas contraire). Un front de chlorures de 0 mm ne signifie donc pas forcément l'absence de chlorures dans le prélèvement.

Teneur en chlorures libres exprimées en fonction de la masse de ciment					
Prélèvement	Profondeur du front de chlorures (mm)	Teneur maximale en Cl ⁻ libres		Teneur en Cl ⁻ libres au niveau des armatures ⁽¹⁾	
		% par rapport à la quantité de ciment	% par rapport au seuil critique	% par rapport à la quantité de ciment	% par rapport au seuil critique
C-CI-1	> 50 ⁽²⁾	1,407	352 %	1,407	352 %
C-CI-2	0	0,169	42 %	0,117	29 %
C-CI-3	> 50 ⁽²⁾	1,526	382 %	1,280	320 %
C-CI-4	> 60 ⁽²⁾	1,170	293 %	1,009	252 %
E-CI-1	> 50 ⁽²⁾	1,008	252 %	0,877	219 %
E-CI-2	> 60 ⁽²⁾	1,481	370 %	1,208	302 %
H-CI-1	0	0,083	21 %	0,062	16 %
H-CI-2	12	0,664	166 %	0,197	49 %
H-CI-3	> 50 ⁽²⁾	1,539	385 %	1,371	343 %
H-CI-4	0	0,137	34 %	0,088	22 %
P-CI-1	0	0,056	14 %	0,042	11 %

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

(2) : la profondeur du prélèvement ne permet de définir le front de chlorures

Les 11 prélèvements montrent une **très forte pollution par les chlorures** (taux de chlorures jusqu'à 3,5 fois le seuil critique au niveau des armatures) **dans les zones avec d'importants défauts d'étanchéité avérés** : abouts des travées (importantes venues d'eau au niveau des trois lignes de joints) et, ponctuellement, défaut d'étanchéité au niveau du hourdis entre poutres. Dans ces zones, le béton est pollué sur une profondeur très conséquente : au niveau du dernier cm des prélèvements (50 ou 60 mm) le taux de chlorures est encore très largement supérieur au seuil critique.

Les courbes, taux de chlorures en fonction de la profondeur (cf annexe B), se présentent, pour la grande majorité d'entre elles, sous forme de « cloches » (le taux maximum ne se situe pas au plus proche du parement) ce qui signifie que l'apport de chlorures est moins important actuellement que par le passé. Cela est le fait des ruissellements (défauts d'étanchéité très importants constatés au niveau des lignes de joints) qui délavent les chlorures à faible profondeur. Ce phénomène est probablement accentué par les hivers plus doux que nous connaissons depuis quelques années ainsi que par la date des prélèvements, avant le début de l'hiver et donc la période de salage.

En développant par partie d'ouvrage :

Pont du Vaudioux sur la Lemme

Diagnostic de corrosion des armatures du béton armé

Août 2024

18/46

✓ Sommiers des appuis (pile et culées) :

Les 4 prélèvements sur les sommiers ont tous été réalisés au droit de venues d'eau et dans l'ensemble présentent une très forte pollution par les chlorures avec des courbes en forme de cloches. Dans le dernier cm des prélèvements, le taux de chlorures est encore largement supérieur au seuil critique.

Le prélèvement C-Cl-2, pourtant réalisé dans un environnement similaire aux trois autres (cf Photo 8), ne présente curieusement pas de pollution par les chlorures (taux maximum correspondant à ~ 40% du seuil critique), sans que l'on puisse expliquer cette particularité.

À noter que pour des raisons d'accessibilité, les prélèvements ont été réalisés dans les faces latérales des sommiers. Il semble raisonnable de considérer que leurs faces supérieures présentent une pollution au moins comparable.

✓ Entretoises sur appuis :

Les prélèvements sur les entretoises d'appui ont été réalisés sur leur face extérieure (avant) dans des zones soumises aux écoulements (au plus bas de l'entretoise ou zone avec écoulement actif qui passe à travers l'entretoise par une fissure).

Note : c'est leur face arrière, inaccessible, qui est directement soumise aux écoulements, cependant les écoulements en provenance des joints se prolongent en sous-face des entretoises sur appui et sous le talon des poutres (cf Photo 9 et Photo 10).

La pollution rencontrée sur ces entretoises est très importante et comparable à celle observée sur les sommiers des appuis.

✓ Hourdis entre poutres :

En partie courante du hourdis (hors défaut d'étanchéité), on observe une pollution très modérée (taux maximum correspondant à 34% du seuil critique sur le prélèvement effectué – H-Cl-4).

Le prélèvement effectué au niveau d'un défaut local d'étanchéité (et relevé comme tel par les inspections détaillées) présente en revanche une forte pollution : taux au niveau des armatures de l'ordre de 3,5 fois la valeur du seuil critique (H-Cl-3).

✓ Encorbellements :

Les encorbellements ont été refaits en 1994 et ont été protégés par un enduit. Malgré cela, au niveau des écoulements en provenance de la ligne de joints au droit de la pile, on observe une pollution marquée dans le premier cm (taux correspondant à 166% du seuil critique et front de chlorures s'établissant à ~ 12 mm – H-Cl-2). Au niveau des armatures, le taux de chlorures reste cependant inférieur au seuil critique (~ 50% du seuil).

En partie courante, on ne relève pas de pollution : taux maximum correspondant à ~ 20% du seuil critique (H-Cl-1).

✓ Poutres :

Le prélèvement a été réalisé en partie courante sur la face intérieure de l'âme d'une poutre et correspond à l'environnement des poutres (hors faces extérieures des âmes et abouts des travées) et des entretoises intermédiaires.

On ne relève pas de pollution : taux maximum inférieur à 15% du seuil critique (P-Cl-1).



Photo 8 : vue sur prélèvement C-CI-2. Zone avec écoulements très actifs.



Photo 9 : about côté pile de la travée RG. Écoulements en provenance du joint se prolongent sous le talon des poutres.



Photo 10 : idem photo précédente (autre vue).



Photo 11 : Pile côté RD. Écoulements généralisés, éclats sur fer et débuts d'éclats sur le sommier.

5 OUVERTURES DE FENETRES

Des petites fenêtres ont été réalisées dans le béton pour évaluer visuellement la corrosion des armatures. Ces fenêtres nous ont également servi à étalonner le radar pour les estimations d'épaisseurs d'enrobage des armatures. Les données sont synthétisées dans le tableau ci-après et les photographies sont présentées en annexe A.

Ouvertures de fenêtres sur les armatures pour constats visuels				
Localisation	N° fenêtre	Enrobage (mm)	Constatations	Photos
Sommier (face latérale)	F1	30	Culée RD à proximité de C-Cl-1 : absence de corrosion	Photo 30 & Photo 31
	F4	30	Culée RG à proximité de C-Cl-2 : absence de corrosion	Photo 32 & Photo 33
	F5	79	Pile côté RG à proximité de C-Cl-3 (fenêtre au droit d'une tâche de rouille) : absence de corrosion	Photo 34 & Photo 35
Entretoise sur appui	F2	60	Entretoise E11 (culée RD) à proximité de E-Cl-1 (fenêtre sur armature verticale) : absence de corrosion	Photo 36 & Photo 37
	F3	54	Entretoise E11 à proximité de E-Cl-1 (fenêtre sur armature horizontale & fracture) : corrosion avec perte de masse (difficile d'évaluer la perte de masse).	Photo 36 & Photo 38
	F11	50	Entretoise E0 à proximité de E-Cl-2 : absence de corrosion « avancée » (armature matée lors de l'ouverture → impossible de déterminer si présence de corrosion très superficielle).	Photo 39 & Photo 40
Entretoise intermédiaire	F6	21	Âme entretoise E2 entre les poutres P1-P2 : absence de corrosion autre que très superficielle et antérieure au bétonnage	Photo 41
	F9	25	Âme entretoise E7 entre les poutres P2-P3 : absence de corrosion autre que très superficielle et antérieure au bétonnage	Photo 42
Poutre	F7	11	Âme intérieure poutre P1 entre E2-E3 : pas de corrosion « avancée » (armature matée lors de l'ouverture → impossible de déterminer si présence de corrosion très superficielle).	Photo 43
	F8	14	Âme intérieure poutre P1 entre E2-E3 : mêmes constatation que pour F7	Photo 44
Hourdis	F10	34	Hourdis entre E0-E1 et P2-P3, en bordure de la zone de mesures électrochimiques et près de H-Cl-3 (zone avec défaut ponctuel d'étanchéité et nid de cailloux) : corrosion très superficielle	Photo 45 & Photo 46
	/	40	Connexion au ferrailage pour les mesures électrochimiques (fenêtre à proximité de F10) : Corrosion avec début de perte de matière	Photo 45 & Photo 47

*Rappel : Poutres numérotées de P1 à P4 de l'amont vers l'aval
 Entretoises numérotées de E0 à E11 de la RG vers la RD*

Les ouvertures de fenêtres (12) se révèlent favorables à l'ouvrage, puisque malgré l'importante pollution par les chlorures relevée sur l'ouvrage seules deux fenêtres présentent de la corrosion, sans caractère catastrophique : lors de la connexion au ferrailage pour les mesures électrochimiques sur le hourdis et sur l'entretoise E11 (corrosion « attendue » car fenêtre F4 réalisée au droit d'une fracture).

Même si sur les entretoises sur appuis et les sommiers les épaisseurs d'enrobage rencontrées lors des ouvertures de fenêtres sont importantes, la majorité des armatures observées se situent néanmoins dans un environnement pollué par les chlorures.

Mesures de résistivité électrique du béton :

Les mesures de résistivité électrique sont prises dans les mailles du ferrailage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures prises en faisant pivoter l'appareil sur lui-même).

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 A et B	5	7	4
entre B et C	4	6	5
entre C et D	4	6	5
entre D et E	5	6	8
entre E et F	4	5	4
entre F et G	7	4	5

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 proposée ci-dessous.

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

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

Ces mesures indiquent une très faible résistivité électrique du béton, présentant un risque de corrosion élevé pour les armatures internes. La présence d'un nid de cailloux, d'un défaut d'étanchéité ainsi que la présence de chlorures (H-Cl-3) qui ont diffusé dans la zone ne sont certainement pas étrangers à ce résultat.

Potentiels électrode des armatures :

Les mesures de potentiels électrode des armatures 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 (les plus proches du parement) :

Hourdis - armatures transversales (POTENTIELS mV)								
Armatures	val 1	val 2	val 3	val 4	val 5	val 6	val 7	val 8
A	-504	-510	-517	-526	-552	-548	-548	-530
B	-488	-490	-493	-499	-531	-537	-534	-512
C	-480	-470	-456	-453	-465	-487	-488	-476
D	-459	-460	-449	-431	-427	-438	-456	-444
E	-427	-422	-421	-409	-399	-432	-435	-446
F	-394	-393	-389	-381	-380	-390	-406	-407
G	-365	-361	-357	-367	-371	-380	-385	-378

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 C876-91 (1999) (avec électrode Cu/CuSO₄) : (cf. tableau ci-dessous).

Potentils d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	0%
-200 à -350	Moyenne	0%
< -350	Forte	100%

Hourdis – armatures transversales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)								
Armatures	val 1	val 2	val 3	val 4	val 5	val 6	val 7	val 8
A		0,6	0,7	0,9	2,6	0,4	0	1,8
B		0,2	0,3	0,6	3,2	0,6	0,3	2,2
C		1	1,4	0,3	1,2	2,2	0,1	1,2
D		0,1	1,1	1,8	0,4	1,1	1,8	1,2
E		0,5	0,1	1,2	1	3,3	0,3	1,1
F		0,1	0,4	0,8	0,1	1	1,6	0,1
G		0,4	0,4	1	0,4	0,9	0,5	0,7

Des gradients supérieurs à 10 mV/cm peuvent être le signe de la présence de zone anodique et donc de corrosion.

Armatures longitudinales :

Hourdis - armatures longitudinales (POTENTIELS mV)						
Armature n° :	1	2	3	4	/	/
val 1	-506	-529	-553	-532		
val 2	-502	-515	-544	-531		
val 3	-492	-510	-534	-513		
val 4	-481	-492	-545	-511		
val 5	-478	-473	-500	-503		
val 6	-474	-456	-484	-490		
val 7	-470	-436	-464	-464		
val 8	-447	-430	-431	-444		
val 9	-432	-416	-427	-440		
val 10	-425	-411	-426	-438		
val 11	-404	-399	-409	-425		
val 12	-388	-385	-398	-412		
val 13	-366	-376	-381	-399		
val 14	-361	-371	-378	-389		

Hourdis – armatures longitudinales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)						
Armature n° :	1	2	3	4	/	/
val 1						
val 2	0,4	1,4	0,9	0,1		
val 3	1	0,5	1	1,8		
val 4	1,1	1,8	1,1	0,2		
val 5	0,3	1,9	4,5	0,8		
val 6	0,4	1,7	1,6	1,3		
val 7	0,4	2	2	2,6		
val 8	2,3	0,6	3,3	2		
val 9	1,5	1,4	0,4	0,4		
val 10	0,7	0,5	0,1	0,2		
val 11	2,1	1,2	1,7	1,3		
val 12	1,6	1,4	1,1	1,3		
val 13	2,2	0,9	1,7	1,3		
val 14	0,5	0,5	0,3	1		

Des gradients supérieurs à 10 mV/cm peuvent être le signe de la présence de zone anodique et donc de corrosion.

