

DIR CENTRE EST

Pont de Piquepierre

Diagnostic béton armé et
préconisations

Référence A20 02491 - DIR Centre Est - Pont de Piquepierre_001_00a
Indice 00
Date 17/09/2020



DIR CENTRE EST

Pont de Piquepierre

Diagnostic béton armé et préconisations

Rédigé par A. CASAS

Contrôlé par A. BACHELIER

Sous la direction de C. OSTROWSKI

Désignation du document

Référence	Nature	Nb pages	Nb annexe
A20 02491 - DIR Centre Est - Pont de Piquepierre/001	Diagnostic	25	3

Suivi des indices

Indice	Date	Modification	Destinataire
A	17/09/2020	1 ^{ère} édition	Mme Raphaëlle Sadone

SIXENSE ENGINEERING - Agence Rhône Alpes
Activillage
15, allée des Ginkgos
69500 BRON
Tel : 04 72 37 03 39 – Fax : 04 72 37 02 30
www.sixense-group.com

Sommaire

I - Contexte	4
I.1 - Objet.....	4
I.2 - Localisation des zones.....	5
I.3 - Investigations sur site	5
I.4 - Essais en laboratoire	6
I.5 - Rapport d'étude.....	6
I.6 - Conditions d'intervention	6
II - Intervention sur site.....	7
II.1 - Inspection	7
II.2 - Implantation des essais et prélèvements	8
II.3 - Résultats des essais in situ	9
II.3.1 - Mesures de potentiel.....	9
II.3.2 - Mesures d'enrobage	10
II.3.3 - Mesures de profondeur de carbonatation.....	10
III - RESULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE.....	11
III.1 - Liste des essais	11
III.2 - Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau	11
III.3 - Estimation de la teneur en liant hydraulique	12
III.4 - Dosage des ions chlorure.....	13
IV - Synthèse des résultats.....	15
V - Conclusion.....	16
VI - Stratégies de réparation	18
VI.1 - Cadre normatif des principes de réparation.....	18
VI.2 - Référentiels, guides et recommandations techniques.....	19
VI.3 - Stratégie de réparation « classique »	21
VI.3.1 - Réparation classique.....	21
VI.3.2 - Limites	22
VI.3.3 - Avis sur la stratégie de réparation classique	22
VI.4 - Stratégie de réparation « renforcée »	23
VI.4.1 - Avantages	23
VI.4.2 - Choix du type de protection cathodique	23
VI.4.3 - Choix de la protection cathodique adaptée	24
VI.4.4 - Synthèse sur les stratégies de réparation renforcée	25

Liste des annexes

Annexe 1 – Planches techniques	26
Annexe 2 – Reportage photographique des prélèvements	27
Annexe 3 – Méthodologie des essais en laboratoire.....	29

I - Contexte

I.1 - Objet

Le présent rapport est établi par SIXENSE Engineering. Il concerne les investigations menées sur le pont de Piquepierre à Saint Martin Le Vinoud (38).



Tableau 1 : Géolocalisation de l'ouvrage



Tableau 2 : Vue générale de l'ouvrage

L'ouvrage est un pont mixte constitué de 2 tabliers indépendants :

- Tablier A : sens Grenoble -> Lyon,
- Tablier B : sens Lyon -> Grenoble.

Il franchit une travée routière (bretelle d'entrée sur la RN481), une piste cyclable et des voies SNCF. Il a été construit en 1976.

Des désordres liés à la circulation d'eau chargée de sels de déverglaçage ont été identifiés dans les IDP précédentes. La DIR CENTRE EST, maître d'ouvrage du pont, souhaite avoir :

- Un relevé actualisé des désordres détectés dans les IDP précédentes,
- Un diagnostic du béton armé de différentes zones du pont,
- Des préconisations des travaux de réparation à effectuer.

Le programme de diagnostic a été établi par la DIR CENTRE EST (et la mission a été confiée au bureau d'études SIXENSE Engineering).

Nota : le diagnostic ne porte ni sur la structure métallique ni sur les éléments de sécurité de l'ouvrage.

I.2 - Localisation des zones

Le diagnostic porte sur 6 zones réparties sur la travée routière :

Zone	1	2	3	4	5	6
Partie d'ouvrage	Tablier A Côté Nord	Tablier B Côté Sud	Tabliers A et B TPC - culée	Tabliers A et B TPC - pile	Culée Est Mur en aile	Tablier A Culée Est
Éléments sondés	Corniche face verticale Corniche sous-face Longrines	Corniche face verticale Corniche sous-face Longrines	Sous face d'encorbellement	Sous face d'encorbellement	Voile	Mur de front Sommier Mur garde-grève Tablier - sous face

Tableau 3 : Zones d'investigation et éléments sondés

Nota : ces zones ont été déterminées par le maître d'œuvre et sont toutes dégradées.

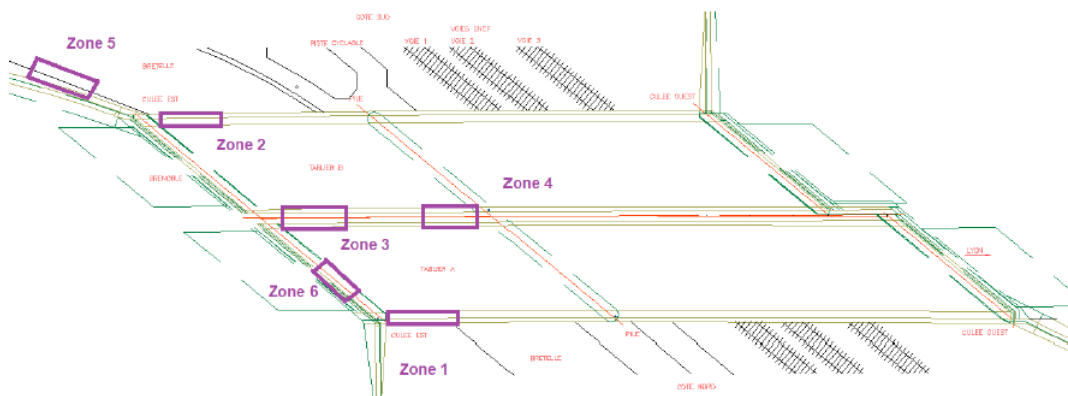


Tableau 4 : Implantation des zones d'investigation

I.3 - Investigations sur site

Sur site, l'ouvrage a fait l'objet des investigations suivantes :

- Inspection visuelle de l'ensemble de l'ouvrage côté travée routière. Il s'agit d'une observation rapide, le but étant de s'assurer qu'il n'y pas de désordres supplémentaires sur l'ouvrage à ceux décrits dans les IDP précédentes.
- Réalisation d'investigations approfondies sur chacune des zones comprenant :
 - > Sonnage au marteau pour détecter les zones décollées,
 - > Mesures d'enrobage des armatures,
 - > Prélèvement d'échantillons de béton par carottage et poudre pour analyse en laboratoire,
 - > Mesures de potentiels d'électrodes,
 - > Mesures de profondeur de carbonatation.

I.4 - Essais en laboratoire

En laboratoire, les essais suivants ont été réalisés sur les échantillons de béton prélevés :

- Mesure de la porosité et la densité,
- Détermination du dosage en ciment,
- Détermination de la teneur en ions chlorure libres.

I.5 - Rapport d'étude

Le présent rapport comprend :

- La description des investigations réalisées in-situ et en laboratoire,
- Les résultats des investigations sur site et en laboratoire,
- L'analyse croisée des résultats des investigations sur site et des analyses en laboratoire,
- Un cahier de planches techniques avec implantation et résultats des essais réalisés,
- Un reportage photographique de l'évolution des désordres sur la travée concernée,
- La conclusion sur l'état de conservation et sanitaire de chaque partie d'ouvrage investiguée,
- Les préconisations de travaux de réparation à mener par zone investiguée,

I.6 - Conditions d'intervention

Une équipe de la société SIXENSE Engineering est intervenue les 4 et 5 août 2020. Elle était composée :

- D'un chargé d'études : M. CASAS Anthony,
- De deux techniciens supérieurs : MM JAMET W. et SCAPPATICCI G.

La zone de travail a été balisée par la DIR durant notre intervention.



Une nacelle positive a été utilisée.

Temps sec et ensoleillé.

II - Intervention sur site

II.1 - Inspection

Sur la travée concernée par la mission, les désordres décrits dans la dernière IDP (IDP du CEREMA d'octobre 2016, affaire C16LL0116) dont l'évolution est visible sont les suivants :

Zone	Observations et photos
<p>Culée Est <i>Côté Sud</i></p>	 <p><i>Tableau 5 : Nouvelles zones avec aciers apparents oxydés</i></p>
<p>Culée Est Descente d'eau</p>	 <p><i>Tableau 6 : Collier de fixation manquant</i></p>

II.2 - Implantation des essais et prélèvements

Le sondage au marteau pour détecter les zones de décollement et l'examen visuel de l'ensemble des zones investiguées mettent en évidence :

- Des dégradations du béton : éclats ponctuels avec aciers apparents et amorces d'éclats,
- Des défauts d'enrobage ponctuels notamment sur les corniches,
- Des traces de calcite en sous face de tablier et sur la culée EST,
- Des traces de ruissellement sur l'ensemble de l'ouvrage et notamment sur le mur garde grève, la culée, et en sous face d'encorbellement en TPC.
- La présence de graffitis sur l'ensemble du piédroit et du mur de front,
- Des joints dégradés entre éléments au niveau du mur en aile,
- Des dépôts divers sur 10 à 15 mm (atterrissements, poussières, déjections, débris d'aciers des appareils d'appuis) sur l'ensemble du sommier.

Les investigations suivantes ont été réalisées :

Zone	Eléments sondés	Echantillons de béton	Echantillon de poudre	Sondages Sur armatures ¹
1	Corniche-face latérale	-	P8	SD3
	Corniche-face supérieure	-	-	-
	Corniche-sous face	-	P9	-
	Longrine	-	P14	-
2	Corniche-face latérale	-	P10	SD4
	Corniche-face supérieure	-	-	-
	Corniche-sous face	-	P11	
	Longrine	-	P15	
3	Tablier A – TPC culée	Carotte C1	P1	SD1
	Tablier B – TPC culée	-	P2	SD2
4	Tablier A – TPC pile	-	P12	SD6
	Tablier B – TPC pile	Carotte C4	P13	SD5
5	Mur en aile	Carotte C2	P3-P4	SD8
6	Mur de front	Carotte C3	-	SD7
	Sommier	-	P5	
	Mur garde grève	-	P6	
	Tablier – sous face	-	P7	

Tableau 7 : Implantation des prélèvements

¹ Les photos des sondages sont données sur les planches techniques en annexe.

II.3 - Résultats des essais in situ

II.3.1 - Mesures de potentiel

Des mesures de potentiel ont été réalisées sur chaque zone investiguée. Les cartographies de potentiel d'électrodes sont présentées sur les planches techniques en annexe.

- Cas particulier de la zone 5 – Mur en aile

Sur la zone 5, le pachomètre n'a permis de détecter aucune armature jusqu'à 10 cm de profondeur depuis le parement. L'absence de ferrailage a été confirmé par la réalisation d'un sondage jusqu'à 80 mm de profondeur. Les mesures de potentiel n'ont donc pas été effectuées.