Les résultats sont similaires pour les deux orientations d'armatures avec des potentiels très électro-négatifs (fort risque de corrosion) mais des gradients faibles (zone semble-t-il homogène).

Les mesures électrochimiques suggèrent une initiation de la corrosion sur l'ensemble de la zone auscultée et pour les deux orientations d'armatures. Les fenêtres ouvertes confirment en partie cette interprétation (corrosion généralisée sur la connexion au ferrailage et amorce de corrosion sur F10) qui est en accord avec l'importante quantité de chlorures relevée dans la zone (H-CI-3 prélevé dans la maille constituée des armatures E-F et 3-4).

La mauvaise qualité locale du béton (nid de cailloux) a certainement favorisé la diffusion de l'humidité et des chlorures apportés par le défaut ponctuel d'étanchéité sur une zone relativement étendue et

Pont du Vaudioux sur la Lemme

Diagnostic de corrosion des armatures du béton armé

Août 2024

vraisemblablement plus étendue que la zone de mesures électrochimiques. **Cette zone n'est cependant pas représentative de l'ensemble du hourdis entre poutres** (pas d'autres défauts d'étanchéité relevés lors de la dernière inspection détaillée).

6.2 Entretoise sur appui

La zone auscultée correspond à la **partie inférieure** de la face accessible (avant) de l'entretoise sur la culée RD (E11) entre les deux poutres centrales. Cette zone correspond également au prélèvement E-CI-1 et aux fenêtres F2 et F3.

Elle est constituée de 7 armatures verticales (repérées de 1 à 7 de l'aval vers l'amont) et de 3 armatures verticales (repérées de A à C du bas vers le haut – cf Figure 6 ci-après). Les armatures verticales sont les plus proches du parement.



Photo 13 : vue sur la zone de mesures électrochimiques sur l'entretoise E11.

Entretoise (E11) sur culée RD entre les 2 poutres centrales

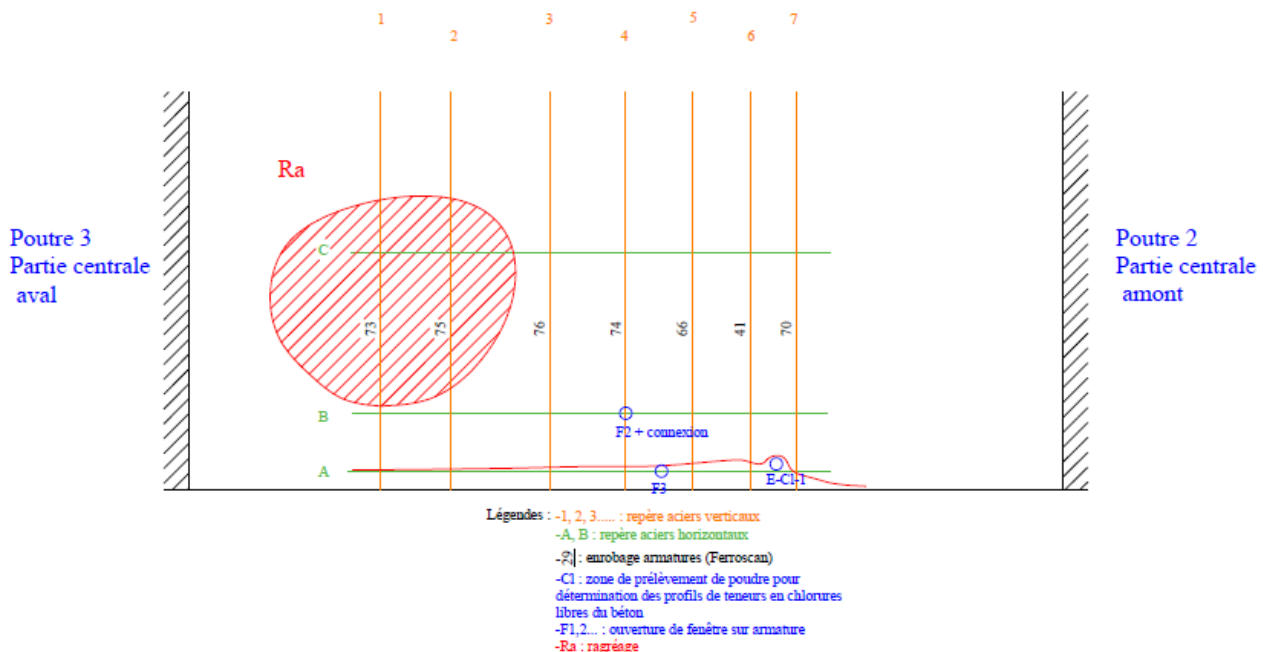


Figure 6 : schéma de la zone de mesures électrochimiques sur l'entretoise sur culée RD.

Mesures de résistivité électrique du béton :

Les mesures de résistivité électrique sont prises dans les mailles du ferrailage de la zone auscultée (pour chaque maille, la valeur retenue correspond à la moyenne de 4 mesures prises en faisant pivoter l'appareil sur lui-même. Les armatures verticales B et C étant espacées d'une cinquantaine de cm, les mailles ont été divisées en deux sous mailles : partie « haute » et partie « basse ».

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 C et B (haut)	53	61	82	65	91	87
entre C et B (bas)	48	45	70	61	45	34
entre B et A	18	17	23	17	20	

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 proposée ci-dessous.

Résistivité électrique (kΩ.cm)*	Risque de corrosion*	Pourcentage de mesures
$Re \geq 100$	Négligeable	0%
$50 \leq Re < 100$	Faible	47%
$10 \leq Re < 50$	Modéré	53%
$Re < 10$	Elevé	0%

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

Ces mesures indiquent que les armatures se trouvent dans un béton présentant un risque de corrosion modéré à faible sur la partie inférieure de la zone auscultée (entre les armatures horizontales A et B). Cela est très certainement lié aux venues d'eaux potentiellement chargées de sels de déverglaçage qui s'écoulent sur la face arrière de l'entretoise et se prolongent par capillarité en sous-face et en partie inférieure de la face avant de l'entretoise.

Potentiels électrode des armatures :

Les mesures de potentiels électrode des armatures 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 verticales (les plus proches du parement) :

Entretoise - armatures verticales (POTENTIELS mV)							
Armature n° :	1	2	3	4	5	6	7
val 1	-308	-299	-276	-256	-245	-223	-223
val 2	-317	-322	-260	-243	-244	-258	-259
val 3	-320	-282	-230	-208	-208	-221	-230
val 4	-336	-267	-238	-219	-229	-238	-243
val 5	-343	-322	-277	-263	-286	-292	-279
val 6	-347	-328	-301	**	-316	-320	-314
val 7	-371	-351	-333	-352	-363	-369	-339
val 8	-383	-339	-330	-365	-374	-389	-358

** L'absence de mesure (val 6 de l'armature n°4) correspond à la fenêtre F2.

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 C876-91 (1999) (avec électrode Cu/CuSO₄) : (cf. tableau ci-dessous).

Potentils d'armatures (mv)	Probabilité de corrosion	Pourcentage des mesures
> -200	Faible	0%
-200 à -350	Moyenne	82%
< -350	Forte	18%

Entretoise – armatures verticales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)							
Armature n° :	1	2	3	4	5	6	7
val 1							
val 2	0,9	2,3	1,6	1,3	0,1	3,5	3,6
val 3	0,3	4	3	3,5	3,6	3,7	2,9
val 4	1,6	1,5	0,8	1,1	2,1	1,7	1,3
val 5	0,7	5,5	3,9	4,4	5,7	5,4	3,6
val 6	0,4	0,6	2,4		3	2,8	3,5
val 7	2,4	2,3	3,2		4,7	4,9	2,5
val 8	1,2	1,2	0,3	1,3	1,1	2	1,9

Des gradients supérieurs à 10 mV/cm peuvent être le signe de la présence de zone anodique et donc de corrosion.

Armatures horizontales :

Entretoise - armatures horizontales (POTENTIELS mV)															
Armature	val 1	val 2	val 3	val 4	val 5	val 6	val 7	val 8	val 9	val 10	val 11	val 12	val 13	val 14	val 15
C	-326	-333	-341	-309	-304	-287	-278	-270	-264	-260	-256	-238	-242	-241	-246
B	-356	-330	-324	-317	-309	-301	-292	-287	**	-309	-313	-315	-317	-314	-312
A	-383	-378	-346	-334	-334	-330	-331	-339	-353	**	-364	-362	-355	-339	-343

** Les absences de mesure correspondent aux fenêtres F2 (val 9 de l'armature B) et F3 (val 10 de l'armature A).

Entretoise – armatures horizontales (GRADIENTS de POTENTIELS en mV/cm)															
Armature	val 1	val 2	val 3	val 4	val 5	val 6	val 7	val 8	val 9	val 10	val 11	val 12	val 13	val 14	val 15
C		0,7	0,8	3,2	0,5	1,7	0,9	0,8	0,6	0,4	0,4	1,8	0,4	0,1	0,5
B		2,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,5			0,4	0,2	0,2	0,3	0,2
A		0,5	3,2	1,2	0	0,4	0,1	0,8	1,4			0,2	0,7	1,6	0,4

Des gradients supérieurs à 10 mV/cm peuvent être le signe de la présence de zone anodique et donc de corrosion.

Les résultats sont similaires pour les deux orientations d'armatures avec des potentiels très électro-négatifs (fort risque de corrosion) et des gradients faibles (zone semble-t-il homogène).

Les mesures électrochimiques suggèrent un risque de corrosion élevé sur environ les 20 cm inférieurs de la zone auscultée qui correspondent à la zone la plus polluée par les chlorures.

À noter que pour les armatures horizontales, les différences de potentiel ne sont pas très marquées entre les armatures A et B alors que l'armature A est corrodée (fenêtre F3 & fracture le long de l'armature) et l'armature B ne l'est très vraisemblablement pas (fenêtre F2 réalisée au croisement des armatures B et 4 ne présentant pas de corrosion sur l'armature verticale, la plus proche du parement).

7 MESURES DE DIAMÈTRES RÉSIDUELS

Au cours du diagnostic, deux importants éclats sur fer, sur le talon d'une poutre et sur le sommier de la pile ont été mis à profit pour mesurer le diamètre résiduel des armatures ainsi dégagées après les avoir brossé pour enlever les produits de corrosion.

Les deux armatures concernées sont une armature longitudinale dans l'angle inférieur du talon de la poutre amont sur la travée RD et une armature horizontale sur le sommier de la pile (angle inférieur de la face latérale côté RD au droit de la poutre P3).

Diamètres (Φ) résiduels en mm			
Implantation	Φ résiduel	Φ initial	$\Phi_{\text{résiduel}} / \Phi_{\text{initial}}$
Talon poutre	38,9	40	0,97
Sommier pile	13,1	16	0,82



Photo 14 : vue sur éclat sur fer du talon de la poutre amont.



Photo 15 : zoom sur armature dégagée après grattage des parties non adhérentes.



Photo 16 : vue sur éclat sur fer sur le sommet de la pile (côté travée RD).



Photo 17 : zoom sur armature dégagée après grattage des parties non adhérentes.

8 DIAGNOSTIC DE CORROSION (CONCLUSION)

Les principales données issues du diagnostic corrosion des armatures des parties en béton armé du pont du Vaudioux sont synthétisées dans le tableau ci-après.

Partie d'ouvrage		Front carbonatation (mm)	Front chlorures (mm)	Enrobage e ₉₅ (mm)	Ouvertures fenêtres	Cas guide LCPC ⁽¹⁾
Hourdis	Entre poutres (partie courante)	27	0	31	/	I
	Entre poutres (dé-faut d'étanchéité)	27	> 50	31	Corrosion avec début de perte de masse (1 fenêtre) & corrosion superficielle (1 fenêtre)	III
	Encorbellement (partie courante)	0 ⁽²⁾	0	20	/	I
	Encorbellement (abouts des travées)	0 ⁽²⁾	12	20	/	II
Poutres	Âmes	21	0 ⁽³⁾	30	Au maximum corrosion superficielle (armature matée lors de l'ouverture – 2 fenêtres)	I
	Talon	21	0 ⁽³⁾	18	/	IV
Entretoises	Sur appui (âme face avant)	27	> 60	27	Absence de corrosion (2 fenêtres) & corrosion avec perte de masse (1 fenêtre)	VI
	Intermédiaire (âme)	27	0 ⁽³⁾	27	Absence de corrosion (2 fenêtres)	IV
Sommiers	Faces latérales	27	> 60	46	Absence de corrosion (3 fenêtres)	III

(1) : guide technique « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » du LCPC de décembre 2002 – cf. annexe C

(2) : encorbellement refaits en 1994 et protégés par un enduit depuis cette date. Le risque lié à la carbonatation est par conséquent très faible.

(3) : prélèvement réalisé sur la face intérieure de l'âme d'une poutre

La corrosion observée sur le pont du Vaudioux est liée à la présence de chlorures en quantité importante. Elle est, pour l'essentiel, circonscrite spatialement aux abouts des travées. Cette pollution trouve son origine dans les défauts d'étanchéité des joints de dilatation (écoulements importants constatés au niveau des 3 lignes d'appui) et est aggravée par la situation géographique de l'ouvrage : zone de gel sévère avec salage fréquent et situation au fond des gorges de la Lemme.

Dans tous les cas, **il est recommandé d'étancher les lignes de joints. Le projet de réparation devrait intégrer une réflexion visant à supprimer une, voire la totalité des lignes de joints** (attelage des travées sur pile ; transformation des abouts de l'ouvrage avec conception semi-intégrale...) en intégrant les contraintes d'exploitation de la voie portée.

Le béton est par ailleurs assez carbonaté (front de carbonatation moyen compris entre 21 et 27 mm) et bien que les estimations d'épaisseurs d'enrobage soient dans l'ensemble relativement importantes (mais très dispersées), sur certaines parties d'ouvrage, le front de carbonatation a atteint l'enrobage caractéristique e₉₅ : entretoises et talons des poutres.

Il est cependant possible de tempérer ce constat défavorable par celui réalisé lors de l'ouverture de fenêtres (en dehors des éclats et débuts d'éclats) qui ont mis en évidence peu d'armatures avec corrosion malgré des teneurs en chlorures très élevées (sommiers et entretoises sur appui par exemple).

De plus, les mesures de diamètres résiduels sur deux armatures, qui ont été rendues accessibles par l'apparition d'éclats de grandes dimensions, ont montré des pertes de diamètre encore modérées (de -3 % à -18%).

Vis-à-vis du risque lié aux chlorures en décomposant par parties d'ouvrage et en se référant au guide LCPC de décembre 2002 (cf annexe C), nous avons :

- **Hourdis entre poutres** : hors défaut d'étanchéité avéré, on se retrouve sur le hourdis dans le cas I « Aucune protection n'est nécessaire, sauf à titre préventif ». La marge entre le front de carbonatation et la position des premières armatures est cependant assez faible et malgré le fait que sur un ouvrage de 70 ans l'évolution de ce front sera à l'avenir très lente, **il serait souhaitable de réfléchir à la mise en œuvre d'un revêtement de protection pour ralentir la progression de la carbonatation.**

Au niveau du défaut d'étanchéité avéré, on se retrouve dans le cas III « Diminuer le taux de chlorures par une technique d'extraction adaptée ». Sur le hourdis entre poutres, les venues d'eau proviennent de défauts ponctuels de l'étanchéité générale de l'ouvrage (les entretoises sur appuis protègent le hourdis des venues d'eau en provenance des joints de dilatation). À noter que la chape d'étanchéité date de 1994 et que la couche de roulement sur ouvrage a été refaite peu de temps avant le présent diagnostic. Compte-tenu de l'âge de l'étanchéité (30 ans) et de la présence d'au moins un défaut, **il est préconisé de reprendre la chape lors de la prochaine réfection de la chaussée sur ouvrage.**

Sur le hourdis entre poutres, il est ainsi préconisé (outre l'étanchement des lignes de joints) :

- de reprendre la chape d'étanchéité au plus tard lors de la prochaine réfection de la couche de roulement,
 - de reprendre les éclats et les nids de cailloux (en particulier la zone correspondant aux mesures électrochimiques) en se conformant aux prescriptions de la norme NF P95-101,
 - de réfléchir à l'opportunité de mettre en œuvre un revêtement de protection qualifié (marquage CE suivant la norme EN 1504-2 de niveau de performance 2 pour la fonction principale de base du GA P18-902) pour ralentir la progression de la carbonatation.
-
- **Encorbellements** : les encorbellements sont « récents » (1994) et disposent d'un enduit de protection depuis cette date. Ce revêtement a néanmoins tendance à se décoller par plaques vers les lignes de joints.
Sur les encorbellements on se retrouve dans le cas I « Aucune protection n'est nécessaire, sauf à titre préventif » en partie courante et dans le cas II « Ralentir la pénétration de chlorures supplémentaires » en about de travée au niveau des écoulements en provenance des joints de chaussée.
Il est ainsi préconisé (outre l'étanchement des lignes de joints) :
 - d'enlever et reconstituer l'enduit de protection aux extrémités des travées (les zones à reprendre correspondent aux traces d'écoulement + 1 marge de sécurité de 1 m).
 - **Poutres & entretoises intermédiaires** : sur ces parties d'ouvrage, on se retrouve dans le cas I sur les âmes des poutres et dans le cas IV « Augmenter le pH du béton d'enrobage par réalcalinisation ou éliminer mécaniquement et remplacer le béton d'enrobage » sur les talons des poutres et les entretoises intermédiaires. Les ouvertures de fenêtres n'ont pas mis en évidence de corrosion sur les armatures dégagées.

Il est préconisé (outre l'étanchement des lignes de joints ; constat d'écoulements sous le talon de certaines poutres) :

- de reprendre les éclats et débuts d'éclats en se conformant aux prescriptions de la norme NF P95-101,
- de réfléchir à l'opportunité de mettre en œuvre un revêtement de protection qualifié (marquage CE suivant la norme EN 1504-2 de niveau de performance 2 pour la fonction principale de base du GA P18-902) pour ralentir la progression de la carbonatation.

- **Entretoises sur appuis & sommiers** : ces pièces sont soumises à une très forte pollution par les chlorures : la profondeur des prélèvements effectués (50 ou 60 mm) n'a pas permis de définir la profondeur du front de chlorures (profondeur à partir de laquelle le taux de chlorures libres repasse sous le seuil critique défini à 0,4% de la masse de ciment).

Les chlorures ont migré trop profondément pour envisager la méthode d'extraction électrochimique de chlorures.

La purge / reconstitution du béton pollué, impliquerait quant à elle d'éliminer, en première approximation (il faudrait réaliser des prélèvements complémentaires plus profonds pour estimer plus précisément la profondeur du front de chlorures, voire réaliser des carottages traversants), une dizaine de centimètres d'épaisseur de béton depuis tous les parements. Les faces arrières des entretoises, soumises directement aux écoulements, sont cependant très difficilement accessibles (cela nécessiterait la démolition des murs garde-grève, concevable néanmoins si le projet de réparation prévoit la transformation des abouts de l'ouvrage avec conception semi-intégrale mais même dans ce cas elles resteraient inaccessibles sur les piles).

Étant donné les épaisseurs des pièces concernées (40 et 30 cm pour respectivement les entretoises sur culée et entretoises sur pile & 40 et 30 cm pour respectivement l'épaisseur des sommiers sur les culées et sur la pile sur les documents en notre possession) ce type de travaux semble difficilement réalisable. Il semble préférable d'envisager le remplacement pur et simple des pièces concernées, ce qui nécessiterait de créer des appuis provisoires et de véliner l'ouvrage et aurait d'importantes répercussions sur son exploitation.

Rappel : un tel projet devrait intégrer une réflexion visant à supprimer une, voire la totalité des lignes de joints pour garantir dans le temps la pérennité des travaux envisagés.

La mise en œuvre d'une protection cathodique (anodes galvaniques ou courant imposé) est également envisageable, si les critères de la norme NF EN ISO 12696 peuvent être atteints, à l'issue d'une étude spécifique, devant être réalisée par des personnels possédant les certifications CEFACOR appropriées. Elle présenterait cependant les mêmes difficultés d'accessibilité aux faces arrières des entretoises sur culées et sur la pile.

En fonction des objectifs / priorités de gestion du maître d'ouvrage (l'ouvrage est âgé de 70 ans) et en s'appuyant sur le fait que les ouvertures de fenêtres se sont révélées plutôt rassurantes, il est possible d'envisager un scénario « a minima » constitué de réparations locales du béton armé et d'anticiper le remplacement de l'ouvrage à l'horizon de deux ou trois décennies (en fonction du niveau d'entretien courant / spécialisé consacré à l'ouvrage, de la fréquence de salage...). Une telle option de gestion suppose d'assurer un suivi rigoureux de l'évolution de l'ouvrage (inspections détaillées, visites périodiques...). Ces travaux « a minima » pourraient alors consister à :

- procéder à la réfection de la chape d'étanchéité lors de la prochaine réfection de la chaussée sur ouvrage ;
- renouveler les lignes de joints de chaussée pour assurer leur étanchéité (en particulier au droit des encorbellements) ;
- reprendre les éclats et débuts d'éclats du béton en se conformant aux prescriptions de la norme NF P95-101.

ANNEXE A - PHOTOS (CARBONATATION & FENÊTRES)

Note : Pour les essais liés à l'estimation de la profondeur du front de carbonatation, les parements (côté extérieur de la carotte) sont situés en partie haute des photos.



Photo 18 : Carotte E-Ca-1.



Photo 19 : Carotte E-Ca-2.



Photo 20 : Carotte E-Ca-3.



Photo 21 : Carotte E-Ca-4.



Photo 22 : Carotte E-Ca-5.



Photo 23 : Carotte E-Ca-6.



Photo 24 : Carotte P-Ca-1.



Photo 25 : Carotte P-Ca-2.



Photo 26 : Carotte P-Ca-3.



Photo 27 : Carotte P-Ca-4.

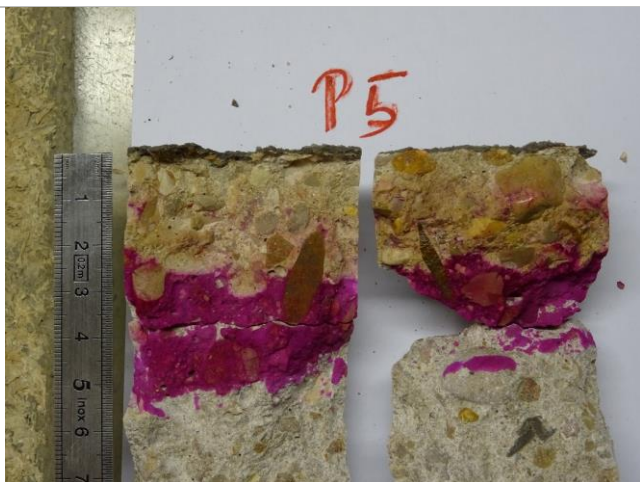


Photo 28 : Carotte P-Ca-5.

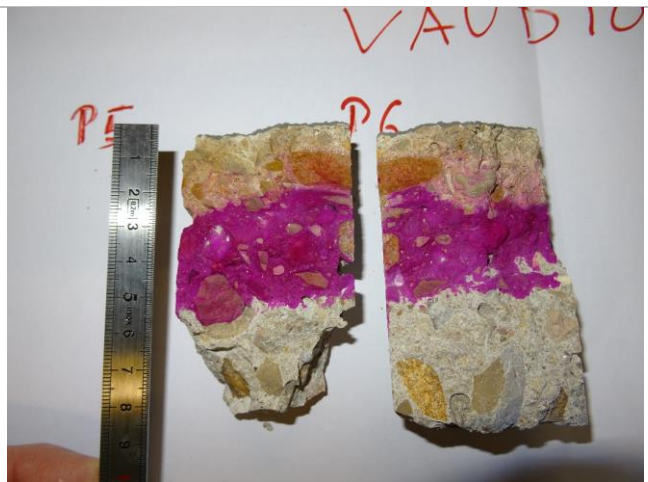


Photo 29 : Carotte P-Ca-6.



Photo 30 : vue sur la fenêtre F1. Absence de corrosion.



Photo 31 : Emplacement de la fenêtre F1 à proximité de C-Cl-1 (fenêtre à gauche sur la photo).



Photo 32 : Emplacement fenêtre F4 à proximité de C-Cl-2 (fenêtre à gauche sur la photo).



Photo 33 : Vue sur la fenêtre F4. Absence de corrosion.



Photo 34 : Emplacement fenêtre F5 à proximité de C-Cl-3 (fenêtre à gauche sur la photo : tache de rouille).



Photo 35 : vue sur la fenêtre F5. Absence de corrosion.



Photo 36 : Vue sur fenêtres F2 (gauche), F3 (pointée par le crayon) et le prélèvement E-CI-1 (droite)..