Tableau 8 : Sondage sur mur en aile

Zone	Elément sondé	Résultats
1	Corniche-face latérale	Valeurs relativement homogènes supérieures à -200mV Pas de zone anodique représentative d'une activité de corrosion
	Corniche-face supérieure	
	Corniche-sous face	
	Longrine	Valeurs comprises entre -140 et -460mV – écart > 150mV Mise en évidence d'une zone anodique (ou de corrosion) sur l'ensemble de l'élément
2	Corniche-face latérale	Valeurs relativement homogènes supérieures à -165mV Pas de zones anodiques représentatives d'une activité de corrosion
	Corniche-face supérieure	
	Corniche-sous face	
	Longrine	Valeurs relativement homogènes supérieures à -215mV Pas de zones anodiques représentatives d'une activité de corrosion
3	Tabliers A et B	Valeurs relativement homogènes supérieures à -350mV – écart > 150mV Mise en évidence d'une zone anodique (ou de corrosion) sur l'ensemble de l'élément
4	Tabliers A et B	Valeurs relativement homogènes supérieures à -305mV – écart > 150mV Mise en évidence d'une zone anodique (ou de corrosion) sur l'ensemble de l'élément
5	Mur en aile	/
6	Mur de front	Valeurs comprises entre -15 et -450mV – écart > 150 mV Mise en évidence probable de zones anodiques (ou de corrosion) sur l'élément
	Sommier	Valeurs comprises entre -295 et -480mV – écart > 150 mV Mise en évidence probable de zones anodiques (ou de corrosion) sur l'élément
	Mur garde grève	Valeurs comprises entre -460 et +270mV – écart > 150 mV Mise en évidence probable de zones anodiques (ou de corrosion) sur l'élément
	Tablier – sous face	/

Tableau 9 : Mesures de potentiels d'électrode

II.3.2 - Mesures d'enrobage

Zone	Elément sondé	Enrobage mini	Enrobage maxi	Enrobage moyen
1	Corniche-face latérale	20	67	42
	Corniche-face supérieure	9	26	18
	Corniche-sous face	20	65	33
	Longrine	26	91	58
2	Corniche-face latérale	13	64	30
	Corniche-face supérieure	0*	41	18
	Corniche-sous face	18	57	38
	Longrine	18	94	65
3	Tablier A	24	47	33
	Tablier B	20	39	34
4	Tablier A	20	36	31
	Tablier B	19	39	29
5	Mur en aile	>100	>100	>100
6	Mur de front	14	56	39
	Sommier	27	61	47
	Mur grade grève	26	58	39
	Tablier – sous face	19	33	24

Tableau 10 : Mesures d'enrobage (en mm)

* Absence d'enrobage. Acier apparent du fait de la présence d'une épaufrure.

II.3.3 - Mesures de profondeur de carbonatation

Les mesures de profondeur de carbonatation ont été réalisées sur site dans les trous de sondage ou de carottage.

Zone	Elément sondé	Profondeur de carbonatation
1	Corniche - face latérale	< 5mm
	Longrine	< 5mm
2	Corniche- face latérale	10mm
	Longrine	< 5mm
3	Tablier A – sous face	10mm
4	Tablier B – sous face	10mm
6	Mur de front	< 5mm

Tableau 11 : Profondeurs de carbonatation

III - RESULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE

III.1 - Liste des essais

Les essais suivants ont été réalisés sur les prélèvements réceptionnés au laboratoire :

- Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau (selon la norme NF P 18459),
- Estimation de la teneur en liant hydraulique (selon les recommandations du GranDuBé, 2007),
- Dosage des ions chlorure solubles dans l'eau (selon les recommandations du GranDuBé, 2007).

III.2 - Masse volumique apparente et porosité accessible à l'eau

Eléments sondés	Prélèvement	Profondeur (mm)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Porosité accessible à l'eau (%)
Tablier A	C1	50 - 100	2244	14,5
Mur en aile	C2	100 - 150	2283	14,1
Mur de front	C3	50 - 100	2267	14,3
Tablier B	C4	40 - 90	2309	12,8

Tableau 12 : Mesures de masse volumique et porosité

Rappel :

- La masse volumique d'un béton normal est comprise entre 2000 et 2600 kg/m³ (selon la norme NF EN 206-1),
- La masse volumique communément admise pour un béton standard est de 2300 kg/m³,
- Les valeurs de porosité communément admises pour un béton standard sont de l'ordre de 11 à 13 % (béton d'ouvrage d'art et génie civil) ou 13 à 15 % (béton de bâtiment).

III.3 - Estimation de la teneur en liant hydraulique

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

Éléments sondés	Ech.	Profondeurs (mm)	Teneur en silice soluble (%)	Insolubles (%)	Teneur en CO ₂ (%)	Perte au feu entre 80 et 975°C (%)
Tablier A	C1	50 - 100	3,73	45,10	14,79	19,42
Mur en aile	C2	100 - 150	2,98	50,02	14,77	18,04
Mur de front	C3	50 - 100	3,11	57,29	9,47	14,05
Tablier B	C4	40 - 90	3,09	41,12	17,89	21,95

Tableau 13 : Estimation de la teneur en silice

Compte tenu de la teneur en CO₂ (> 1), la formule 1 (voir méthodologie en annexe) a été choisie pour le calcul de la teneur en liant hydraulique pour la méthode des inertes.

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

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

Un écart inférieur à 10% de la moyenne des 2 méthodes (silice soluble et inertes) est validé pour les dosages en ciment présentés dans le tableau ci-après (cf. GranDuBé, 2007). La teneur en silice moyenne retenue est de 19 %. Cette teneur est compatible avec un ciment de type CEM I.

Ce type de ciment est issu de l'hypothèse basée sur la méthode de l'estimation de la teneur en liant hydraulique (ciment) formulée par le GranDuBé (2007). Pour statuer de façon précise sur le type de ciment utilisé dans la formulation des bétons, des cartographies en rayons X obtenues à partir d'une sonde EDS (spectrométrie en énergie dispersive) sont nécessaires.

Éléments sondés	Ech.	Profondeurs (mm)	Teneur en ciment d'après la silice soluble (%)	Teneur en ciment d'après les inertes (%)	Moyenne des 2 méthodes (%)	Teneur en liant hydraulique (kg/m ³)
Tablier A	C1	50 - 100	19,7	18,0	18,8	422 ± 40
Mur en aile	C2	100 - 150	15,7	14,4	15,1	344 ± 35
Mur de front	C3	50 - 100	16,3	17,9	17,1	388 ± 40
Tablier B	C4	40 - 90	16,3	15,5	15,9	367 ± 35

Tableau 14 : Estimation de la teneur en liant hydraulique

Nota : l'erreur estimée sur le calcul du dosage en ciment est de l'ordre de 10 %.

III.4 - Dosage des ions chlorure

Au même titre que la carbonatation, les ions chlorure libres (Cl⁻) ont un rôle important dans le processus de dépassement et de corrosion des armatures. Ce sont ces ions chlorure libres qui migrent et qui sont responsables de la dépassement des armatures, par dissociation aux chlorures totaux (= chlorures libres + chlorures piégés).

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

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

En termes de concentration en ions chlorure libres, il existe un seuil au-delà duquel la corrosion s'accélère. Lorsque ce seuil, égal à **0,4 % d'ions chlorures libres en masse par rapport au ciment (soit 0,06 % en masse par rapport à un béton armé « standard » dosé à 350 kg de ciment par m³)**, est atteint, la couche de passivation des aciers disparaît, et la corrosion peut se propager.

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

- Tablier A - Carotte C1 - 422 kg/m³
- Mur en aile - Carotte C2 - 344 kg/m³
- Mur de front - Carotte C3 - 388 kg/m³
- Tablier B - Carotte C4 - 367 kg/m³
- Zones 1 et 2 - corniches : dosage en ciment théorique de 350 kg/m³,
- Zones 1 et 2 - extrados longrines : dosage en ciment théorique de 350 kg/m³.

Les teneurs en ions chlorures libres présentées en rouge dans le tableau ci-dessous dépassent le seuil de dépassement des aciers (0,4 % d'ions chlorures en masse de ciment pour un béton contenant des armatures et composé d'un ciment CEM I ou CEM II).

Eléments sondés	Ech.	Profondeur (mm)	Teneur en ions chlorure libres	
			% masse béton	% masse ciment
Tablier A TPC Culée	P1	0 - 20	0,177	0,94
		20 - 40	0,231	1,23
		40 - 60	0,160	0,85
		60 - 90	0,100	0,53
Tablier B – TPC culée	P2	0 - 20	0,267	1,68
		20 - 40	0,248	1,56
		40 - 60	0,148	0,93
		60 - 90	0,077	0,49
Mur en aile	P3	0 - 20	0,052	0,35
		20 - 40	0,023	0,15
		40 - 60	0,014	0,10
		60 - 90	0,010	0,07
	P4	0 - 20	0,016	0,11
		20 - 40	0,017	0,12
		40 - 60	0,015	0,10
		60 - 90	0,011	0,07

Eléments sondés	Ech.	Prof. (mm)	Teneur en ions chlorures libres	
			% masse béton	% masse ciment
Sommier	P5	0 - 20	0,049	0,29
		20 - 40	0,055	0,32
		40 - 60	0,041	0,24
		60 - 90	0,027	0,16
Mur garde grève	P6	0 - 20	0,023	0,14
		20 - 40	0,027	0,16
		40 - 60	0,013	0,07
		60 - 90	0,009	0,05
Tablier – sous face	P7	0 - 20	0,080	0,47
		20 - 40	0,152	0,89
		40 - 60	0,076	0,45
		60 - 90	0,052	0,31
Corniche Nord Face latérale	P8	0 - 20	0,017	0,11
		20 - 40	0,011	0,08
		40 - 60	0,006	0,04
		60 - 90	0,005	0,03
Corniche Nord Sous face	P9	0 - 20	0,005	0,03
		20 - 40	0,005	0,03
		40 - 60	0,005	0,03
		60 - 90	< 0,005	n.c
Corniche Sud Face latérale	P10	0 - 20	< 0,005	n.c
		20 - 40	< 0,005	n.c
		40 - 60	< 0,005	n.c
		60 - 90	< 0,005	n.c
Corniche Sud Sous face	P11	0 - 20	0,007	0,05
		20 - 40	0,006	0,04
		40 - 60	0,006	0,04
		60 - 90	0,005	0,03
Tablier A TPC Culée	P12	0 - 20	0,063	0,34
		20 - 40	0,086	0,46
		40 - 60	0,083	0,44
		60 - 90	0,035	0,19
Corniche Nord – face latérale	P13	0 - 20	0,064	0,40
		20 - 40	0,034	0,22
		40 - 60	0,028	0,18
		60 - 90	0,008	0,05
Longrine Nord	P14	0 - 20	0,157	1,05
		20 - 40	0,209	1,39
		40 - 60	0,064	0,43
		60 - 90	0,009	0,06
Longrine Sud	P15	0 - 20	0,023	0,16
		20 - 40	0,018	0,12
		40 - 60	0,008	0,05
		60 - 90	< 0,005	0,04

- Limite de détection = 0,005% masse béton / erreur sur la mesure < 2 % / n.c : non calculable.

IV - Synthèse des résultats

Le tableau ci-dessous récapitule l'ensemble des résultats :

Zone	Élément sondé	Profondeur de carbonatation (mm)	Frange de Profondeur d'ions chlorure libres ² (mm)	Valeur d'enrobage moyen (mm)	Valeur d'enrobage mini (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Porosité (%)	Dosage ciment (kg/m ³)
1	Corniche Face latérale	< 5	0	42	20	/	/	/
	Corniche Face supérieure	/	/	18	9	/	/	/
	Corniche Sous face	/	0	33	20	/	/	/
	Longrine	< 5	40-60	58	26	/	/	/
2	Corniche Face latérale	10	0	30	13	/	/	/
	Corniche Face supérieure	/	/	18	0*	/	/	/
	Corniche Sous face	/	0	38	18	/	/	/
	Longrine	< 5	0	65	18	/	/	/
3	Tablier A	10	60-90	33	24	2244	14,5	422
	Tablier B	/	60-90	34	20	/	/	367
4	Tablier A	/	0	31	20	/	/	/
	Tablier B	10	0	29	19	2309	12,8	/
5	Voile	/	0	-	>100	2283	14,1	344
6	Mur de front	< 5	/	39	14	2267	14,3	388
	Sommier	/	0	47	27	/	/	/
	Mur garde grève	/	0	39	26	/	/	/
	Tablier sous face	/	60-90	24	19	/	/	/

Tableau 15 : Synthèse des investigations

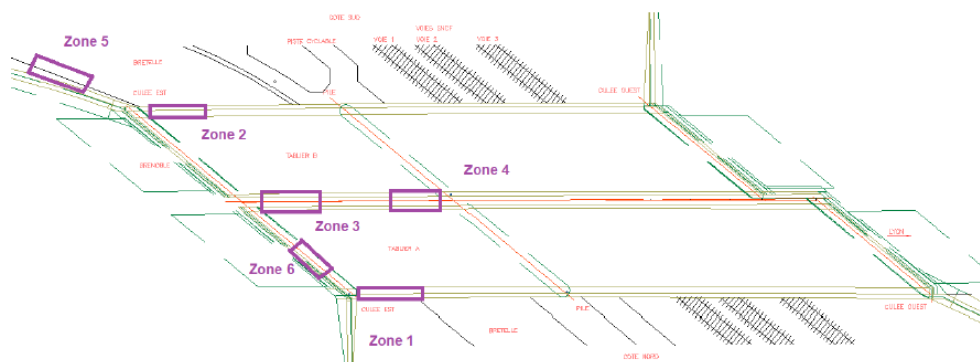


Tableau 16 : Implantation des zones d'investigation

² Frange de profondeur maximale atteinte avec un seuil, égal à 0,4 % d'ions chlorures libres en masse par rapport au ciment

V - Conclusion

L'étude de diagnostic des bétons du pont de Piquepierre a permis de mettre en évidence les points suivants :

- Les mesures d'enrobage montrent des enrobages hétérogènes par élément et par zone avec ponctuellement des enrobages inférieurs aux 30 mm recommandés.
 - La profondeur de carbonatation des bétons est faible pour un ouvrage d'environ 45 ans, inférieure à 10 mm sur l'ensemble des éléments sondés.
Ces valeurs sont inférieures à l'enrobage des aciers hormis au droit de certaines armatures présentant des défauts d'enrobage ponctuels.
 - Les dosages en ions chlorure libres réalisés montrent une pollution du béton (teneur en ions chlorure libres supérieure au seuil critique de dépassement des armatures de 0,4% de la masse de ciment) sur plusieurs zones dégradées :
 - > Zone 1 : longrine du tablier A côté nord au niveau du prélèvement P14 sur la frange 0 à 60 mm,
Les mesures d'enrobage comparativement aux teneurs en ions chlorures indiquent qu'environ 60 % des aciers transversaux et 20% des aciers longitudinaux sont dépassés en voie de corrosion.
(Cf. planches techniques annexées).
 - > Zone 3 : Sous face d'encorbellement en TPC – côté culée au niveau des prélèvements P1 et P2 sur la frange 0 à 90 mm,
Les mesures d'enrobage comparativement aux teneurs en ions chlorures indiquent que 100 % des aciers transversaux et longitudinaux sont dépassés et en voie de corrosion. (Cf. planches techniques annexées).
 - > Zone 4 : en sous face de tablier au niveau du prélèvement P7 sur la frange 0 à 60 mm.
Les mesures d'enrobage comparativement aux teneurs en ions chlorures indiquent que 100 % des aciers transversaux et longitudinaux sont dépassés et en voie de corrosion. (Cf. planches techniques annexées).
- Les longrines (par projection) et sous faces de tabliers (par ruissellement) sont affectés par une pollution exogène des chlorures issus des sels de déverglaçage.
- Le béton composant le tablier est de qualité standard :
 - > Les porosités mesurées varient de 12,8 à 14,5%. Les porosités sont sensiblement élevées et sont dans la partie haute de la fourchette standard de 11 à 13%.
Certaines sont en adéquation avec la profondeur de pénétration des chlorures (de 90 mm sur certaines zones).
 - > Les masses volumiques mesurées sont homogènes, comprises entre 2244 et 2309 kg/m³, soit une valeur moyenne de 2276 kg/m³, valeur proche de la valeur standard de 2300 kg/m³ pour un béton d'ouvrage d'art.

- Les mesures de potentiel de corrosion réalisées mettent en avant des zones anodiques sur :
 - > La zone 1 au niveau de la longrine du tablier 1 côté nord,
 - > Les éléments du chevêtre de la culée EST.

Ces mesures de potentiel sont relativement homogènes en sous face de tablier (zones 3 et 4), ne mettent pas en évidence une activité de corrosion et permettent d'étendre à l'ensemble de la zone considérée les résultats ponctuels obtenus sur les dosages en chlorures.

Nota : Le mur en aile de la culée EST ne comporte pas d'armatures détectables sur une profondeur minimale de 10 cm depuis le parement (il s'agit probablement d'un mur poids en béton non armé).

VI - Stratégies de réparation

Sur la base du cadre normatif des NF EN 1504 et NF EN 95-101/103, sur les produits et les systèmes utilisés pour la réparation, la maintenance et la protection, la restauration et le renforcement des structures en béton, deux stratégies de réparation sur un ouvrage existant peuvent être bâties :

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

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

En cas de carbonatation et suivant l'ampleur du phénomène, la discussion doit porter essentiellement sur l'ampleur des purges ou sur la performance du complexe protection-finition.

En présence de chlorures à des taux significatifs, la stratégie de réparation doit être renforcée et inclure un traitement de fond de la corrosion. Dans ce cas de figure, la solution la plus adaptée est la mise en œuvre d'une protection cathodique.

Après avoir énoncé le cadre normatif des solutions et des travaux de réparation, nous verrons que dans l'état actuel du pont, vis-à-vis de son environnement et de son exploitation, plusieurs stratégies semblent être adaptées en fonction des zones investiguées.

La solution doit être choisie dans l'objectif de justifier de façon rationnelle et pertinente les investissements consentis dans le projet pour une durée de l'ordre de 25 ans.

VI.1 - Cadre normatif des principes de réparation

La norme NF EN 1504 définit 11 grands principes sur les produits et systèmes qui permettent d'augmenter la durabilité du béton et des structures en béton armé, aussi bien pour un nouveau béton que pour des travaux de maintenance et réparation. Ces principes sont repris dans le tableau ci-après.

Principes généraux des produits et systèmes utilisés pour la réparation, la maintenance et la protection, la restauration et le renforcement des structures en béton - NF EN 1504-1 à 11	
Principes 1 et 2	Protection contre la pénétration des agents agressifs (chlorures, CO ₂) et maîtrise de l'humidité
Principe 3	Restauration des bétons dégradés
Principe 4	Renforcement structurel
Principes 5 et 6	Résistance physique et/ou aux produits chimiques (en complément aux principes 1 et 2)
Principe 7	Préservation ou restauration de la passivité (au niveau des armatures). Localement voir principe 3.
Principe 8	Augmentation de la résistivité
Principe 9	Contrôle cathodique
Principe 10	Protection cathodique
Principe 11	Contrôle des zones anodiques

Il est à noter que la norme NF EN 1504 fait mention de la protection cathodique régie par la norme EN ISO 12696.

De même, les méthodes d'application et d'exécution qui rentrent dans le cadre de la réalisation des travaux de réparation ou de renforcement sont définies dans les guides techniques, les recommandations et les référentiels énoncés de façon non exhaustive dans le paragraphe ci-après.

VI.2 - Référentiels, guides et recommandations techniques

Dans le cadre des travaux de réparations et de renforcements des ouvrages existants (Génie et Bâtiment) en béton armé ou précontraint, les méthodes et moyens de réparation s'appuient sur les guides et des recommandations suivants (liste non exhaustive) :

A. Recommandations AFGC :

- Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion.
- Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites.

B. Guides :

- AFTES 1993 - Technologie et la mise en œuvre du béton projeté,
- AFTES 1994 - Technologie et la mise en œuvre du béton projeté renforcé de fibres,
- GA P18-902 « Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Recommandations pour la sélection des systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil ».
- STRRES FABEM 1 à 5 et 7 (www.strres.org) :
 - > FABEM 1 : reprise des bétons dégradés,
 - > FABEM2 : traitements des fissures par calfeutrement ou pontage et protection localisée ou création d'un joint de dilatation,
 - > FABEM 3 : traitement des fissures par injection,
 - > FABEM 4 : protection des bétons,
 - > FABEM 5 : béton projeté,
 - > FABEM 7 : réparation et renforcement des structures par armatures passives additionnelles.
- LCPC :
 - > Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton (1977, révisé 1996) (réparation de surface, collage d'éléments, traitement des fissures, calage et scellement),
 - > Protection des bétons par application de produits à la surface du parement (Décembre 2002) (inhibiteurs de corrosion, produits d'imprégnation, lasures, peintures, revêtements),
 - > Mise en peinture des bétons de génie civil (juin 1999).

C. Normes

- NF EN 95-101/102/103 - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie
- Référentiel de certification NF 030 « Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique » (produits de calage, scellement, réparation de surface, collage),
- Moyens classiques de préparation des surfaces à traiter (tableau 1 de la norme NF P95-101),
- Béton projeté
 - > NF EN 14487-1 – Béton projeté – Partie 1 : définitions, spécifications et conformité ; • NF EN 14487-2 – Béton projeté – Partie 2 : exécution,
 - > NF EN 14488-1 à 7 – Essais pour béton projeté,
 - > NF EN 934-5 – Adjuvants pour bétons projetés : définitions, exigences et conformité.
- Référentiels techniques liés aux scellements des armatures dans le béton

- > Méthodes de réparation et essais » • FD P 18-823 – Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de scellement à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques,
- > Dimensionnement des scellements de barres d'armature dans le béton. • NF EN 1881 – Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton – Méthode d'essai – Essai des produits de scellement d'ancrage par la méthode de l'arrachement.

Sur la base des normes, guides, référentiels et recommandations, nous allons voir les solutions de réparation du hangar qui peuvent être facilement envisagées.

VI.3 - Stratégie de réparation « classique »

VI.3.1 - Réparation classique

La première stratégie abordée est la stratégie dite de « réparation classique » qui apparaît la plus simple et s'articule autour des 7 principes 1, 2, 3, 4, 7, 8 et 9 :

Réparation classique sur la base de la NF EN 1504	
Principes 1 et 2	Protection contre la pénétration des agents agressifs (chlorures, CO ₂) et maîtrise de l'humidité
Principe 3	Restauration des bétons dégradés
Principe 4	Renforcement structurel
Principe 7	Préservation ou restauration de la passivité (au niveau des armatures). Localement voir principe 3.
Principe 8	Augmentation de la résistivité
Principe 9	Contrôle cathodique

Le succès de ce type de stratégie classique s'appuie essentiellement sur les principes physico-chimiques de l'assèchement de l'ouvrage, censé réduire fortement les vitesses de corrosion des armatures et dans une moindre mesure, de la réalcalinisation locale du béton d'enrobage qui va reconditionner les armatures dans un milieu favorable à leur pérennité.

Cette stratégie peut être résumée comme suit :

- Purge des bétons éclatés et pollués,
- Ragréages des manquants (pertes de béton),
- Traitement des fissures,
- Renforcement structurel (remplacement des armatures corrodées avec perte de diamètre significatif, etc.),
- Protection des bétons par ajout d'enrobage et/ou application locale d'un complexe finition-protection micro-mortier LHM (liant hydraulique et peinture adaptée) ou d'un revêtement type peinture seul.

Cette stratégie de réparation relativement courante s'applique bien à la grande majorité des ouvrages existants dégradés. Dans le cas du pont de Piquepierre, cette stratégie peut s'appliquer aux éléments les plus dégradés de l'ouvrage et présentant des défauts d'enrobage (corniches et longrines).

Toutefois, en cas d'exposition forte à relativement forte aux chlorures et répété et pour des zones d'ouvrage ayant un rôle structurel et étant localisée dans des zones difficilement accessibles comme par exemple les sous faces d'encorbellements des tabliers, cette stratégie apparaît comme techniquement inadaptée et structurellement insuffisante. De plus, cette stratégie ne peut pas répondre à un objectif de durabilité supérieur à 10 ans.

VI.3.2 - Limites

Les limites d'une réparation classique sont atteintes et ceci s'explique en grande partie par la contribution spécifique des chlorures dans le processus corrosif :

1. Les chlorures sont recyclés par le processus corrosif. Ce renouvellement ne peut être stoppé que par l'élimination des bétons dont la pollution par les chlorures est supérieure au seuil de dépassement des aciers.
2. Les produits de corrosion sont généralement peu expansifs. La corrosion peut se développer ou être initiée sans qu'elle soit visible. L'état visuel de dégradation de la structure n'est pas forcément en rapport avec son niveau de pollution ou de dégradation effective.
3. Dans la pratique, il est quasi impossible de purger tous les bétons fortement pollués, a fortiori bien au-delà des armatures. Il peut persister donc un développement de la corrosion dans les zones non purgées, ce qui crée à plus ou moins court terme des piles induites de corrosion en frontière de réparation.
4. Le caractère hygroscopique des chlorures non purgés maintient dans la structure un taux d'humidité suffisant pour permettre le développement des réactions de corrosion. L'assèchement s'avère dans ce cas peu efficace sur des bétons pollués en profondeur.
5. Dans le cas de barrières physiques utilisées (LHM, peintures, etc.), ces dernières exposées aux conditions météorologiques se dégradent rapidement dans le temps. La protection (assèchement) des bétons n'est alors plus assurée et la pénétration de chlorures exogènes est possible sur le long terme.