Photo 37 : Vue sur la fenêtre F2.



Photo 38 : Vue sur la fenêtre F3.



Photo 39 : Vue sur la fenêtre F11 (droite) à proximité du prélèvement E-CI-2.



Photo 40 : Vue sur fenêtre F11..



Photo 41 : Vue sur la fenêtre F6.



Photo 42 : Vue sur la fenêtre F9.



Photo 43 : Vue sur la fenêtre F7.



Photo 44 : Vue sur la fenêtre F8.



Photo 45 : Vue sur la fenêtre F10 (droite), H-Cl-3 (milieu) et la connexion aux armatures pour les mesures électrochimiques (gauche).



Photo 46 : vue sur la fenêtre F10.



Photo 47 : Vue sur la connexion aux armatures.

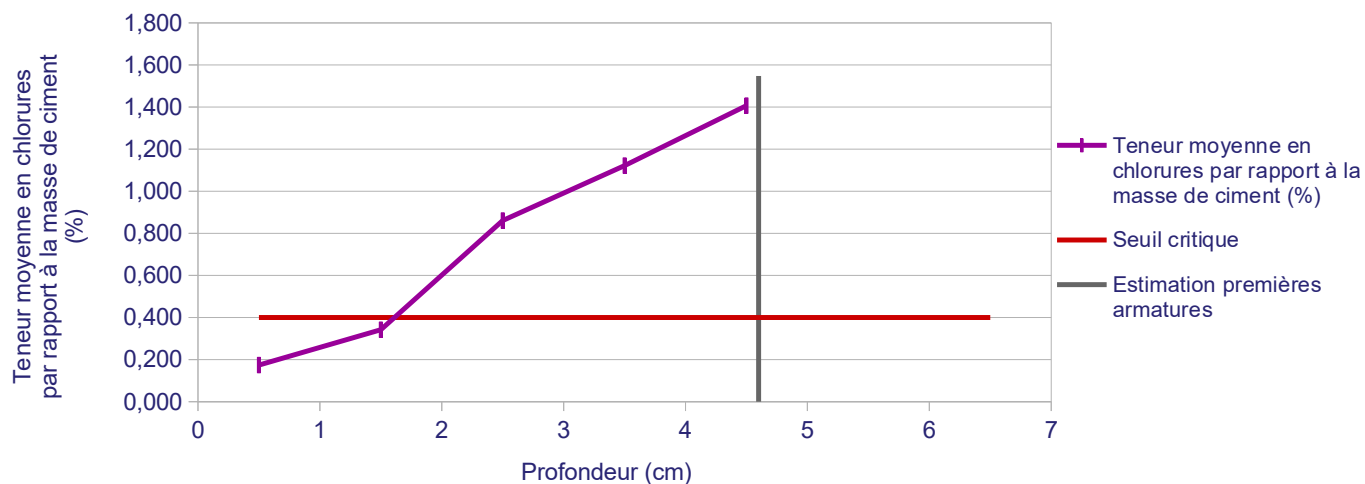
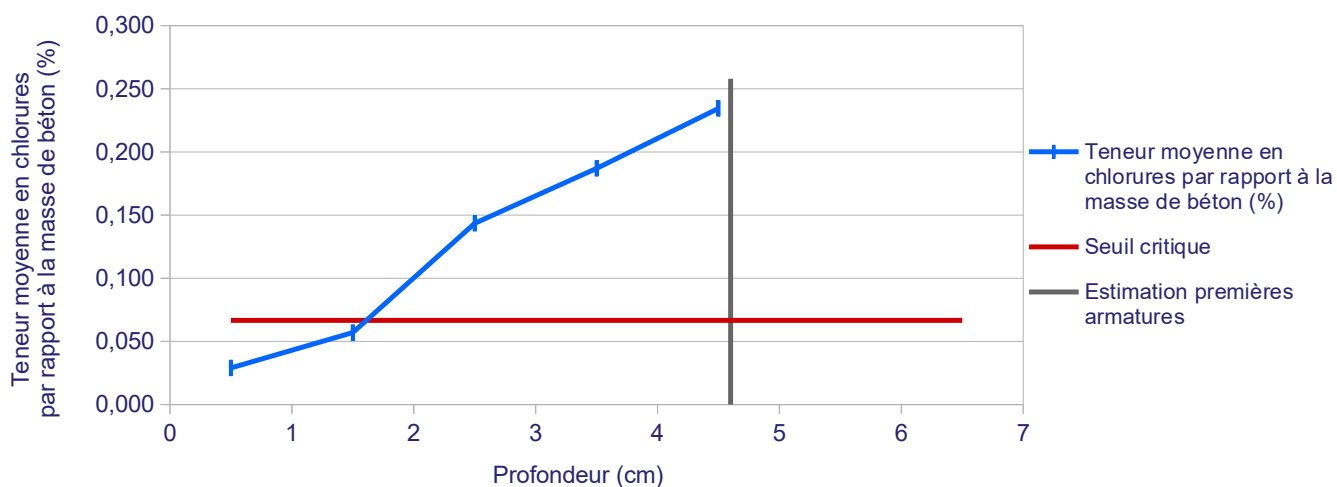
ANNEXE B - PROFILS DE TENEURS EN CHLORURES

Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	C-CL-1
Descriptif de la zone de prélèvement :	Face latérale du sommier de la Culée RD
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	4,6
Date(s) des essais :	23/01/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
C-CL-1				
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	5,00214	0,029 0,029	0,029	0,174
1-2	5,00445	0,059 0,055	0,057	0,342
2-3	5,00208	0,144 0,143	0,144	0,861
3-4	5,00303	0,184 0,190	0,187	1,122
4-5	5,00224	0,235 0,234	0,235	1,407
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,000	0,000
Front de chlorures (cm)			N.A.	

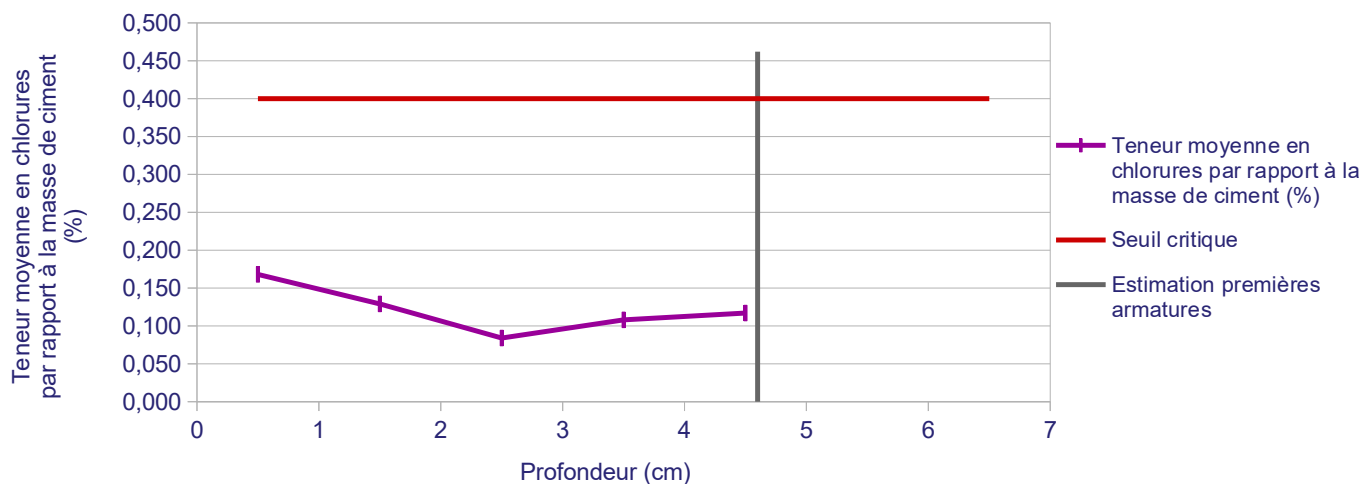
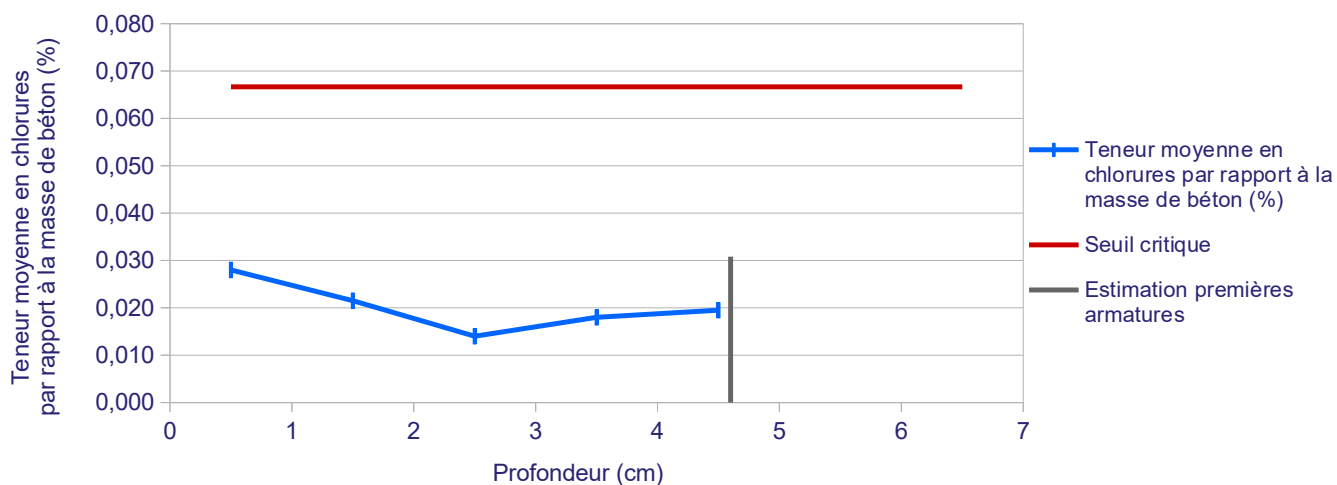


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	C-CL-2
Descriptif de la zone de prélèvement :	Face latérale du sommier de la culée RG
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	4,6
Date(s) des essais :	24/01/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
C-CL-2				
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	5,00489	0,030 0,026	0,028	0,168
1-2	5,00382	0,022 0,021	0,022	0,129
2-3	5,00180	0,014 0,014	0,014	0,084
3-4	5,00475	0,017 0,019	0,018	0,108
4-5	5,00534	0,019 0,020	0,020	0,117
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,000	0,000
Front de chlorures (cm)			N.A.	

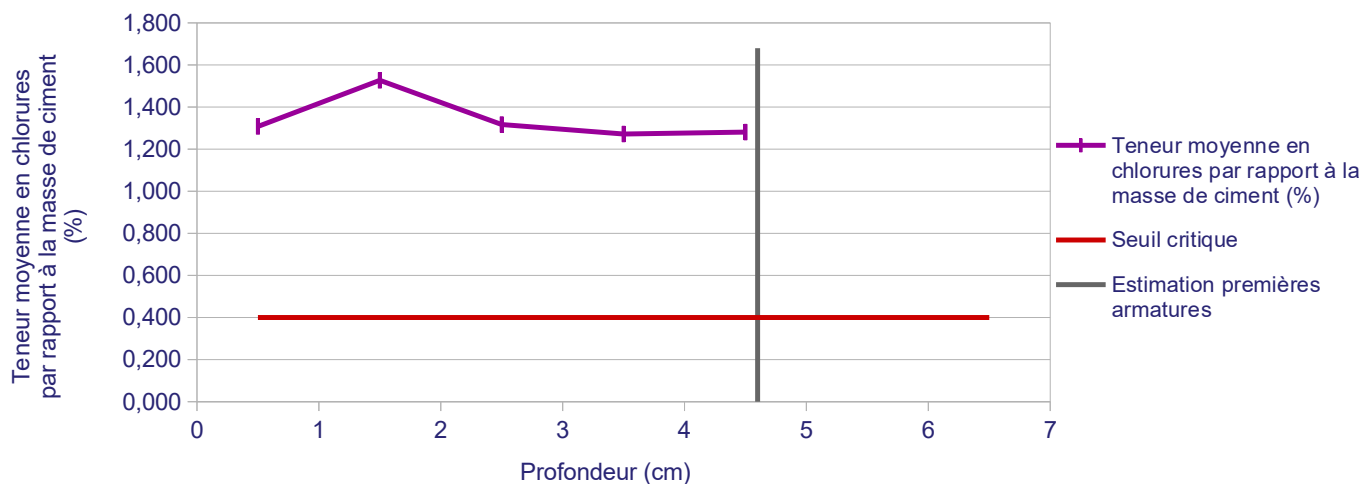
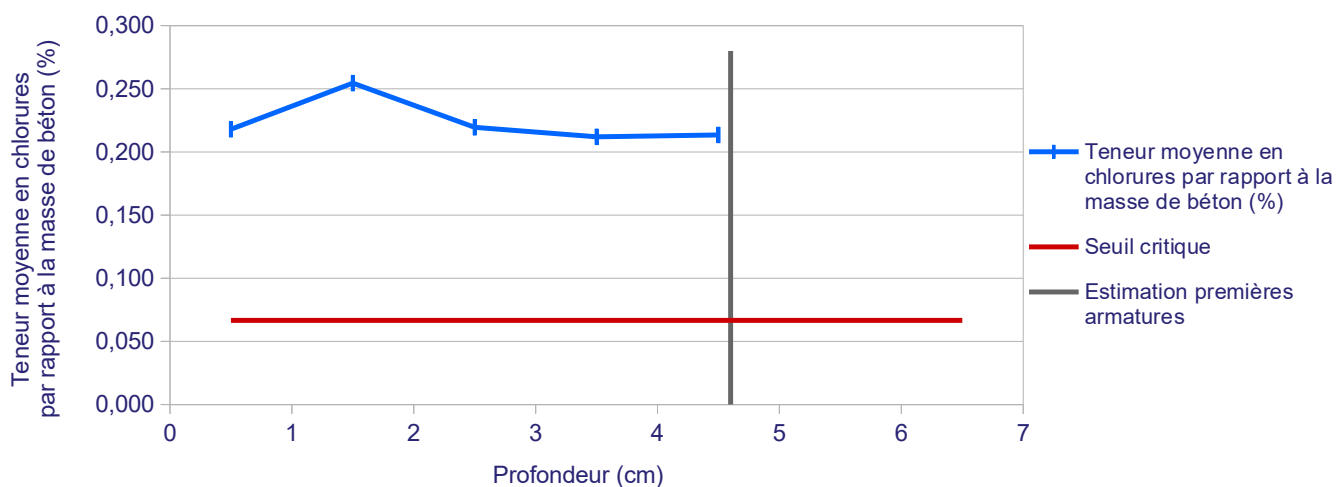