VI.3.3 - Avis sur la stratégie de réparation classique

De par leur rôle non structurel sur l'ouvrage les corniches et longrines semblent être propices à la mise en œuvre d'une réparation classique. Les éléments du chevet sont accessibles et ne présentent pas un état de dégradation avancé. Une réparation classique peut aussi être envisagée.

La purge en profondeur des bétons des tabliers contaminés concourt à impacter structurellement l'ouvrage en phase travaux. Ceci impliquera un séquençage des réparations et de l'exploitation, sans parler d'un coût significatif du remplacement des matériaux purgés.

Ainsi dans le cas des sous faces d'encorbellements des tabliers, exposé aux ruissellements liés à un défaut d'étanchéité de l'ouvrage, ceux-ci présentent une contamination de leur béton par les chlorures sur des profondeurs allant au-delà des enrobages des armatures jusqu'à 9 cm. De toute évidence, au vu de l'état de dégradation et de l'origine de la contamination des tabliers de l'ouvrage, la stratégie de réparation classique n'apparaît pas appropriée techniquement, peu rentable par rapport aux coûts des travaux engagés, et l'efficacité des réparations ne pourrait être assurée au-delà de 10 ans.

Il faut donc se tourner vers une stratégie de réparation renforcée de ces sous faces d'encorbellement des tabliers. Ce type de réparation va permettre d'apporter une solution curative des bétons et des armatures, pérenniser la structure à long terme, et devrait limiter l'impact sur l'exploitation en phase travaux, en allégeant les volumes de purge.

VI.4 - Stratégie de réparation « renforcée »

La stratégie dite de « réparation renforcée » s'articule quant à elle autour des 11 principes.

VI.4.1 - Avantages

Cette stratégie de réparation « renforcée » apporte de nombreux avantages, tels que :

- Un traitement plus adapté en cas de corrosion quasi-généralisée (visible ou en cours de développement) initiée par les chlorures,
- Un traitement qui permet de minimiser les volumes de purges en les limitant aux seuls bétons éclatés et s'inscrit dans une démarche de développement durable et de préservation de la santé des intervenants,
- Un traitement qui s'affranchit des nouvelles pollutions inévitables (aujourd'hui les structures marines bénéficient quasi toutes d'une protection cathodique installée lors de la construction),
- Un traitement qui s'appuie sur un système de protection cathodique installée dans les règles de l'art et encadré par une norme à performance et bénéficie de faite d'un suivi de performance dans le temps,

Ce choix ainsi que la pertinence même de la protection cathodique est guidée par les données du diagnostic réalisé en amont, et la durée de vie souhaitée de l'ouvrage réparé.

VI.4.2 - Choix du type de protection cathodique

VI.4.2.1 - *Principes généraux de la protection cathodique*

La protection cathodique est une technique de « protection active » contre la corrosion d'un matériau métallique au contact d'un béton. Il s'agit d'un système de prévention électrochimique basé sur la diminution du potentiel de corrosion jusqu'à un niveau où la vitesse de corrosion du métal est réduite de manière significative.

La protection cathodique est obtenue par l'application d'une tension capable de fournir un courant cathodique (galvanique ou imposé) suffisant à la surface métallique pour diminuer son potentiel à un niveau correspondant à une vitesse de corrosion résiduelle suffisamment faible pour l'application concernée.

La diminution du potentiel de corrosion du métal se traduit par une réduction de la vitesse d'oxydation (anodique) du métal et une augmentation de la ou des réactions de réduction (cathodiques) des espèces oxydantes présentes dans le béton. L'ouvrage métallique à protéger est placé à un potentiel tel que la vitesse de corrosion devient acceptable sur toute la surface de métal en contact avec le béton.

VI.4.2.2 - *PCCI/PCCG*

Il existe 2 types de protection cathodique, toutes utilisent des anodes :

- Protection cathodique par courant galvanique (PCCG) :
 - > Les anodes de protection cathodique par courant galvaniques peuvent être regroupées selon 4 grandes familles :
 - Anodes discrètes (forées) ; la longueur et le diamètre de l'anode dépendent des lits d'armatures à protéger,
 - Anodes surfaciques (treillis Ti, zinc collé) : cela impose un ratio anode/ cathode favorable à la protection,
 - Anode rubans en Ti,
 - Pains anodiques, base zinc.
 - > La PCCG ne nécessite pas de suivi dans le temps hors maintenance.

- Protection cathodique par courant imposé (PCCI) :
 - > La protection cathodique par courant imposé utilise également des anodes qui peuvent être regroupées selon 3 grandes familles :
 - Treillis titane à encapsuler dans une surépaisseur de béton projeté.
 - Ruban titane à insérer en saignée ou à encapsuler dans une surépaisseur de béton projeté.
 - Anodes discrètes ou anodes forcées à sceller dans des réservations forcées via un coulis d'injection.
 - > La PCCI nécessite un suivi dans le temps à l'aide d'une centrale numérique.

VI.4.3 - Choix de la protection cathodique adaptée

La norme EN ISO 12696 fixe une densité de courant de protection entre 0,2 à 20 mA/m² d'armatures. De 0,2 à 2 mA/m², on parle de prévention cathodique, au-delà on parle de protection cathodique.

La détermination ou le choix de densité de courant de protection retenu dans le dimensionnement de la protection cathodique est primordial et est fonction des données du diagnostic et de la durabilité attendue des réparations. Les deux systèmes peuvent être utilisés par mesure préventive ou dans le cadre de mesure curative.

Activité corrosive	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="background-color: #90EE90; padding: 5px; text-align: center;">Très faible</div> <div style="background-color: #90EE90; padding: 5px; text-align: center;">Faible</div> <div style="background-color: #FFD700; padding: 5px; text-align: center;">Moyenne</div> <div style="background-color: #FF0000; padding: 5px; text-align: center;">Importante</div> <div style="background-color: #8B0000; padding: 5px; text-align: center;">Très importante</div> </div>				
Densité de courant de protection	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> 0,2 ← Prévention cathodique </div> <div style="text-align: center;"> → 2 ← Protection cathodique → 20 </div> </div>				

La protection cathodique par courant galvanique a un niveau de capacité de polarisation limité mais s'auto-régule.

La protection cathodique par courant imposée peut agir sur toute la gamme de densité de courant de protection souhaitée.

Aucune mesure de vitesse de corrosion n'a été réalisée à ce jour. Cependant, la cinétique de dégradation des aciers du pont dépend du recyclage du processus corrosif des armatures et donc de l'état sanitaire de l'ouvrage. Le choix de la méthode de protection cathodique dépend des réparations éventuelles qui seront réalisées au niveau des dispositifs d'étanchéité de l'ouvrage :

- En cas de travaux sur l'étanchéité de l'ouvrage, une protection cathodique par courant galvanique peut être envisagée et peut permettre d'atteindre une durabilité de 20 à 25 ans.
- En l'absence de travaux sur l'étanchéité de l'ouvrage, une protection par courant galvanique pour la même durée nécessitera une quantité de zinc et un coût important. Une protection cathodique par courant imposé doit alors être envisagée.

VI.4.4 - Synthèse sur les stratégies de réparation renforcée

Au vu de l'état de dégradation et de contamination de la structure en béton armé du pont, mis en évidence par l'étude de diagnostic, des solutions de réparation classique et renforcée par protection cathodique à courant imposé (PCCI) ou galvanique (PCCG) peuvent être envisagées.

Le tableau ci-dessous récapitule les solutions de traitement envisageables par élément d'ouvrage :

Zone	Elément	Etat de conservation des armatures	Solutions de réparation					
			Avec travaux d'étanchéité Et gestion des eaux*			Sans travaux d'étanchéité ni gestion des eaux		
			Classique	P.C.C.G.	P.C.C.I.	Classique	P.C.C.G.	P.C.C.I.
Tablier A Côté Nord	Corniche	Corrosion avancée	C ⁽¹⁾	C		C		C
	Longrine	Absence de corrosion significative	C	P ⁽²⁾		C		P
Tablier B Côté Sud	Corniche	Absence de corrosion significative	C			C		
	Longrine		C			C		
Tabliers A et B TPC	Encorbellement Sous faces	Corrosion en cours		C				C
Culée EST Chevêtre	Mur de front	Dépassivation	C	P		C		P
	Sommier		C	P		C		P
	Mur garde grève		C	P		C		P

Tableau 17 : Synthèse des solutions de réparation

* Travaux d'étanchéité au niveau du joint et du revêtement d'étanchéité du tablier et amélioration de la gestion des eaux avec par exemple mise en place d'un larmier en sous face de d'encorbellement, ou création d'exutoires supplémentaires.

⁽¹⁾ C = à titre curatif

⁽²⁾ P = à titre préventif

Rapport établi le 17/09/2020
Le chargé d'études
CASAS Anthony



Annexe 1 – Planches techniques



DIR Centre-Est - Service Patrimoine et de l'Entretien
Cellule Ouvrage d'art
228 Rue Garibaldi 69446 Lyon Cedex 03
☎ : 04 69 16 62 00



SIXENSE ENGINEERING
15, allée des Ginkgos
69500 BRON
☎ : 04 72 37 03 39 📠 : 04 72 37 02 30
💻 : www.sixense-group.com

PONT DE PIQUEPIERRE

DIAGNOSTICS BETON

Rapport N° A20 02491

DATE D'INTERVENTION : 04/08/2020 au 05/08/2020

Sommaire :

Zone 01 - Tablier A - Corniche et longrine côté Nord	-----	page 1
Zone 02 - Tablier B - Corniche et longrine côté Sud	-----	page 2
Zone 03 - Tablier A & B - encorbellement TPC côté culée	-----	page 3
Zone 04 - Tablier A & B - encorbellement TPC côté pile	-----	page 4
Zone 05 - Culée Est - Mur en aile	-----	page 5
Zone 06 - Tablier A - Culée Est	-----	page 6