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	C-CL-3
Numéro de projet NOVA :	23-CE-0075
Année de construction :	1953-1954
Date(s) de prélèvement :	23/10/23
Descriptif de la zone de prélèvement :	Face latérale RG du sommier de la pile
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	4,6
Date(s) des essais :	25/01/24

Nom du chargé(e) d'essai Pascale ROMAN DUPIN	Date et signature du chargé(e) d'essai
Nom du responsable d'essai Jérémy ROTH	Date et signature du responsable d'essai

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
C-CL-3				
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	5,00113	0,220 0,216	0,218	1,308
1-2	5,00075	0,260 0,249	0,255	1,527
2-3	5,00188	0,221 0,218	0,220	1,317
3-4	5,00483	0,205 0,219	0,212	1,272
4-5	5,00290	0,207 0,220	0,214	1,281
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,000	0,000
Front de chlorures (cm)			N.A.	

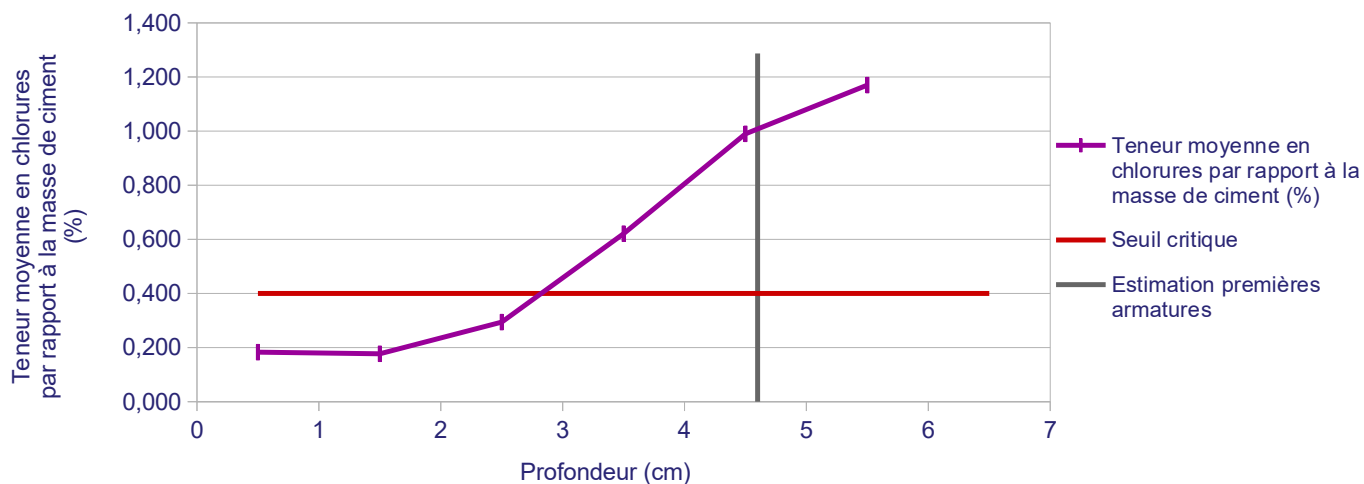
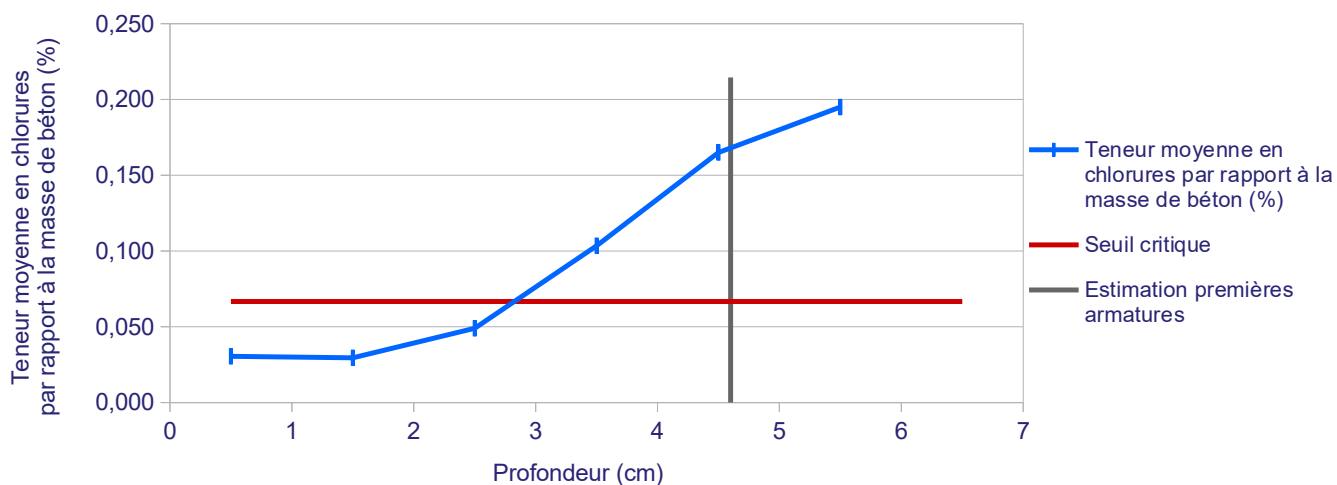


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	C-CL-4
Descriptif de la zone de prélèvement :	Face latérale RD du sommier de la pile
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	4,6
Date(s) des essais :	26/01/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
C-CL-4				
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	5,00446	0,029	0,031	0,183
		0,032		
1-2	5,00358	0,030	0,030	0,177
		0,029		
2-3	5,00339	0,048	0,049	0,294
		0,050		
3-4	5,00311	0,102	0,104	0,621
		0,105		
4-5	5,00268	0,164	0,165	0,990
		0,166		
5-6	5,00089	0,195	0,195	1,170
		0,195		
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,168	1,008
Front de chlorures (cm)			N.A.	

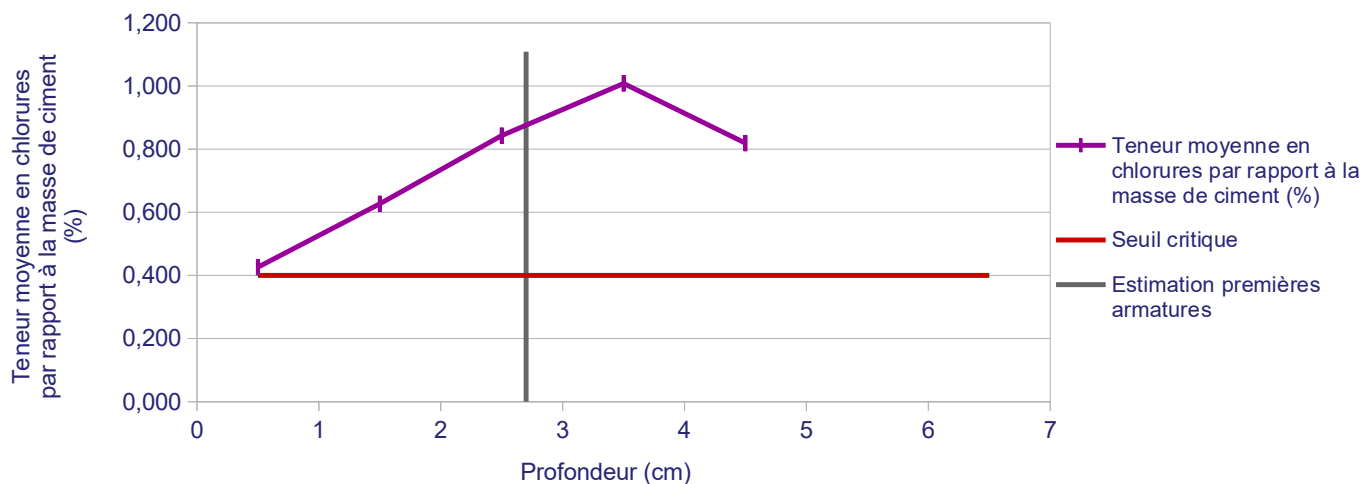
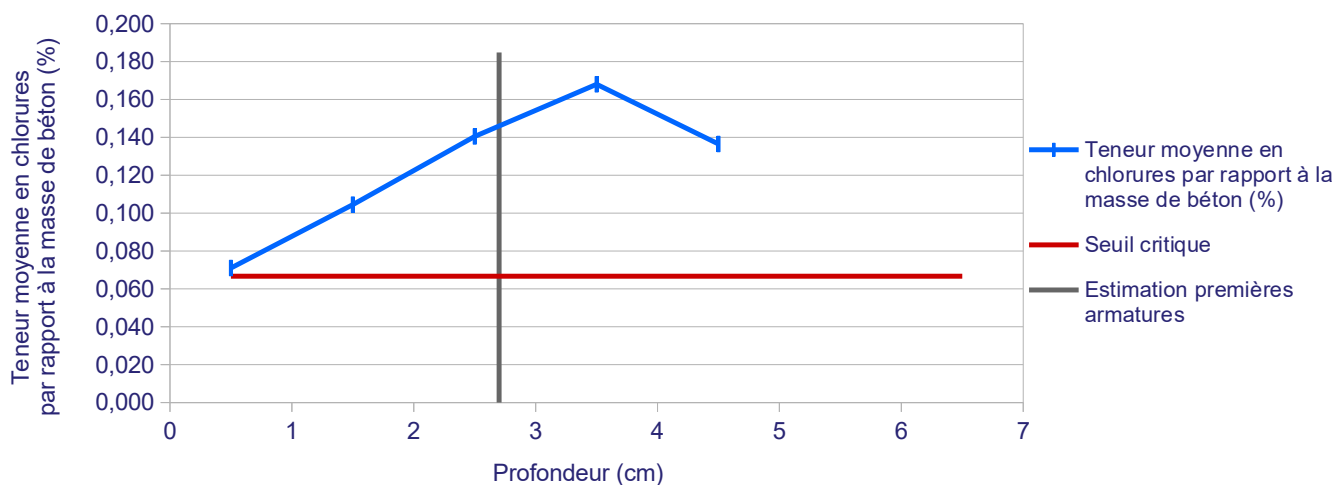


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	E-CL-1
Descriptif de la zone de prélèvement :	Âme extérieure de l'entretoise sur culée RD
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	2,7
Date(s) des essais :	30/01/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
E-CL-1				
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	5,00197	0,070 0,072	0,071	0,426
1-2	5,00239	0,102 0,107	0,105	0,627
2-3	5,00483	0,143 0,138	0,141	0,843
3-4	5,00349	0,163 0,173	0,168	1,008
4-5	5,00281	0,138 0,135	0,137	0,819
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,146	0,876
Front de chlorures (cm)			N.A.	

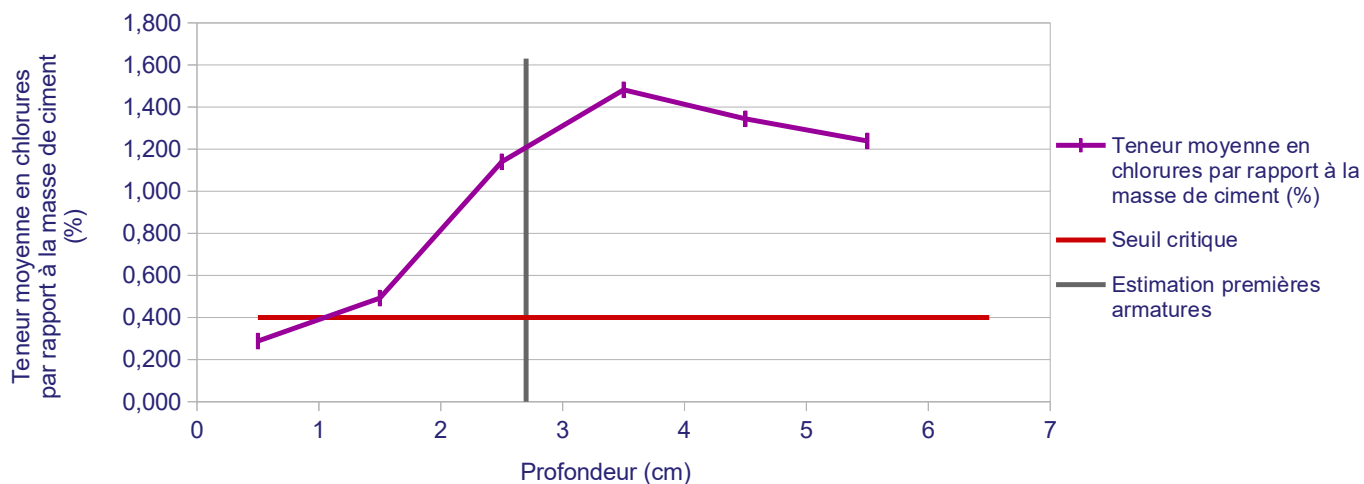
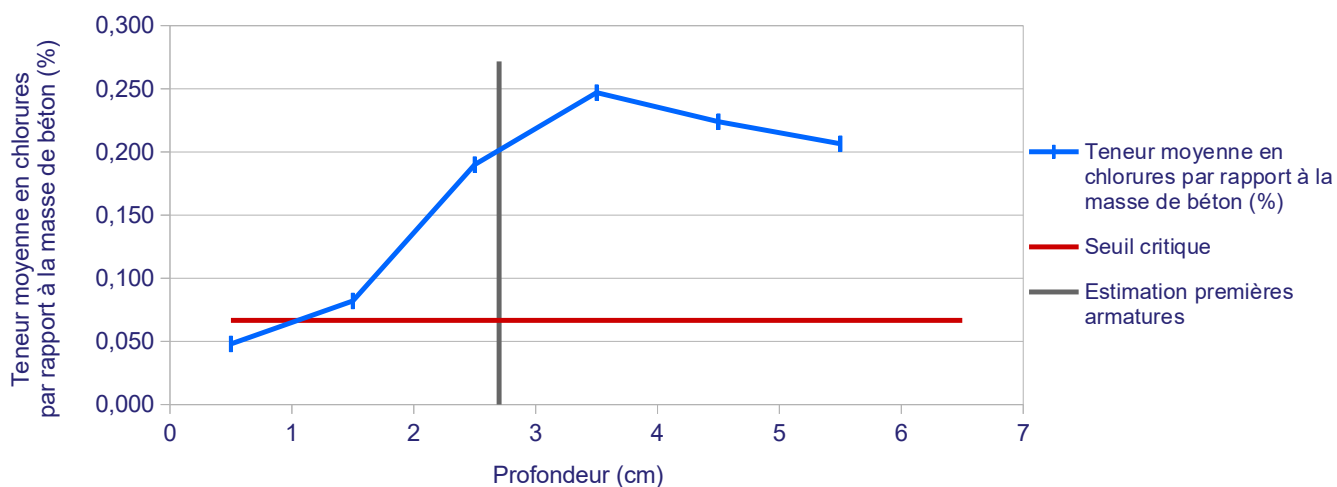


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	E-CL-2
Descriptif de la zone de prélèvement :	Âme extérieure de l'entretoise sur culée RG
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	2,7
Date(s) des essais :	01/02/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
E-CL-2				
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	5,00287	0,050 0,046	0,048	0,288
1-2	5,00398	0,085 0,079	0,082	0,492
2-3	5,00378	0,189 0,191	0,190	1,140
3-4	5,00083	0,241 0,253	0,247	1,482
4-5	5,00082	0,216 0,232	0,224	1,344
5-6	5,00597	0,206 0,207	0,207	1,239
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,201	1,208
Front de chlorures (cm)			N.A.	

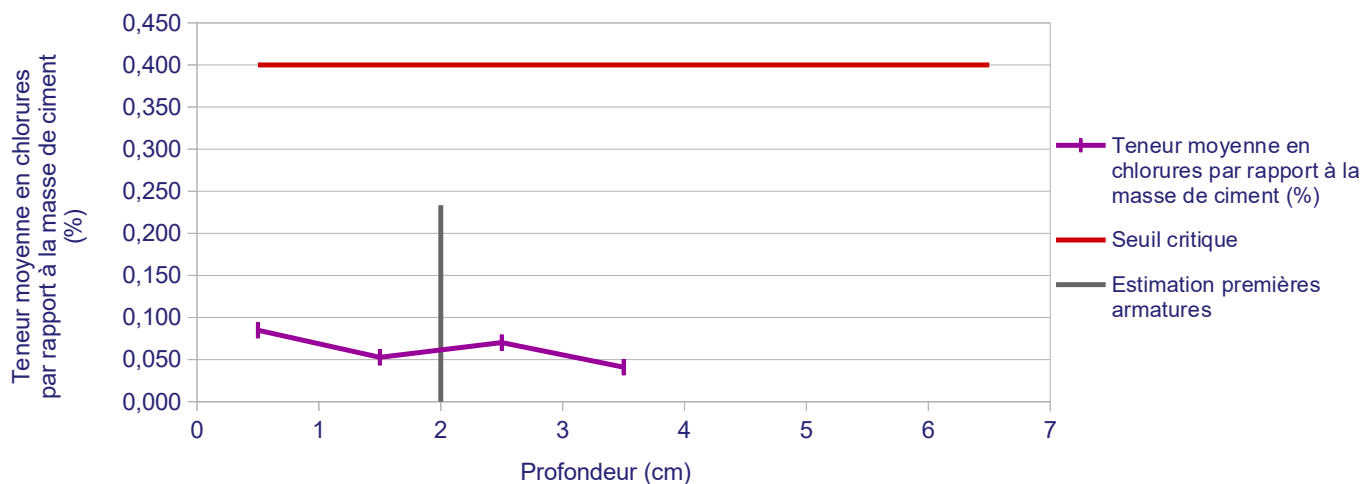
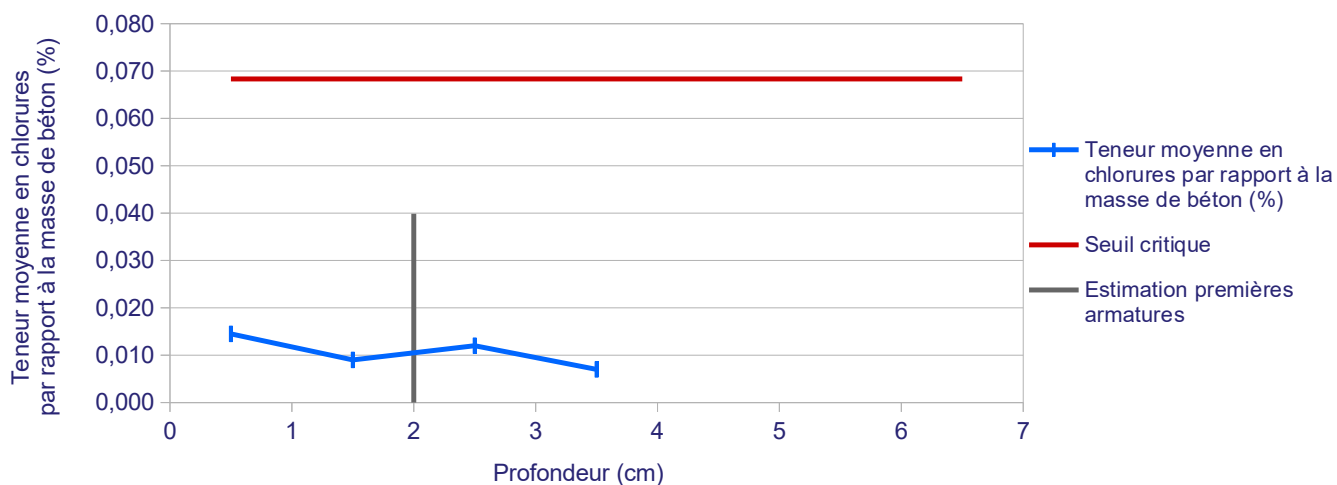


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	H-CL-1
Descriptif de la zone de prélèvement :	Encorbellement amont (zone sans désordre apparent)
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	410
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	2,0
Date(s) des essais :	02/02/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
H-CL-1				
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	5,00089	0,016 0,013	0,015	0,085
1-2	5,00607	0,010 0,008	0,009	0,053
2-3	5,00188	0,015 0,009	0,012	0,070
3-4	5,00309	0,007 0,007	0,007	0,041
4-5				
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,011	0,061
Front de chlorures (cm)			N.A.	

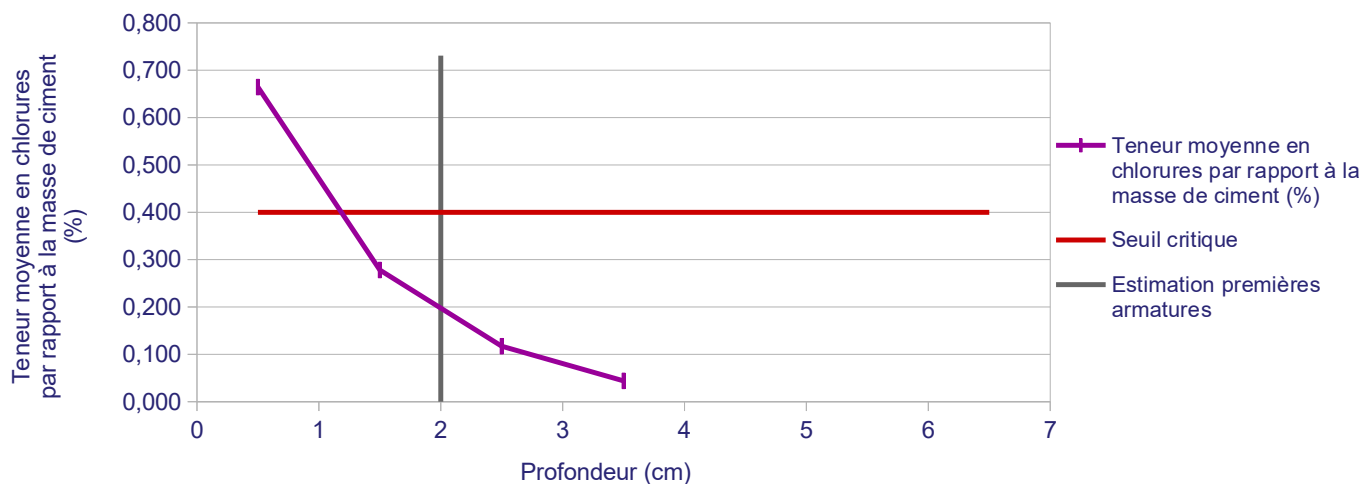
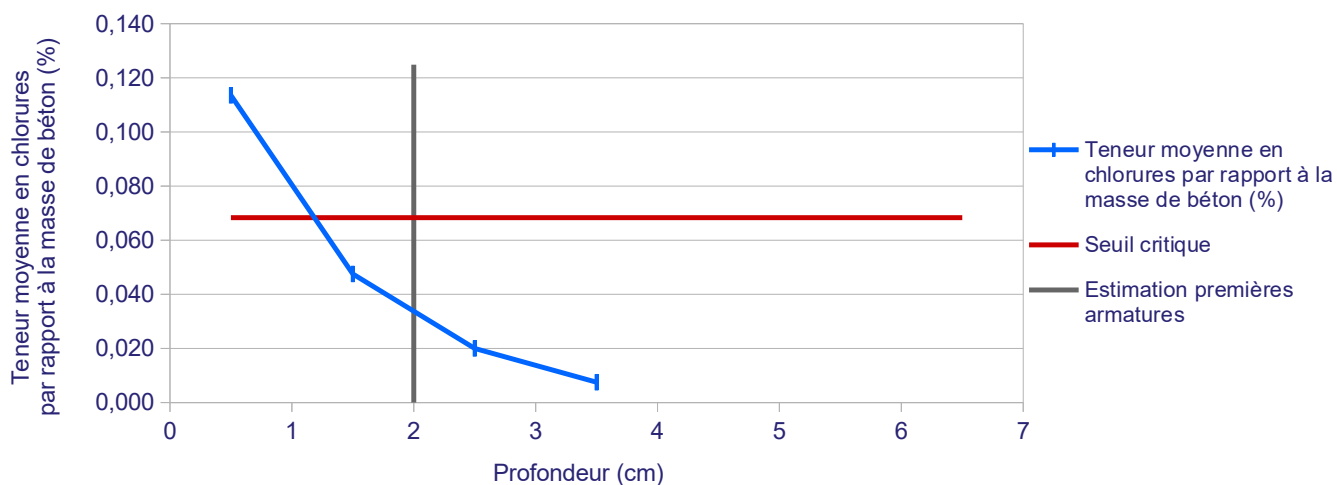