Dessiné par :	WIJA	Vérifié par :	ANCA
Date :	07/09/2020	Indice :	Indice A



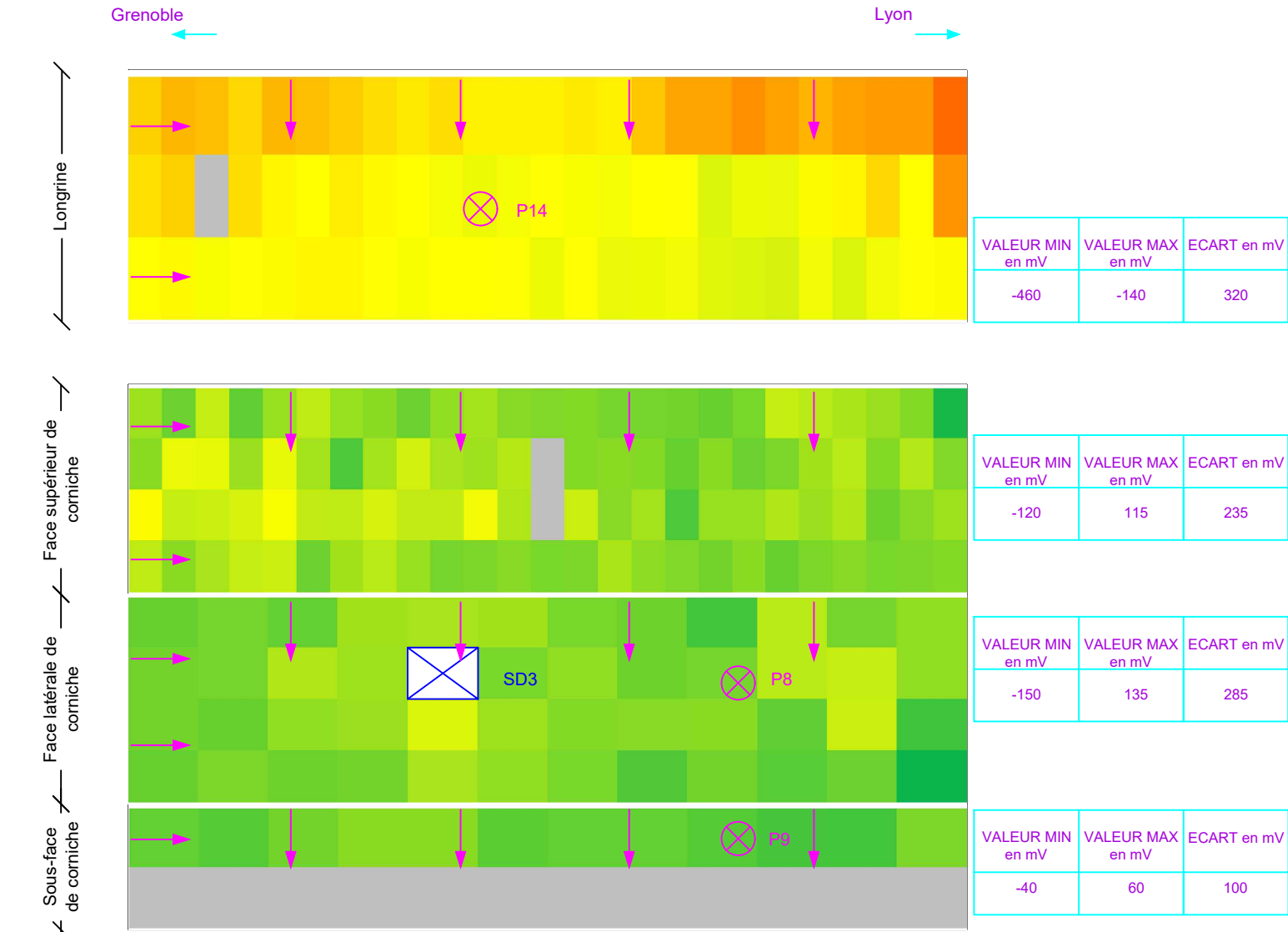
- Photographie générale de la zone -



- Photographie du sondage destructif -

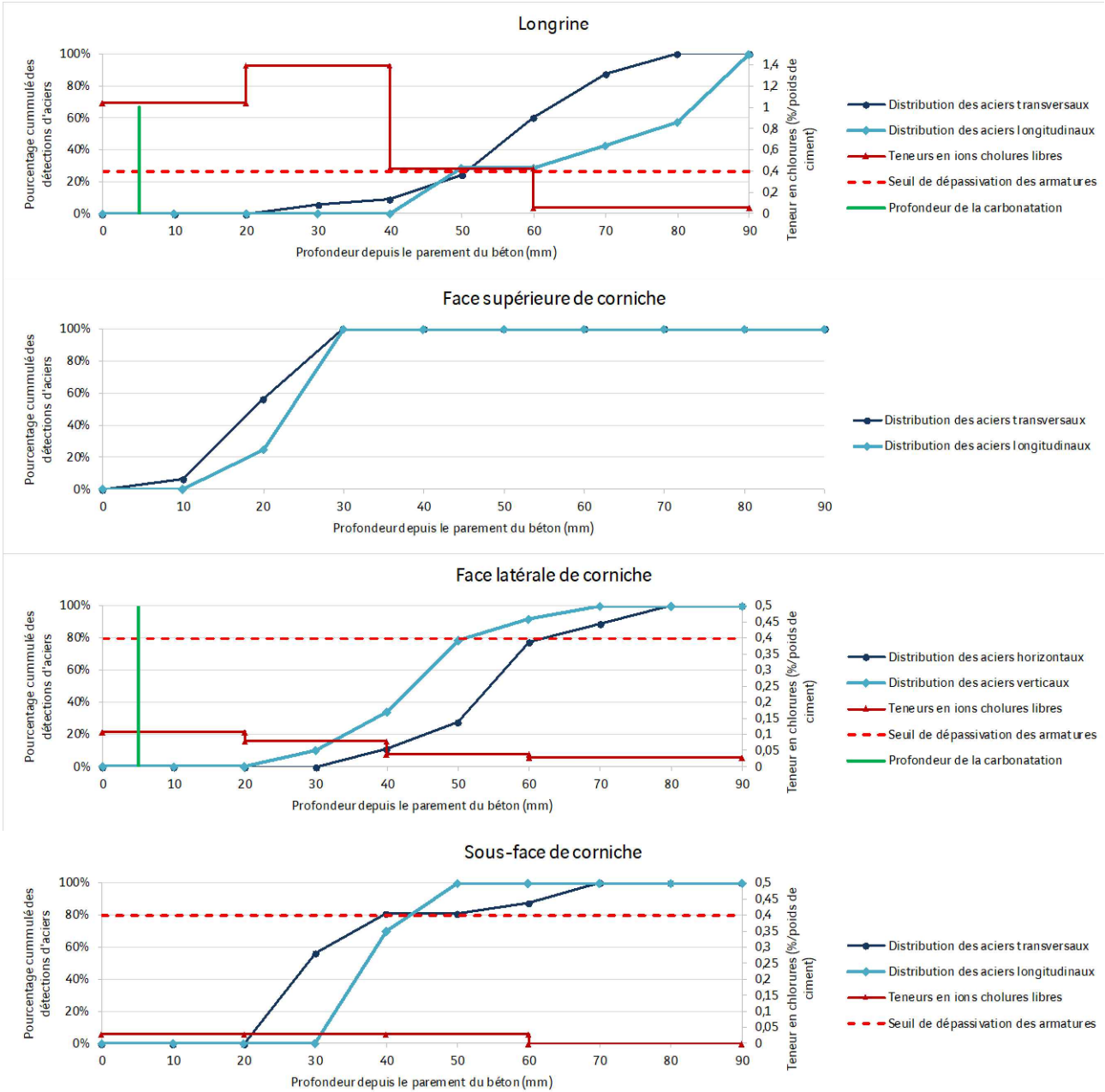
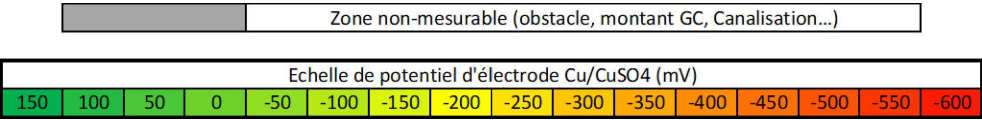
TOR Ø8, enr. 48mm, oxydation superficielle
TOR Ø10, enr. 56mm, sain

- IMPLANTATION DES INVESTIGATIONS / CARTOGRAPHIE DE POTENTIEL DE CORROSION -



Légende :

- Ligne de détection des armatures
- ⊗ Prélèvement par poudre
- ⊗ Prélèvement par carottage
- ⊗ Sondage de connexion aux armatures





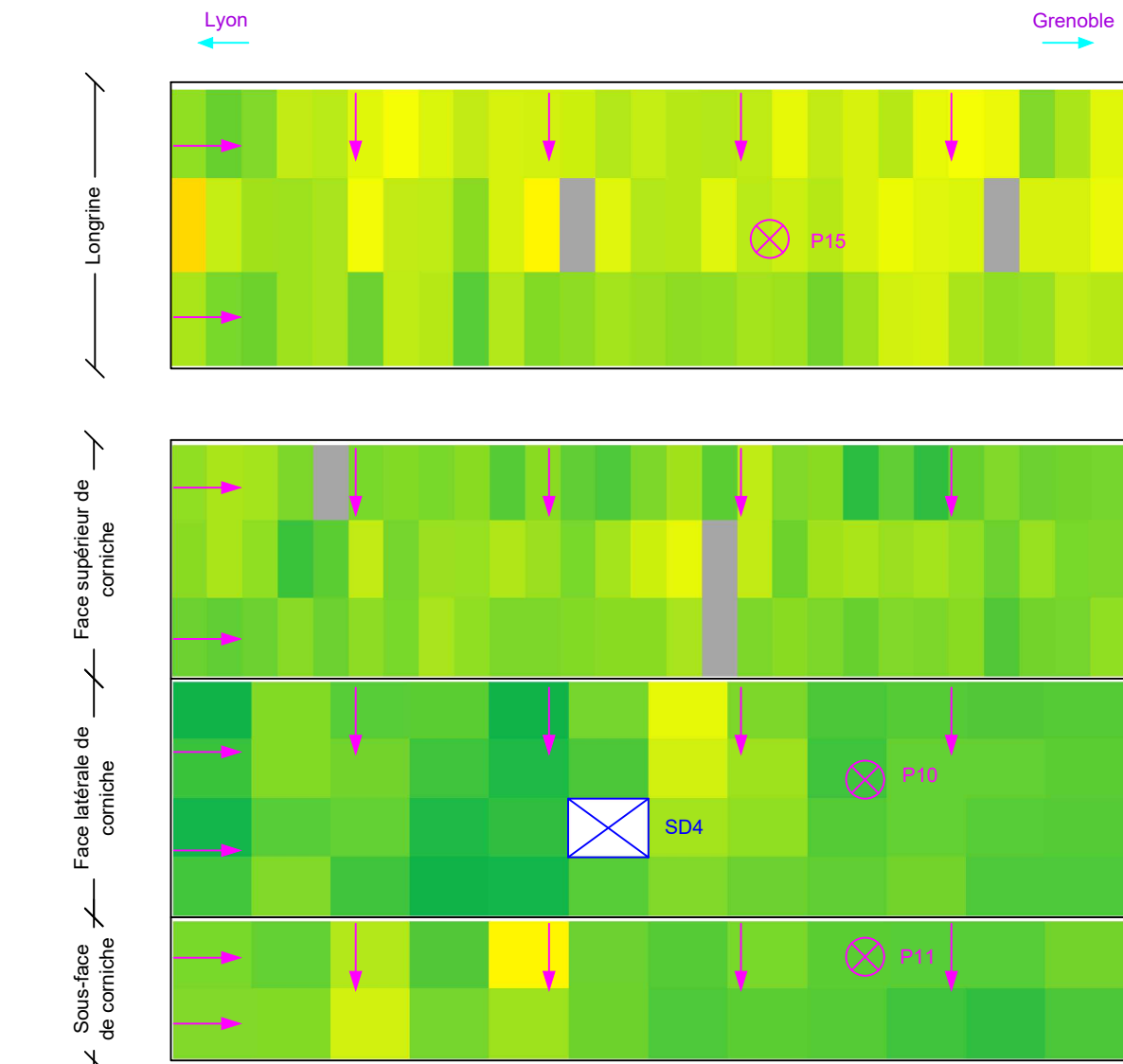
- Photographie générale de la zone -



- Photographie du sondage destructif -

TOR Ø8, enr. 42mm, oxydation superficielle

- IMPLANTATION DES INVESTIGATIONS / CARTOGRAPHIE DE POTENTIEL DE CORROSION -



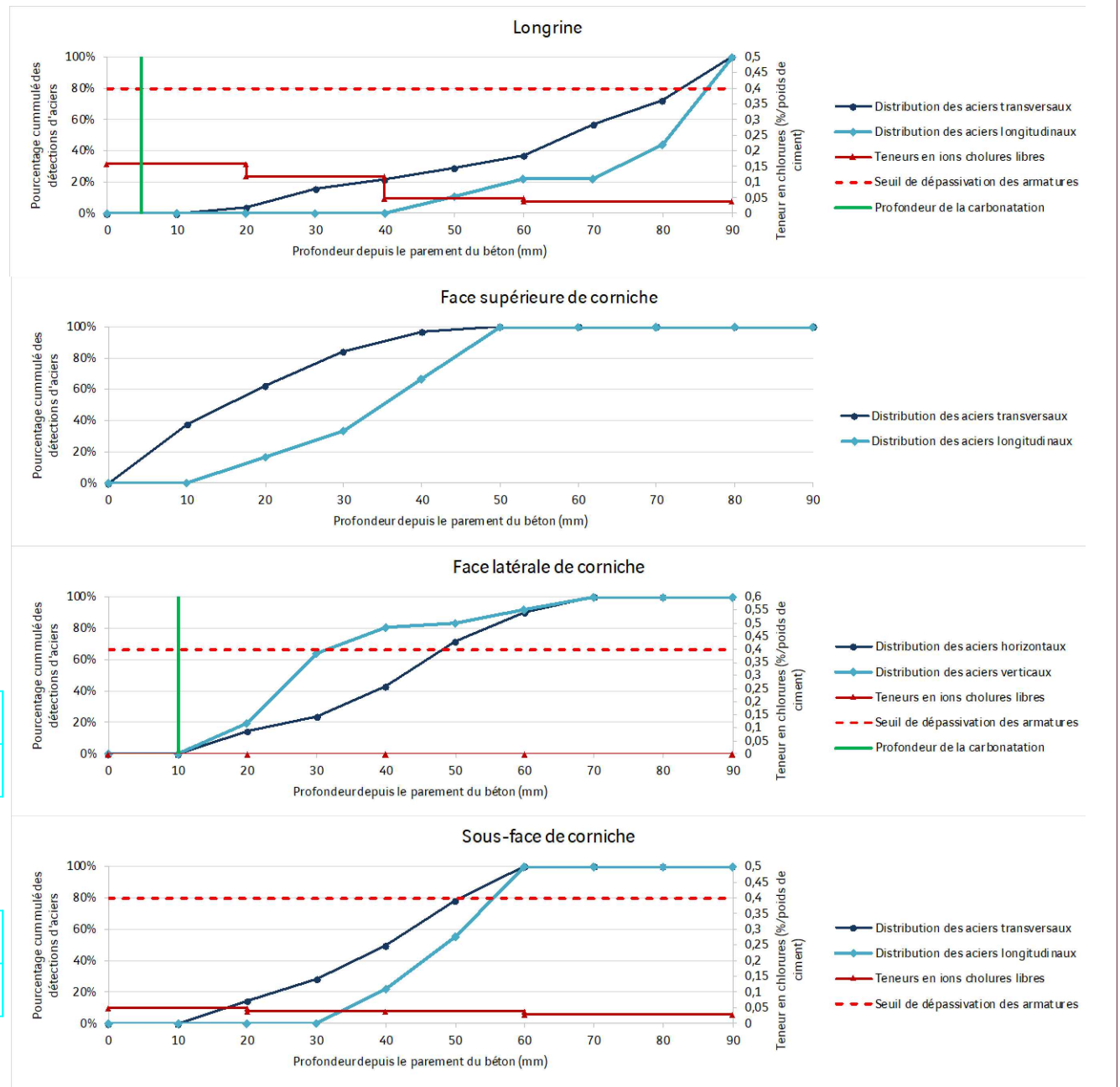
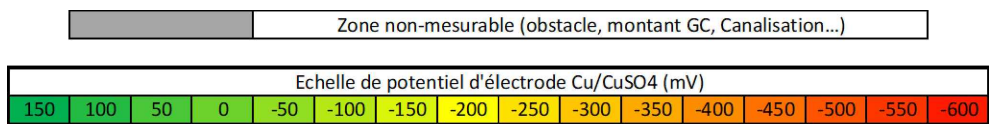
VALEUR MIN en mV	VALEUR MAX en mV	ECART en mV
-265	30	295

VALEUR MIN en mV	VALEUR MAX en mV	ECART en mV
-165	95	260

VALEUR MIN en mV	VALEUR MAX en mV	ECART en mV
-165	130	295

VALEUR MIN en mV	VALEUR MAX en mV	ECART en mV
-215	85	300

- Légende :
- Ligne de détection des armatures
 - ⊗ Prélèvement par poudre
 - ⊗ Prélèvement par carottage
 - ⊗ Sondage de connexion aux armatures





- Photographie générale de la zone -

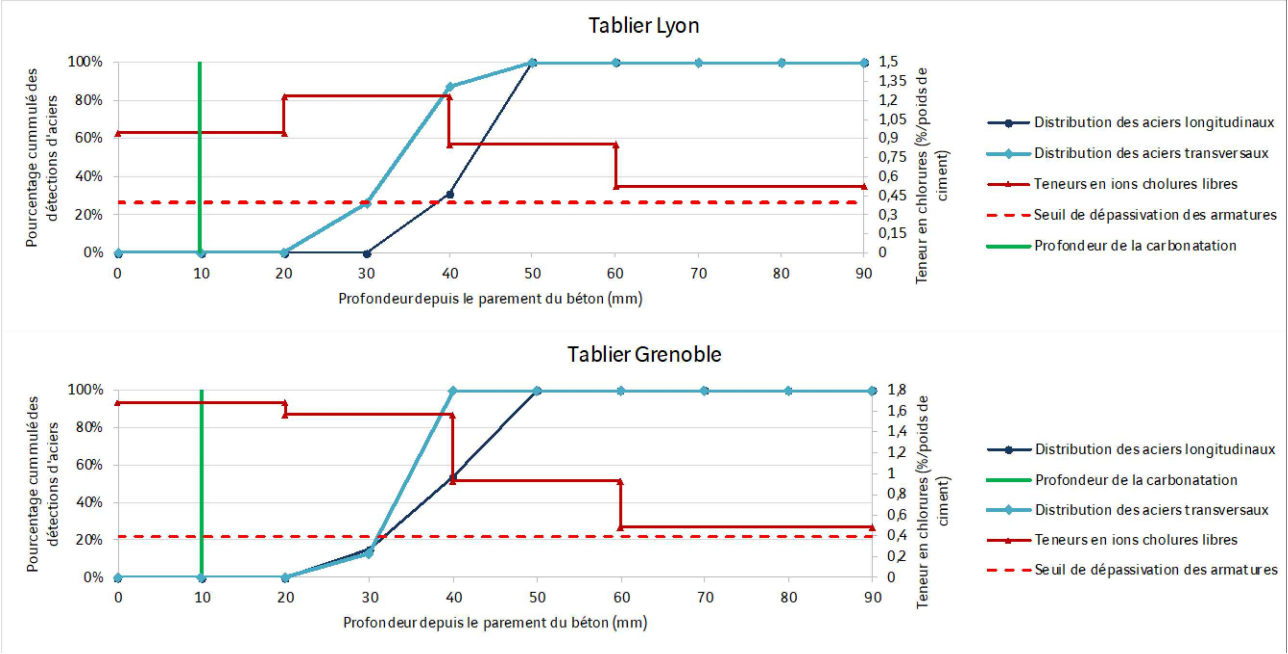
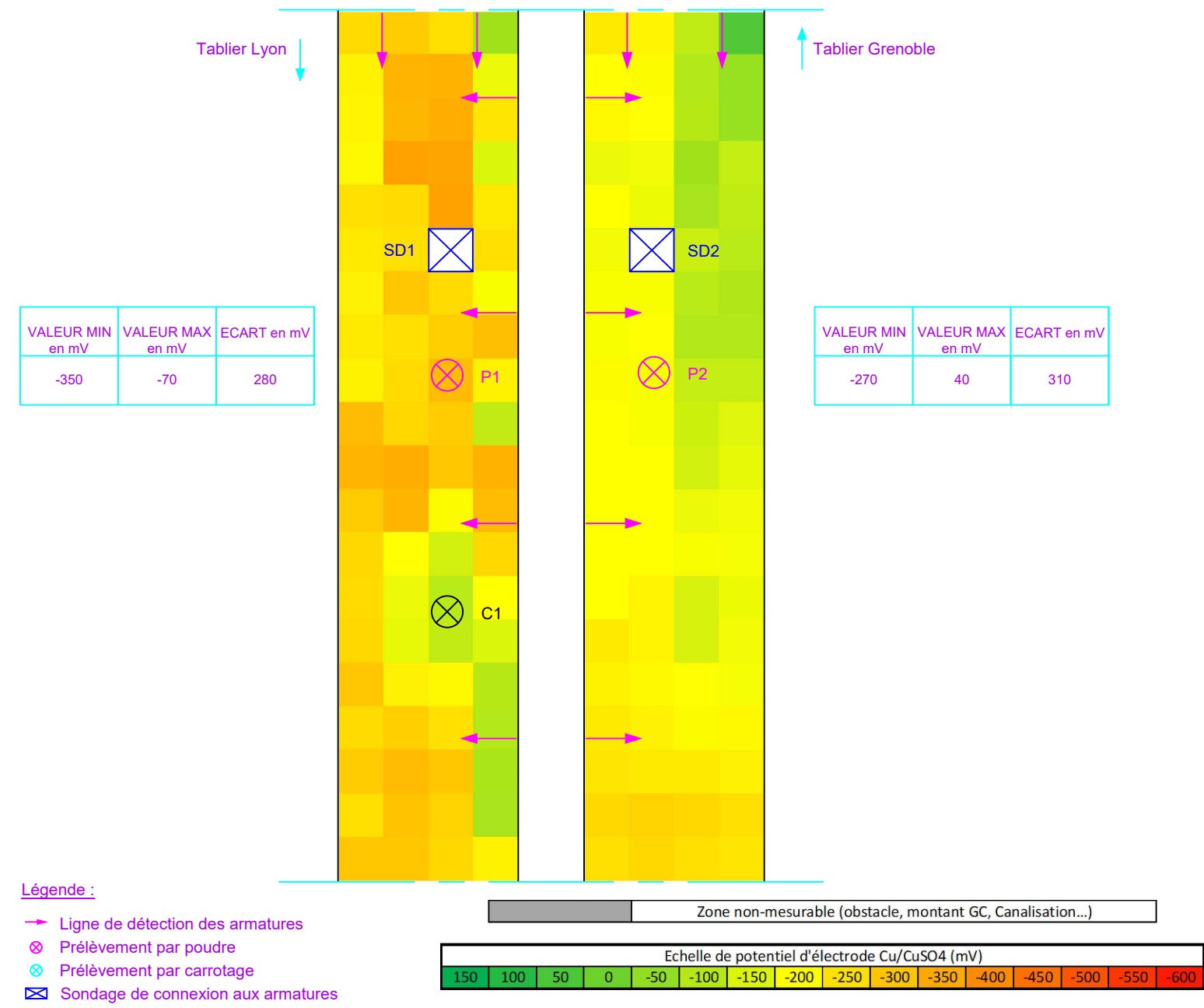


- Photographie du sondage destructif sur le tablier Lyon -



- Photographie du sondage destructif sur le tablier Grenoble -

- IMPLANTATION DES INVESTIGATIONS / CARTOGRAPHIE DE POTENTIEL DE CORROSION -





- Photographie générale de la zone -

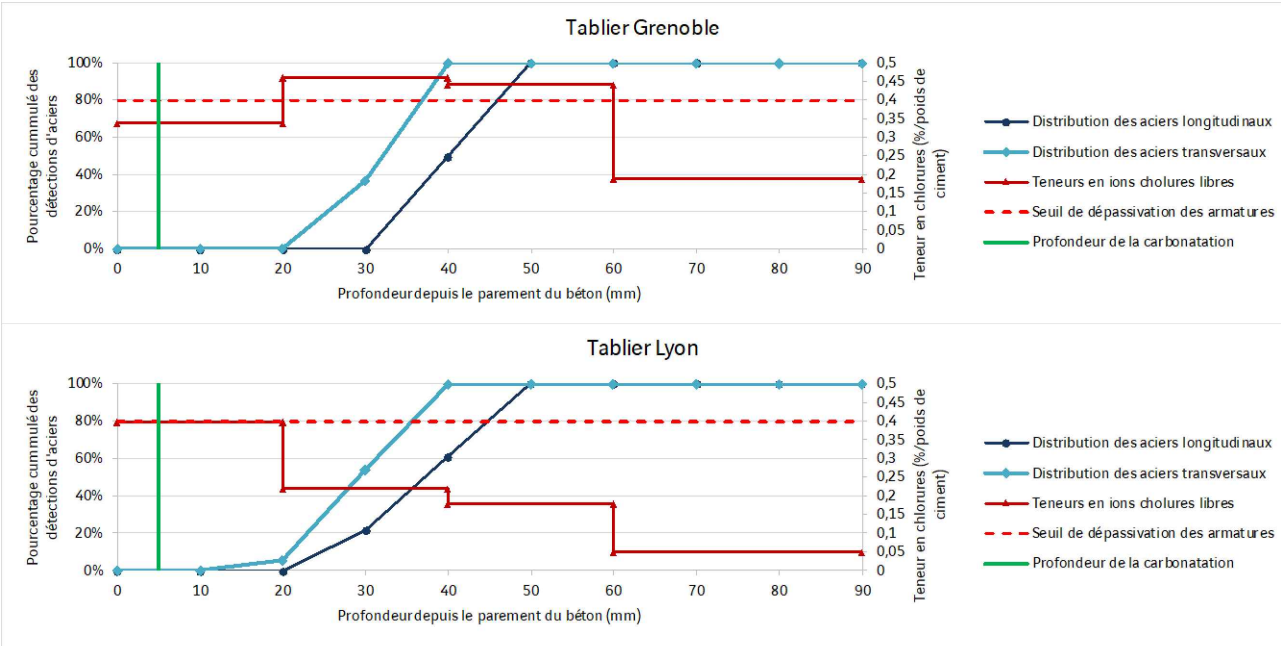
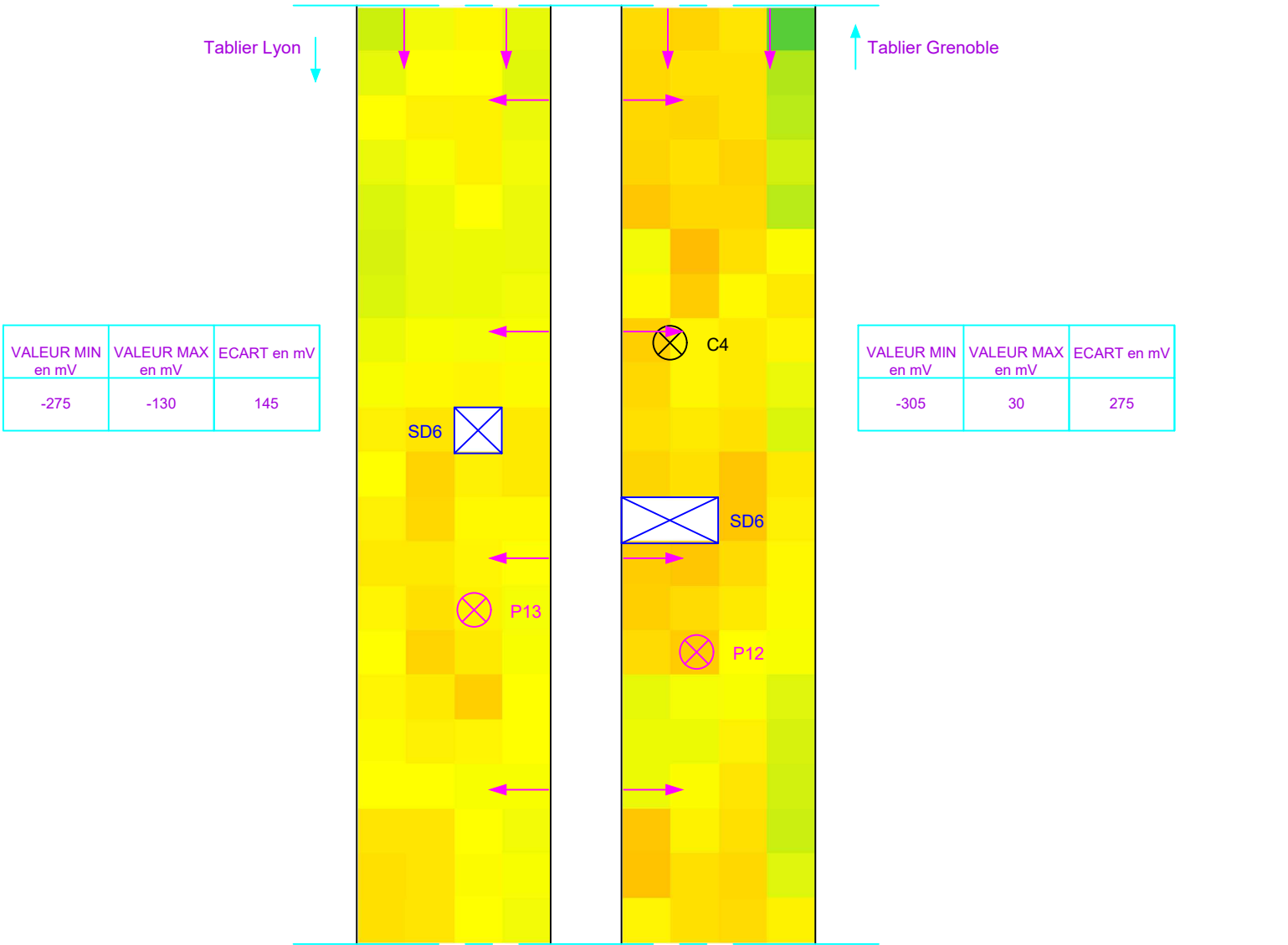


- Photographie du sondage destructif sur le tablier Lyon -

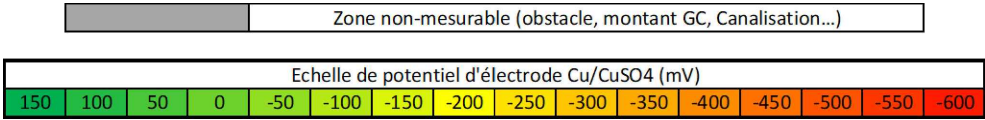


- Photographie du sondage destructif sur le tablier Grenoble -

- IMPLANTATION DES INVESTIGATIONS / CARTOGRAPHIE DE POTENTIEL DE CORROSION -



- Légende :
- Ligne de détection des armatures
 - ⊗ Prélèvement par poudre
 - ⊗ Prélèvement par carottage
 - ⊗ Sondage de connexion aux armatures





- Photographie générale de la zone -

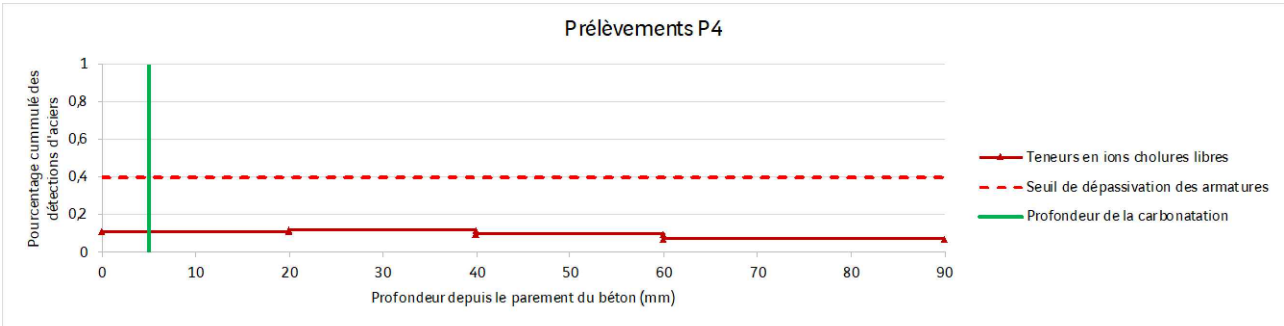
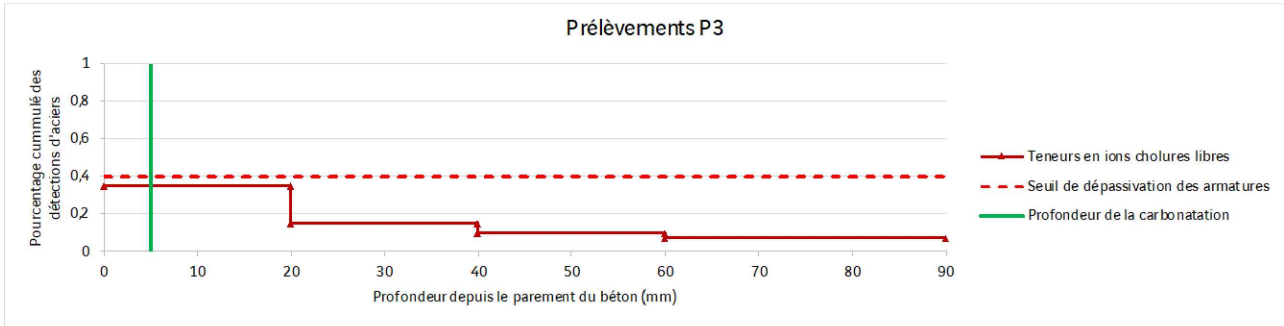
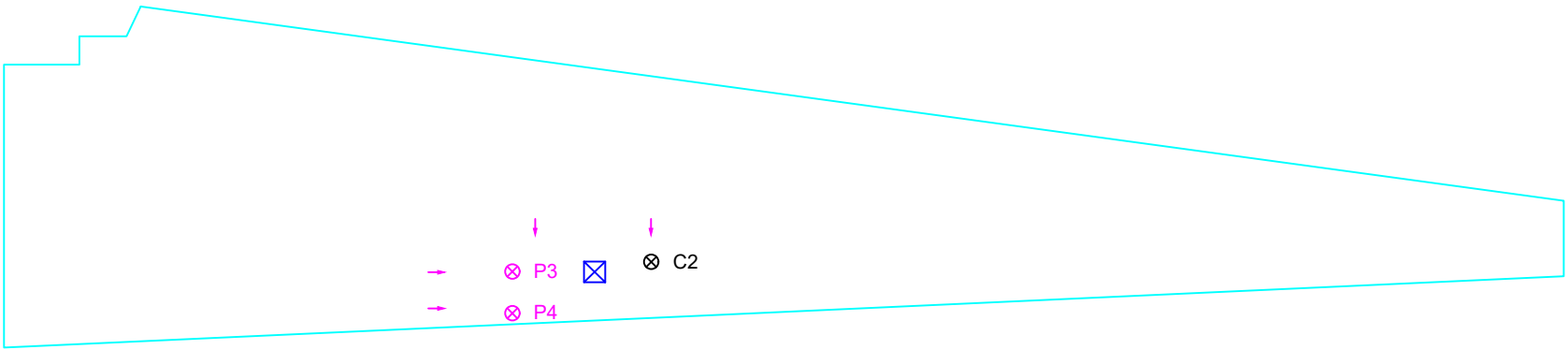


- Photographie générale de la zone investiguée -



- Photographie du carottage au droit d'un signal ferroskan -

- IMPLANTATION DES INVESTIGATIONS -



- Légende :
- Ligne de détection des armatures
 - ⊗ Prélèvement par poudre
 - ⊗ Prélèvement par carottage
 - ⊗ Sondage de connexion aux armatures



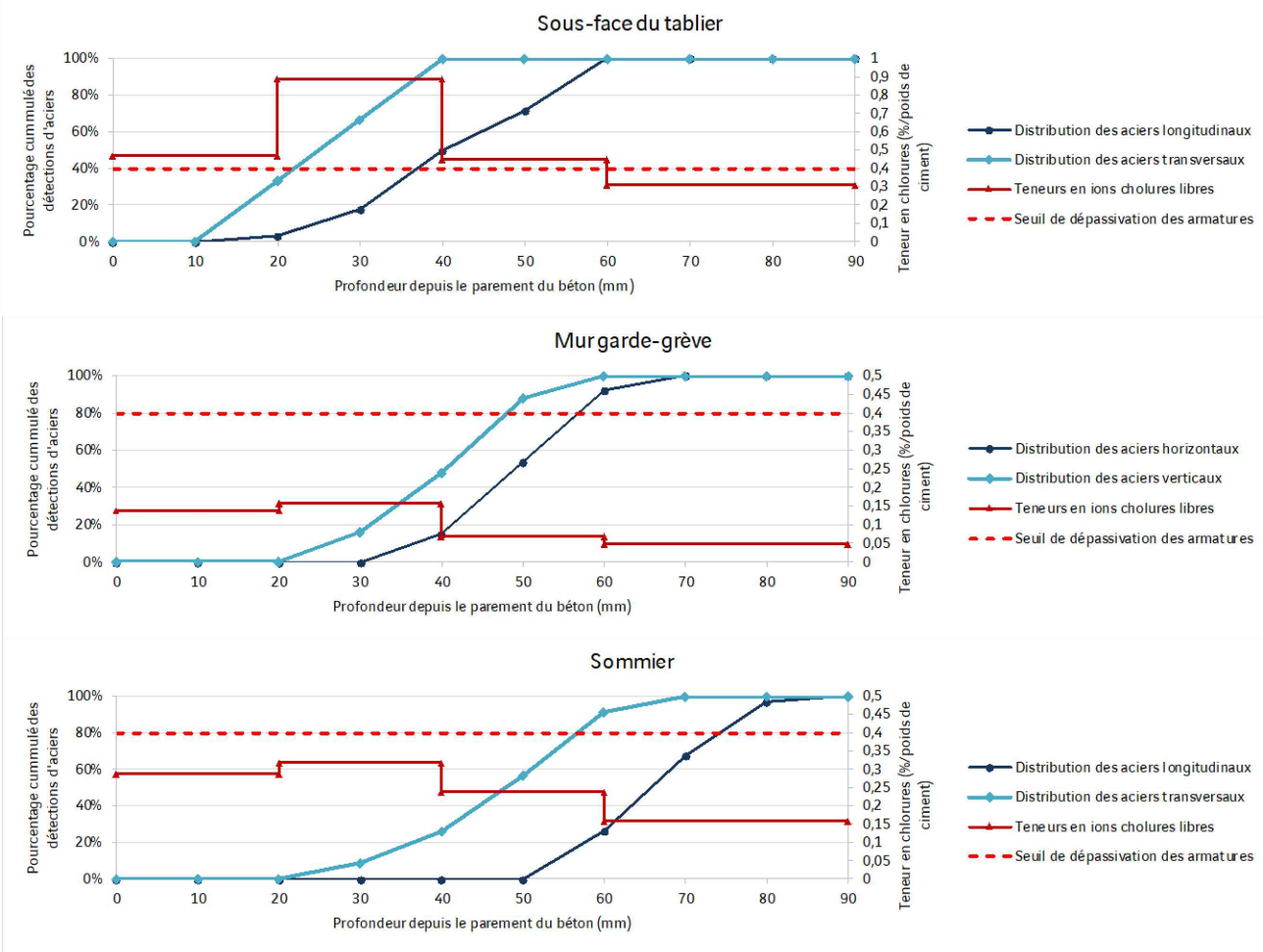
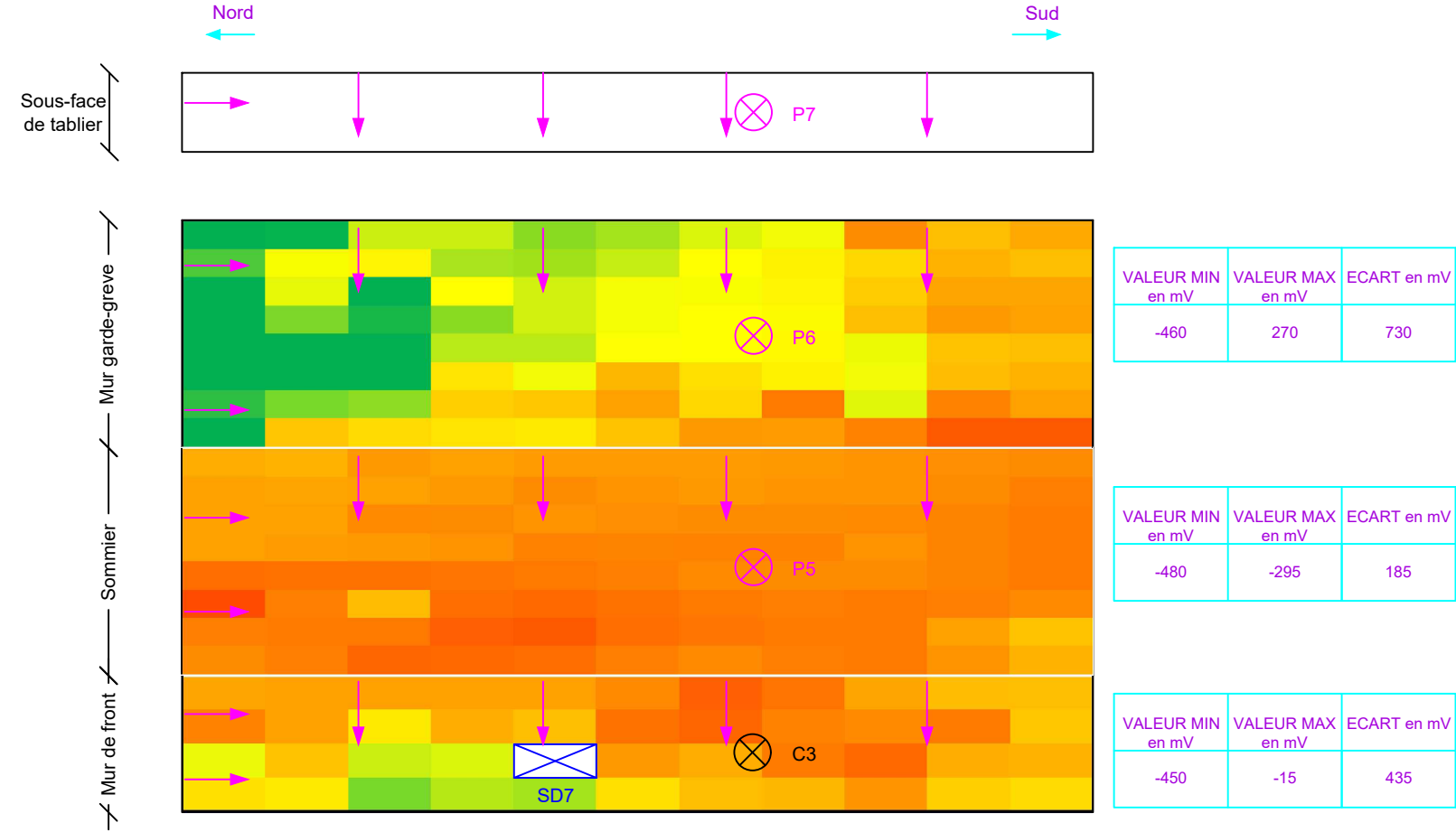
- Photographie générale de la zone -



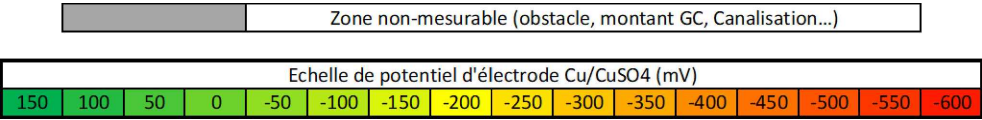
- Photographie du sondage destructif -

TOR Ø12, enr. 35mm, oxydation superficielle

- IMPLANTATION DES INVESTIGATIONS / CARTOGRAPHIE DE POTENTIEL DE CORROSION -



- Légende :
- Ligne de détection des armatures
 - ⊗ Prélèvement par poudre
 - ⊗ Prélèvement par carottage
 - ⊗ Sondage de connexion aux armatures



Rapport n° A20 02491

DIR CENTRE EST
PONT DE PIQUEPIERRE
DIAGNOSTICS BETON
Zone de diagnostic n°6

Indice A
Annexe 1
07/09/2020
Page 6 / 6

Phase : Diag Dessiné par : WIJA Vérifié par : ANCA



Annexe 2 – Reportage photographique des prélèvements

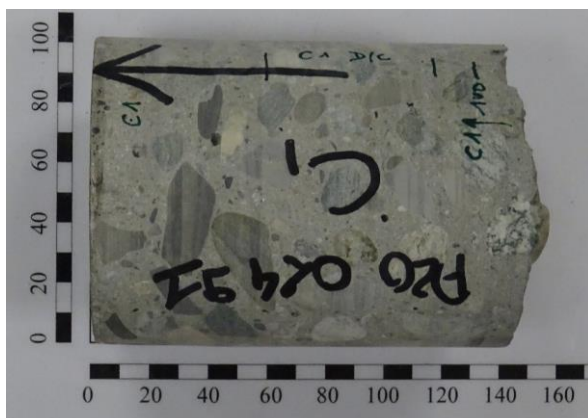


Tableau 18 - Carotte C1

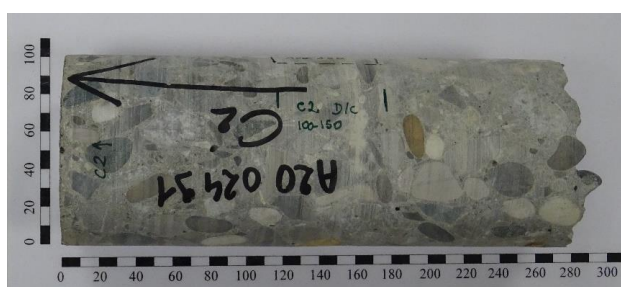


Tableau 19 - Carotte C2

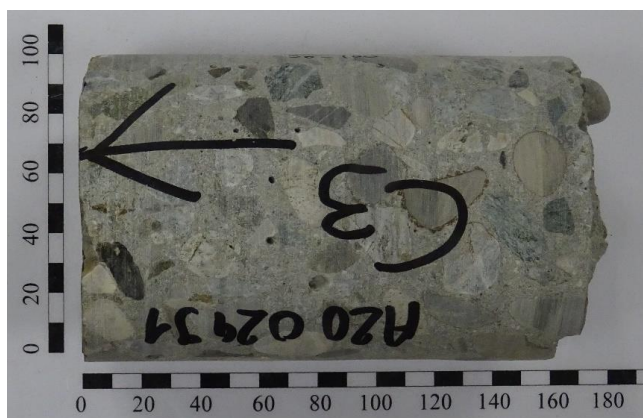


Tableau 20 - Carotte C3



Tableau 21 - Carotte C4



Annexe 3 – Méthodologie des essais en laboratoire

Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau

Cet essai est effectué selon la norme NF P18-459.

Le protocole de cet essai est le suivant :

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

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

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

Avec :

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

$$\text{Porosité accessible à l'eau : } P(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_{a'}} * 100 \text{ (en \%)}$$

Avec :

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

Rappels sur les teneurs en ions chlorures

Au même titre que la carbonatation, les ions chlorures libres (Cl^-) ont un rôle important dans le processus de dépassement et de corrosion des armatures. Ce sont ces chlorures libres qui migrent et qui sont responsables de la dépassement des armatures, par opposition aux chlorures totaux (= chlorures libres + chlorures piégés).

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

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

En termes de concentration en ions chlorures libres, il existe un seuil au-delà duquel la corrosion s'accélère. Lorsque ce seuil, égal à **0,4 % d'ions chlorures libres en poids par rapport au ciment (soit 0,06 % en poids par rapport à un béton « standard » dosé à 350 kg de ciment par m^3)**, est atteint, la couche de passivation des aciers disparaît, et la corrosion peut se propager.

La mise en solution avant l'analyse par potentiométrie des ions chlorures libres s'effectue selon le protocole suivant (recommandations du GranDuBé, 2007) :

- Mise en solution de l'échantillon de béton (broyé et tamisé à $315\ \mu\text{m}$) dans de l'eau déionisée,
- Mise en suspension de l'échantillon par agitation magnétique pendant 3 minutes,
- Ajout d'une solution ISAB avant analyse par potentiométrie.

Le dosage des ions chlorures libres est effectué à l'aide d'une sonde ISE chlorure (Ion-Selective Electrode) couplée à une sonde de référence et à un pH-ionomètre électronique de paillasse. La solution ISAB permet d'uniformiser la force ionique de tous les échantillons et des standards. Cela permet de stabiliser l'électrode de référence et ainsi de limiter la marge d'erreur.

Estimation de la teneur en liant hydraulique

Le dosage en ciment est calculé à partir de :

- La masse volumique apparente (selon la norme NF P18-459),
- La teneur en silice soluble de la pâte de ciment (selon les recommandations du GranDuBé, 2007),
- La méthode des inertes (selon les recommandations du GranDuBé, 2007).

Le dosage en ciment correspond à la moyenne de C1 (dosage par la méthode de la silice soluble) et C2 (dosage par la méthode des inertes).

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

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

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

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

Avec :

- *C1 : teneur en ciment en %,*
- *SiO₂solB : silice soluble du béton en %,*
- *SiO₂solC : silice soluble du ciment en %.*

SiO₂solC est soit connue soit choisie parmi les teneurs en silice proposées par le GranDuBé (2007) et dans les fiches produits des cimentiers en fonction du type de ciment supposé (CEM I, CEM II/A au laitier ou CEM III/A, /B ou /C)

La méthode des inertes comprend :

- Une mesure du pourcentage d'insoluble dans le béton obtenue par calcination à 975°C du résidu insoluble après mise en solution de l'échantillon dans de l'acide nitrique dilué),
- La perte au feu entre 80 et 550°C (teneur en eau liée),
- La teneur en CAO liée à l'anhydride carbonique (CO₂) obtenue par calcination et différence entre la perte au feu à 975°C et la teneur en eau liée.

En fonction de la teneur en CO₂, 2 formules de calcul peuvent être envisagées :

$$\text{Si CO}_2 > 1 \% : \\ \text{C2 (\%)} = 100 - [\text{insoluble} + \text{perte au feu} + ((\text{CO}_2 - 1) \times 1,27)] \quad (1)$$

Ou

$$\text{Si CO}_2 < 1 \% : \\ \text{C2 (\%)} = 100 - [\text{insoluble} + \text{perte au feu}] \quad (2)$$

La formule de calcul de la perte au feu (=eau d'hydratation + CO₂ des granulats calcaires + CO₂ de carbonatation) est la suivante :

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

Avec :

- m_3 : masse de la prise d'essai,
- m_4 : masse après calcination à 975°C.

La teneur en CO₂ correspond à la perte de masse entre 550°C et 975°C soit :

$$\% \text{CO}_2 = \frac{m_5 - m_4}{m_3} \times 100$$

Avec :

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

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

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

Avec :

- D : dosage en ciment en kg/m³,
- C : moyenne de C1 + C2,
- ρ : masse volumique du béton en g/cm³.