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	H-CL-2
Descriptif de la zone de prélèvement :	Encorbellement amont au droit de pile (écoulements)
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	410
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	2,0
Date(s) des essais :	02/02/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
H-CL-2				
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	5,00839	0,113 0,114	0,114	0,664
1-2	5,00379	0,047 0,048	0,048	0,278
2-3	5,00317	0,023 0,017	0,020	0,117
3-4	5,00424	0,008 0,007	0,008	0,044
4-5				
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,034	0,198
Front de chlorures (cm)			1,2	

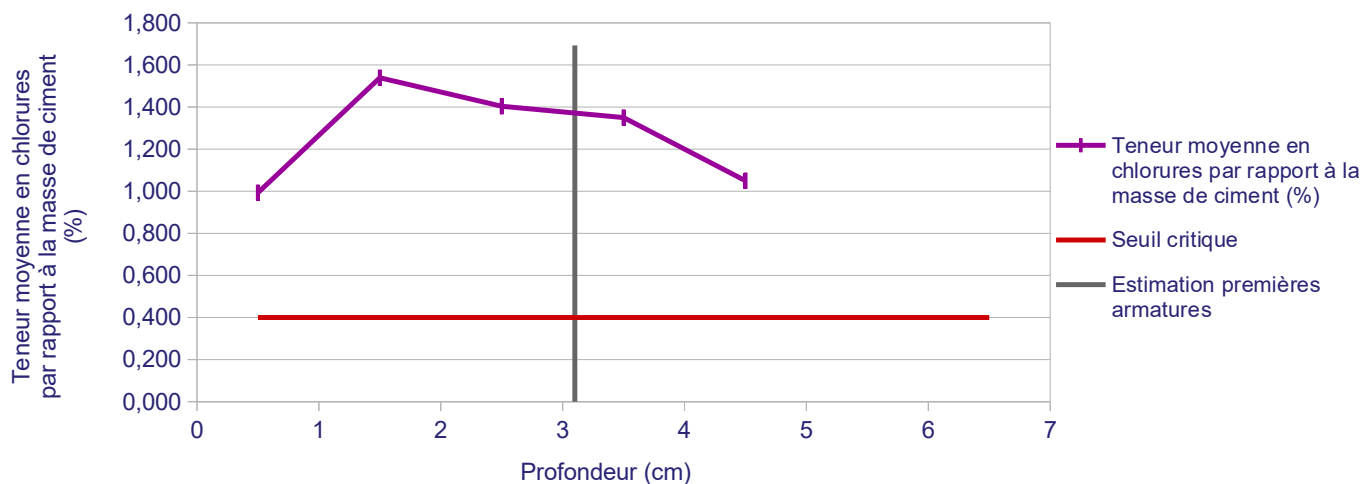
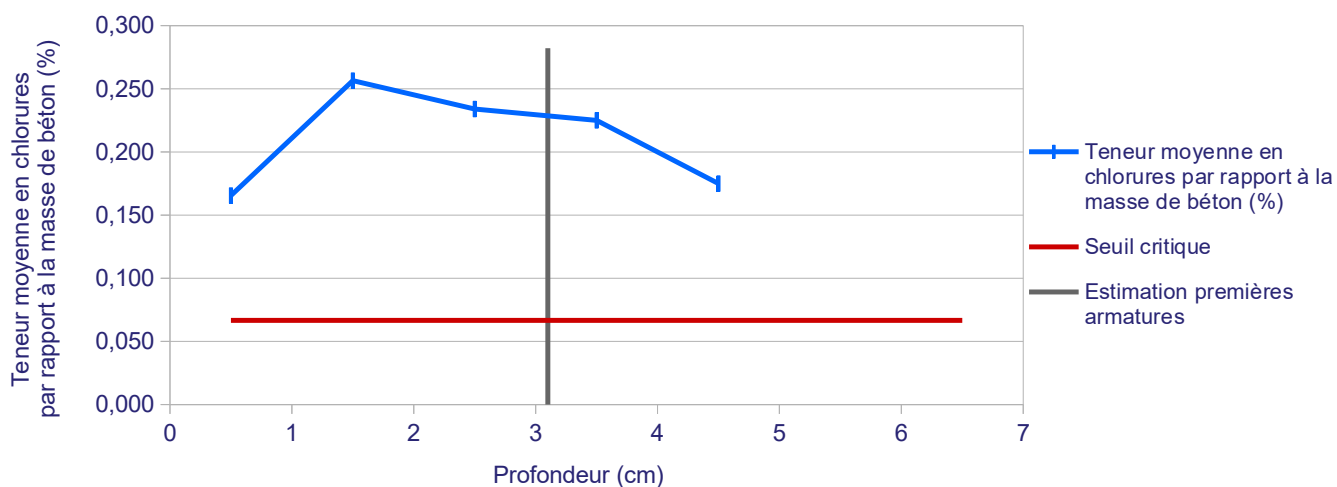


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	H-CL-3
Descriptif de la zone de prélèvement :	Hourdis entre poutres (défaut d'étanchéité)
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	3,1
Date(s) des essais :	05/02/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
H-CL-3				
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	5,00495	0,165 0,166	0,166	0,993
1-2	5,00075	0,246 0,267	0,257	1,539
2-3	5,00495	0,222 0,246	0,234	1,404
3-4	5,00349	0,236 0,214	0,225	1,350
4-5	5,00247	0,168 0,182	0,175	1,050
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,229	1,372
Front de chlorures (cm)			N.A.	

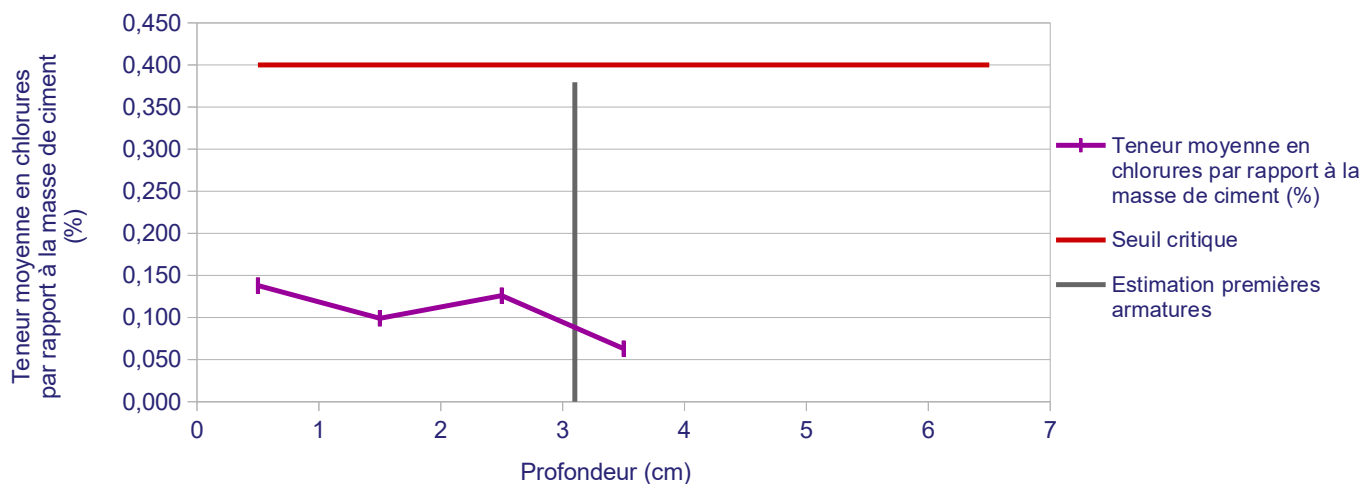
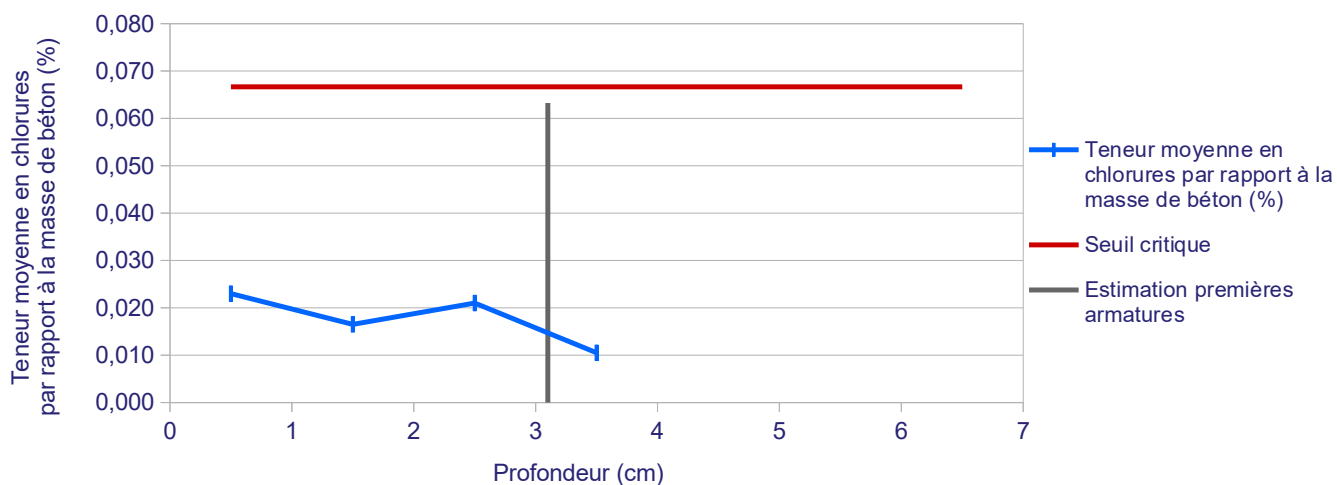


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	H-CL-4
Numéro de projet NOVA :	23-CE-0075
Année de construction :	1953-1954
Date(s) de prélèvement :	25/10/23
Descriptif de la zone de prélèvement :	Hourdis entre poutres (partie courante)
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	3,1
Date(s) des essais :	09/02/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
H-CL-4				
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	5,00084	0,023 0,023	0,023	0,138
1-2	5,00485	0,019 0,014	0,017	0,099
2-3	5,00044	0,025 0,017	0,021	0,126
3-4	5,00322	0,015 0,006	0,011	0,063
4-5				
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,015	0,088
Front de chlorures (cm)			N.A.	

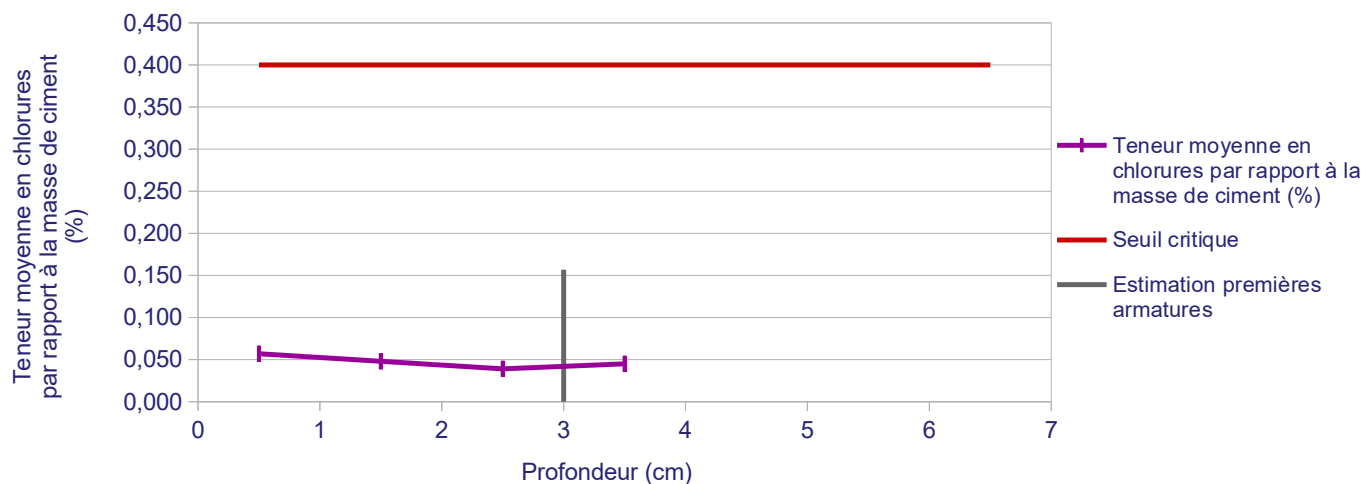
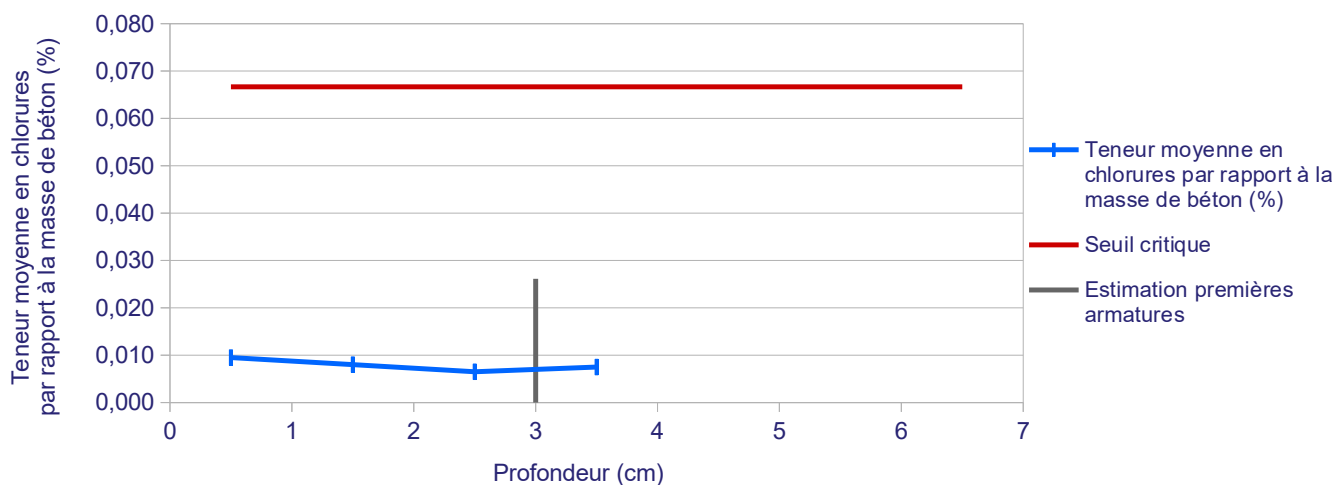


Détermination du profil de teneur en chlorures libres d'un béton selon le mode opératoire du recueil de l'AFPC-AFREM

Informations générales	
Nom du client :	DIR Est
Nom de l'ouvrage :	Pont du Vaudioux
Nom de l'échantillon :	P-CL-1
Descriptif de la zone de prélèvement :	Âme poutre centrale aval (zone sans désordre apparent)
Type d'échantillonnage :	☒ Poudre ☐ Fragment ☐ Carotte
Teneur en ciment du béton de l'échantillon (kg/m³) :	400
Estimation de la profondeur des premières armatures (cm) :	3,0
Date(s) des essais :	09/02/24

Nom du chargé(e) d'essai	Date et signature du chargé(e) d'essai
Pascale ROMAN DUPIN	
Nom du responsable d'essai	Date et signature du responsable d'essai
Jérémy ROTH	

Appareillage				
Balance : modèle 1404 MP de Sartorius		Titrateur : modèle 848 Titrino Plus de Metrohm		
Résultats				
P-CL-1				
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	5,00568	0,010 0,009	0,010	0,057
1-2	5,00521	0,005 0,011	0,008	0,048
2-3	5,00356	0,008 0,005	0,007	0,039
3-4	5,00393	0,009 0,006	0,008	0,045
4-5				
5-6				
6-7				
Teneur en chlorures au niveau des premières armatures (%)			0,007	0,042
Front de chlorures (cm)			N.A.	



***ANNEXE C - GUIDE TECHNIQUE « PROTECTION DES BÉTONS PAR APPLICATION DE PRODUITS À LA SURFACE DU PAREMENT »
DU LCPC DE DÉCEMBRE 2002 (PAGES 44-45) + LOGI-
GRAMME DE LA FICHE D1-1 DU CAHIER INTERACTIF UGE-
CEREMA « AUSCULTATION 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.

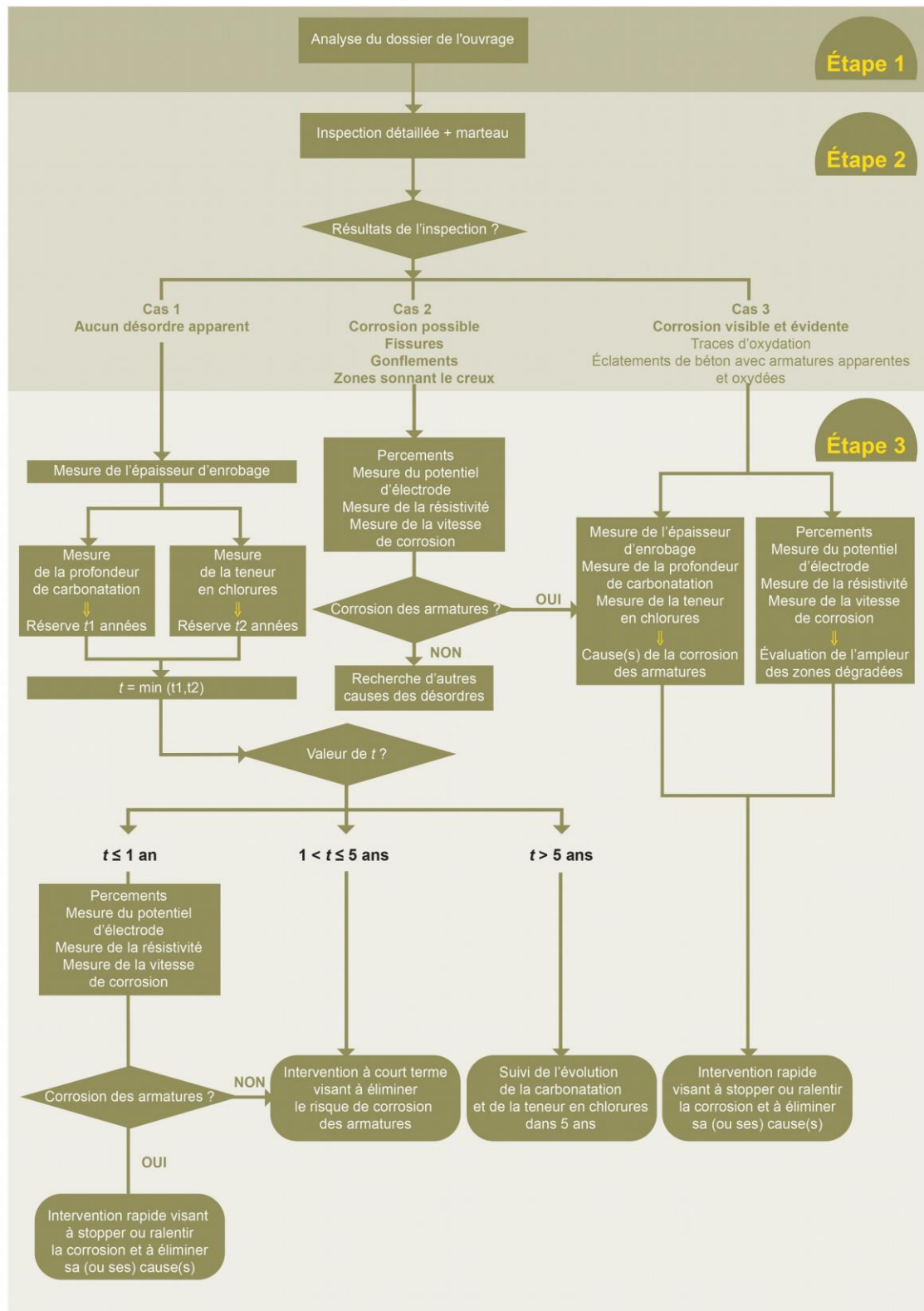
Les systèmes de protection seront jugés efficaces contre l'écaillage si cet écaillage est nul après 56 cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

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 D - SCHÉMAS DES ZONES DE MESURES ÉLECTROCHIMIQUES

Hourdis entre poutres travée RG ext RG entre les 2 poutres centrales

Entretoise 0 sur culée RG



CEREMA - Agence d'AUTUN

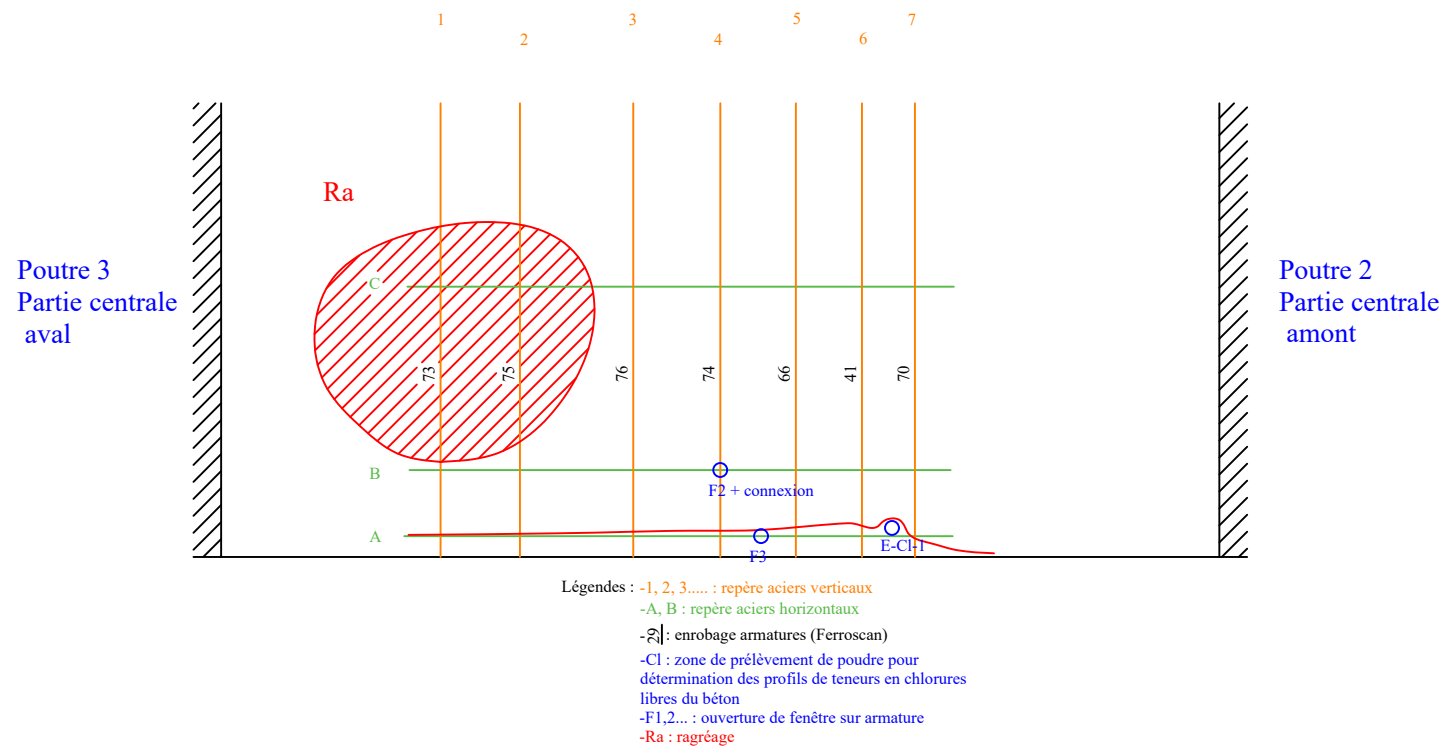
Autocad 2022 : MAYER Guillaume

Ouvrages d'Art

Juillet 2024

Echelle : 1/20e

Entretoise (E11) sur culée RD entre les 2 poutres centrales



CEREMA - Agence d' AUTUN

Autocad 2022 : **MAYER Guillaume**

Ouvrages d'Art

Juillet 2024

Echelle : 1/20e



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN