



UNE EXPERTISE QUI FAIT LA DIFFÉRENCE

SEPTEMBRE 2015

Dossier : CNI7.F.296

DIR Méditerranée

MAITRISE D'ŒUVRE RELATIVE A LA REPARATION DU PONT

PHASE PROJET

RN94 - PONT DE FONTAINE - CRETET

Commune de Montgenèvre (05)



GINGER CEBTP

Siège social : 12 avenue Gay Lussac – ZAC LA CLEF SAINT PIERRE – 78990 ELANCOURT – Tél : 01 30 85 24 00
S.A.S. au capital de 2 597 660 € - RCS Versailles B 412 442 519 – SIREN 412 442 519 – Code APE 742 C – N° TVA : FR 31 412 442 519
Email : info@groupe-cebtp.com – Site internet : www.groupe-cebtp.com
Qualité OPQIBI sous le n° 81 05 0433 – Organisme certificateur déclaré auprès du Ministère chargé de l'industrie





DIR MEDITERRANEE
RN94 - PONT DE FONTAINE - CRETET

Commune de Montgenèvre (05)

MAITRISE D'ŒUVRE RELATIVE A LA REPARATION DU PONT
PHASE PROJET

Dossier : CNI7.F.296			Rapport : 02			Contrat : CNI7.F.0182	
Indice	Date	Chargé d'affaire	Visa	Vérifié par	Visa	Contenu	Observations
A	05/04/16	Frédéric GERENTE		Guillaume GASQ		49 pages	
B							
C							

Sauf autorisation préalable, ce rapport n'est utilisable, à des fins commerciales ou publicitaires, qu'en reproduction intégrale. A compter du paiement intégral de la mission, le client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser à condition de respecter et de faire respecter les limites d'utilisation des résultats qui y figurent et notamment les conditions de validité et d'application du rapport. Les résultats obtenus ne sont pas généralisables sans justification de la représentativité des échantillons et des essais. Sauf demande expresse, les échantillons ne seront pas conservés après l'envoi du rapport d'essais



SOMMAIRE

1	PLAN DE SITUATION.....	5
2	CONTEXTE DE LA MISSION.....	7
2.1	DONNEE GENERALES	7
2.2	MISSION DE GINGER CEBTP	7
3	RAPPEL DU CONTEXTE DE LA MISSION	8
3.1	RESULTATS DE LA MISSION DE DIAGNOSTIC	8
3.2	SYNTHESE DE LA PHASE DIAGNOSTIC	9
3.3	CONSISTANCE DE LA PRESTATION RETENUE PAR LE MAITRE D'OUVRAGE	10
3.4	HYPOTHESES DE CALCUL RETENUE PAR LE MAITRE D'OUVRAGE AU STADE DE L'AVANT-PROJET	11
3.4.1	Parties de l'ouvrage dans le scope des études.....	11
3.4.2	Hypothèses de calcul retenues par le Maître d'Ouvrage	11
3.4.3	Prise en compte des remarques issues de l'avis du CEREMA	12
3.4.4	Choix du système de protection cathodique	13
4	PARTIE REPARATION STRUCTURELLE DES PARTIES DE L'OUVRAGE	14
4.1	MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'OUVRAGE EXISTANT	14
4.2	DIMENSIONNEMENT DES REPARATIONS	21
4.2.1	Poutres P1 à P4.....	21
4.2.2	Poutres P5.....	22
4.2.3	Voûte	22
4.2.4	Dalle.....	23
4.3	PHASE PROVISOIRE	26
5	PARTIE PROTECTION DES OUVRAGES.....	27
5.1	HYPOTHESES GENERALES	28
5.1.1	Documents de référence.....	28
5.1.2	Méthodologie de travail.....	28
5.1.3	Protection cathodique des structures existantes.....	29
5.1.4	Prévention cathodique des structures neuves	30
5.1.5	Problématiques liées au chantier.....	31

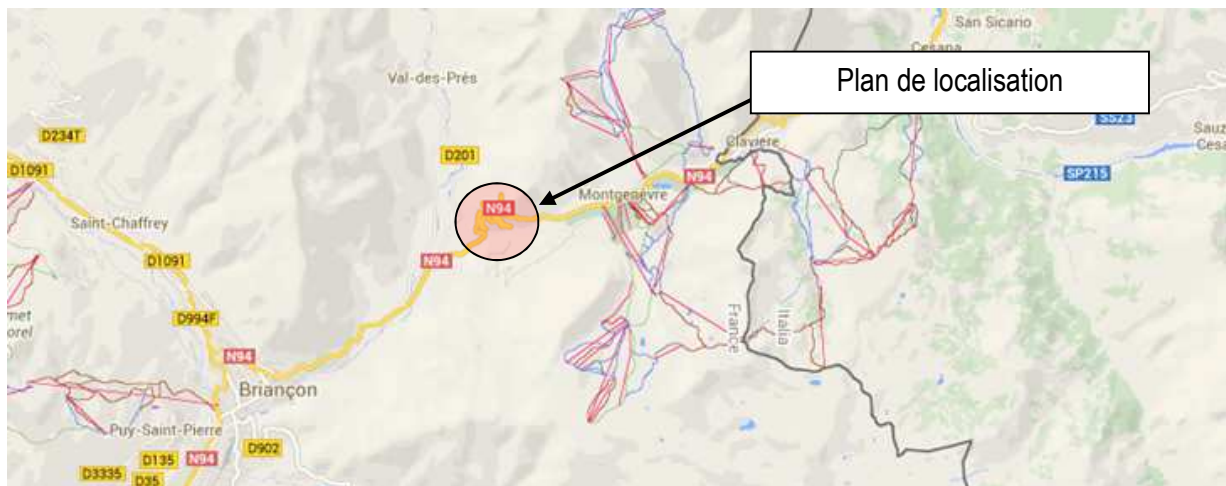


5.1.6	<i>Epreuve de convenance</i>	32
5.2	PROPOSITION DU SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE	33
5.2.1	<i>Description des parties de structure à protéger</i>	33
5.2.2	<i>Calcul des surfaces d'acier</i>	33
5.2.3	<i>Calcul des courants de protection</i>	36
5.2.4	<i>Pré dimensionnement du système anodique</i>	36
5.2.1	<i>Durée de vie et caractéristique du système anodique</i>	38
5.2.1	<i>Bilan de puissance</i>	39
5.2.1	<i>Système de mesurage</i>	42
6	PROPOSITIONS DE TRAVAUX	43
6.1	TRAVAUX PREPARATOIRE	43
6.2	ETAIEMENT PROVISoire	44
6.3	PURGE DES BETONS NON ADHERENTS	44
6.4	TRAVAUX DE RENFORCEMENT MECANQUES	45
6.5	LA PROTECTION ELECTROCHIMIQUE	45
6.5.1	<i>Solution PCCI</i>	45
6.5.2	<i>Définition du matériel à mettre en œuvre</i>	46
6.5.3	<i>Alimentation électrique</i>	47
6.5.4	<i>Monitoring et mise en service</i>	47
6.6	BETON PROJETE PAR VOIE SECHE	48
6.7	TRAVAUX DE REPRISE DES LAMIERs	48
7	ESTIMATIF DU COÛT DES TRAVAUX	49

1 PLAN DE SITUATION

L'ouvrage concerné par la mission se situe sur la RN94 au PR 166+838 entre Briançon et Montgenèvre sur la commune de Montgenèvre.

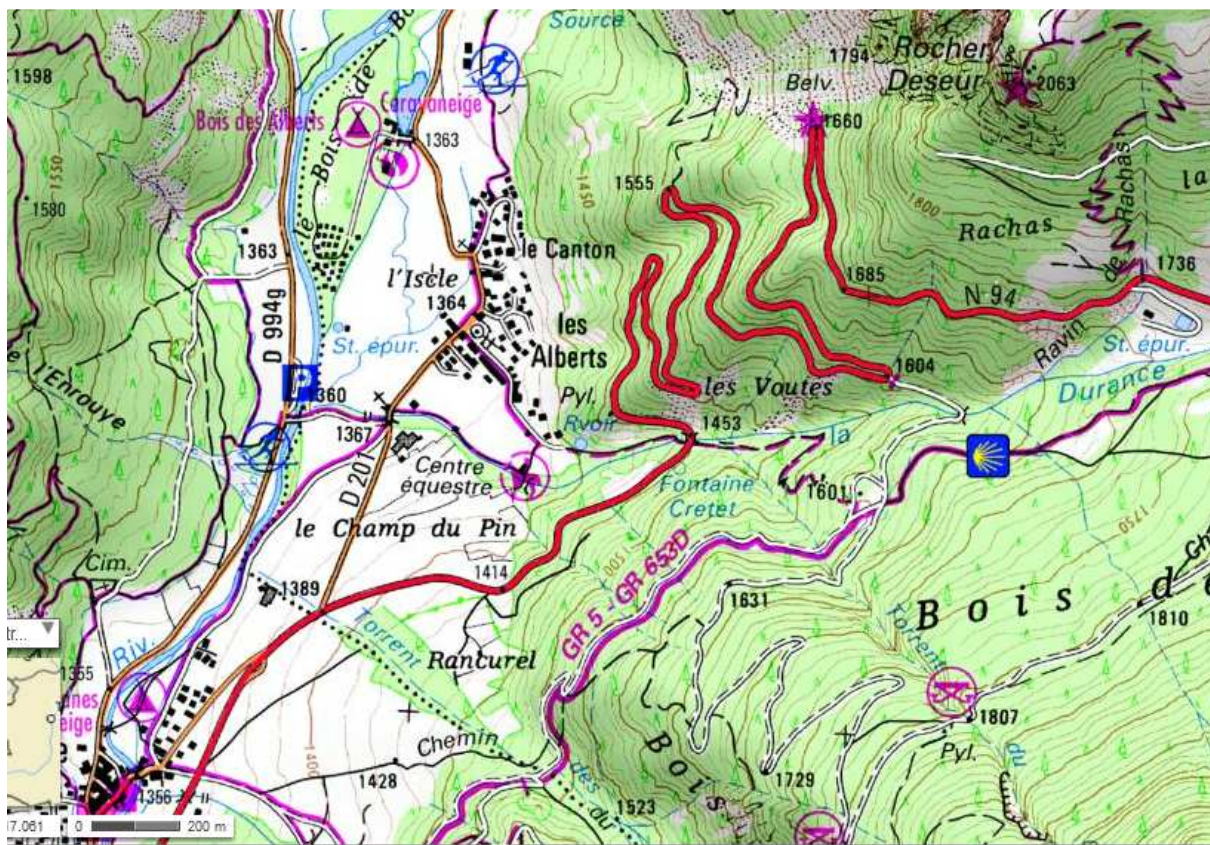
La vue du site est définie ci-dessous :



Le plan de situation au 1/100 000 ème en milieu interurbain est donné ci-dessous :



Le plan de situation au 1/25 000 ème en milieu est donné ci-dessous :





2 CONTEXTE DE LA MISSION

2.1 DONNEE GENERALES

La mission de GINGER CEBTP AGENCE DE NICE est une mission de maîtrise d'œuvre complète suite à un appel d'offre réalisé par la DIR Méditerranée.

Nom de l'opération : MISSION DE MOE RELATIVE A LA REPARATION DU PONT DE FONTAINE CRETET

Localisation / adresse : RN94 PR 166+838 - Pont de Fontaine - Cretet

Commune : Montgenèvre (05)

Demandeur de la mission : *DIR MEDITERRANEE*

Client : *DIR MEDITERRANEE*

2.2 MISSION DE GINGER CEBTP

La mission de GINGER CEBTP est conforme au contrat n° CNI7.F.0182. Il s'agit d'une mission de maîtrise d'œuvre relative à la réparation du pont de Fontaine Crétet sur la RN94 au PR 166+838.

Cette mission fait suite à une étude de diagnostic réalisé par Ginger CEBTP durant la troisième semaine du mois d'août 2014.

La mission de maîtrise d'œuvre se décompose selon les phases suivantes :

- Etudes d'Avant-Projet
- Etudes de Projet et rédaction des pièces écrites DCE
- Phase ACT
- Phases DET et VISA
- Réception des Travaux AOR

Le présent rapport correspond aux études de Projet.



3 RAPPEL DU CONTEXTE DE LA MISSION

3.1 RESULTATS DE LA MISSION DE DIAGNOSTIC

La mission de diagnostic précédemment effectuée appelle les commentaires suivant au niveau de l'ouvrage :

- L'ouvrage est ponctuellement affecté de désordres d'origine mécanique,
- Les armatures, dont les enrobages sont faibles, baignent dans un béton de basicité inférieure à $\text{pH} = 8,5$. Elles se situent dans un état de dépassement. Ces enrobages varient de 0 à 4 cm en fonction des zones pour un front de carbonatation compris entre 3 et 5 cm.
- La teneur en chlorure du béton est très supérieure à la valeur limite au niveau du parement, mais s'atténue au cœur du béton. La teneur maximale mesurée est de 1.6 % par rapport au taux de ciment, et de l'ordre de 0.4 % à 4 cm d'enrobage.
- L'activité corrosive est très forte sur la face latérale extérieure de la poutre aval. Cependant, les mesures de « courant de corrosion » peuvent être interprétées comme modérées à rapide.
- Le béton de l'ouvrage a une porosité de l'ordre de 20% et une classe de résistance en compression évaluée à C25/30.
- La sous-face de l'ouvrage poutres et tablier est recouverte d'une projection de béton sur une nappe de « nerlat », à ce jour en cours de corrosion et décollé de son support.

Les pathologies ainsi relevées sur le béton ont plusieurs origines :

- la présence d'agents polluants (chlorures) dans le béton liés aux sels de déverglaçage,
- des infiltrations à travers la dalle en béton,
- Une porosité importante du béton, caractérisant une faible durabilité. L'ouvrage situé à une altitude de 1450 m, est soumis aux effets du gel et dégel.

3.2 SYNTHESE DE LA PHASE DIAGNOSTIC

La synthèse de la mission de diagnostic est la suivante :

A ce jour, l'ouvrage est soumis à des conditions climatiques extrêmes :

- gel/dégel,
- sels de déverglaçage,
- sollicitation mécaniques importantes.

Une problématique d'ordre mécanique a été relevé au niveau de la poutre de rive amont, se manifestant par la présence d'une fissure à 45° de chaque côté. Ce phénomène est lié à un déficit d'armatures transversales à proximité des appuis.

D'un point de vue de la durabilité les altérations sont liées à une pathologie de corrosion des armatures, couplée à des phénomènes de gel et dégel.

L'origine de la corrosion des armatures est liée aux zones de faible enrobage où le béton est carbonaté et chloré. Cette combinaison d'agents pathogènes crée des conditions de corrosion pouvant être quantifiées d'évolutives avec une vitesse modérée à rapide. De plus cette propagation est accentuée par les effets du gel et du dégel.

A terme, les armatures les plus proches du parement vont continuer à se dissoudre pour arriver à une section insuffisante vis-à-vis de la stabilité mécanique de l'ouvrage.

Ponctuellement l'ouvrage présente des défauts (manque de béton, zones détruites) qu'il conviendra de reprendre.

3.3 CONSISTANCE DE LA PRESTATION RETENUE PAR LE MAITRE D'OUVRAGE

Il s'agira de prévoir des réparations permettant de stopper l'évolution de la corrosion au niveau du béton armé ainsi que des travaux de remise en état des zones d'enrobage défectueuses des armatures en place, de remplacement des armatures sectionnées, et de renforcement des poutres aux efforts tranchants (cadres).

Des réparations ponctuelles et traditionnelles avec un piquage des aciers, un détournage et une protection des armatures à l'aide d'un produit ne sont pas suffisantes sans reprise de l'étanchéité générale du tablier pour éviter la propagation de la corrosion et peuvent également induire un phénomène de pile induite, pouvant encore accélérer le processus de dégradation.

De façon générale, les types de travaux retenus par le MOA sont les suivants :

- Purge de tout le béton non adhérent,
- Rajout d'armatures longitudinales (si perte de section trop importante) et transversales à proximité des appuis (fissures à 45°),
- Reprise des zones de béton détruites,
- Reconstitution des enrobages,
- Mise en place d'un système de protection électrochimique

Le système de protection électrochimique envisagé permet de garantir la durabilité de l'ouvrage et des réparations vis-à-vis de la corrosion des armatures du béton. Afin de s'affranchir des venues d'eau et du drainage des ions chlorures, la reprise de l'étanchéité générale doit être envisagée. Hors cet ouvrage est sur un axe stratégique qui assure à la fois la desserte des Alpes et la desserte vers l'Italie par le col du Montgenèvre. Il n'est donc pas possible et inenvisageable de prévoir un alternat ou une coupure partielle en raison d'une impossibilité à assurer la giration des Poids Lourds ou des Bus. Raisons pour lesquelles la protection électrochimique est envisagée.



3.4 HYPOTHESES DE CALCUL RETENUE PAR LE MAITRE D'OUVRAGE AU STADE DE L'AVANT-PROJET

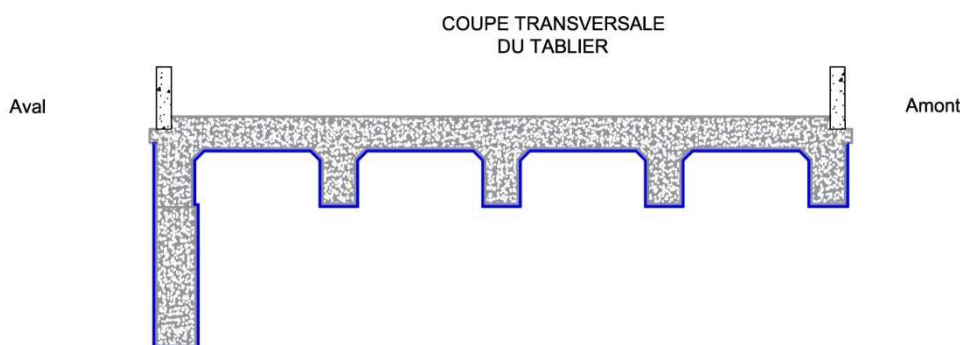
La réparation de cet ouvrage sera abordée sous deux aspects, le premier concernant la stabilité mécanique de l'ouvrage existant ; le second concernant la durabilité des réparations et des parties d'ouvrage dans le scope des études, par rapport à l'environnement.

3.4.1 Parties de l'ouvrage dans le scope des études

Dans le cadre de cette mission de Maîtrise d'œuvre de réparation, le scope des études est le suivant :

- Les 5 poutres longitudinales et les appuis des 2 poutres amont et aval (au niveau des retombées extérieures)
- La sous-face du tablier
- L'arc en béton armé et ses appuis
- Les larmiers amont et aval

La coupe présentée ci-dessous schématise les parties de l'ouvrage à réparer.



3.4.2 Hypothèses de calcul retenues par le Maître d'Ouvrage

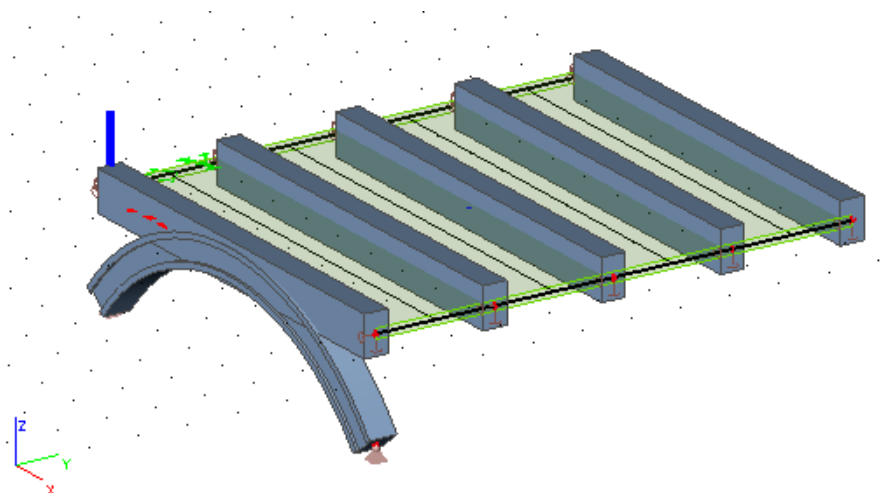
Selon les termes retenus par la DIRMED (mail du 03/08/15), l'ouvrage sera vérifié et réparé sous les seules charges civiles de l'Eurocode 1 ou du fascicule 61 de 1971. Le cas de charge le plus défavorable pour l'ouvrage sera retenu. Dans l'hypothèse d'un calcul selon le fascicule 61 de 1971, il conviendra également de vérifier l'ouvrage réparé sous une grue mobile de 72 tonnes (6 essieux de 12t).

Concernant la durabilité des réparations et des parties traitées, les solutions proposées dans l'avant-projet sont calculées pour des durées de vie supérieures à 20 ans.

Les propositions de travaux s'articulent autour des deux aspects cités ci-avant, à savoir : la partie réparations structurelles et durabilité.



La structure du pont a fait l'objet d'une modélisation sur laquelle les différents cas de charges transmis par la DIRMED ont été appliqués.



Lors des investigations sur site en phase diagnostic, les aciers de la voûte ont été détectés et se poursuivent en imbrication au niveau de la poutre. En conséquence, la voûte est prise en compte dans le modèle de calcul structurel de l'ouvrage.

Les résultats montrent que le cas de charge le plus défavorable pour les poutres de l'ouvrage est celui correspondant au fascicule 61 titre II et pour le cas de charge d'accumulation $a1.a2.A(l) = 0.9 \times 1 \times [230 + 36000 / (l + 12)]$, soit 19.2 kN/m².

3.4.3 Prise en compte des remarques issues de l'avis du CEREMA

La DIRMED demande à ce que certaines remarques issues de l'avis du CEREMA Dtec ITM du 08/02/2016 soient prises en compte, à savoir :

- Tenir compte dans les calculs du surpoids dû aux aciers et au béton rajouté
- Négliger les aciers en place (fe 235) fortement corrodés dans les justifications des aciers (fe 500) rajoutés.



3.4.4 Choix du système de protection cathodique

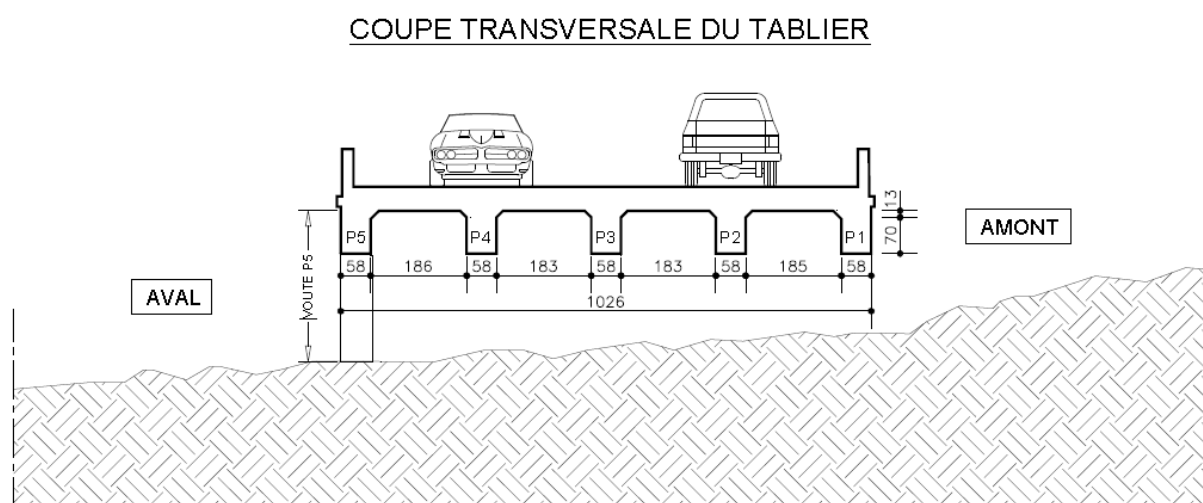
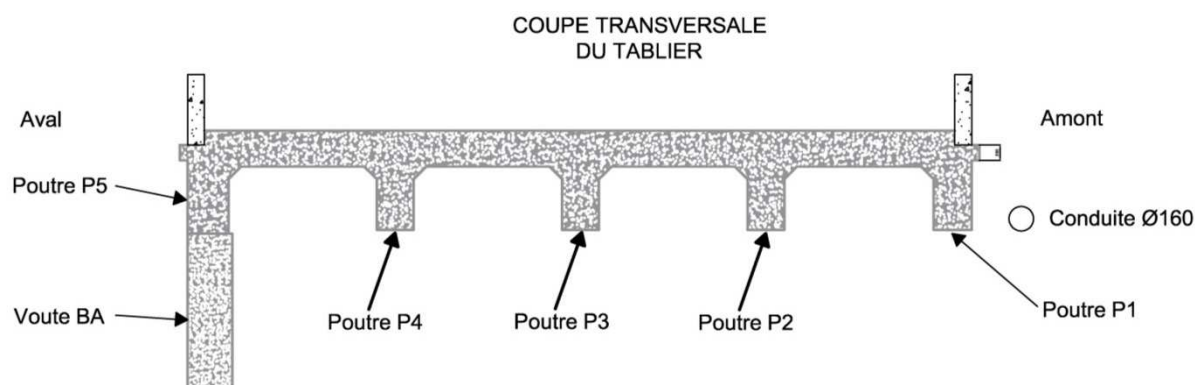
Les études d'avant-projet de réparation du pont ont développé deux systèmes de protection cathodiques des armatures dans le béton, soit par courant imposé soit par courant galvanique. Les autres traitements électrochimiques ayant été écartés en phase avant-projet.

Dans le cadre de ce projet, le choix s'oriente sur la protection cathodique par courant imposé, compte tenu du type de polluant et de l'approche économique présentée en phase avant-projet.

4 PARTIE REPARATION STRUCTURELLE DES PARTIES DE L'OUVRAGE

4.1 MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'OUVRAGE EXISTANT

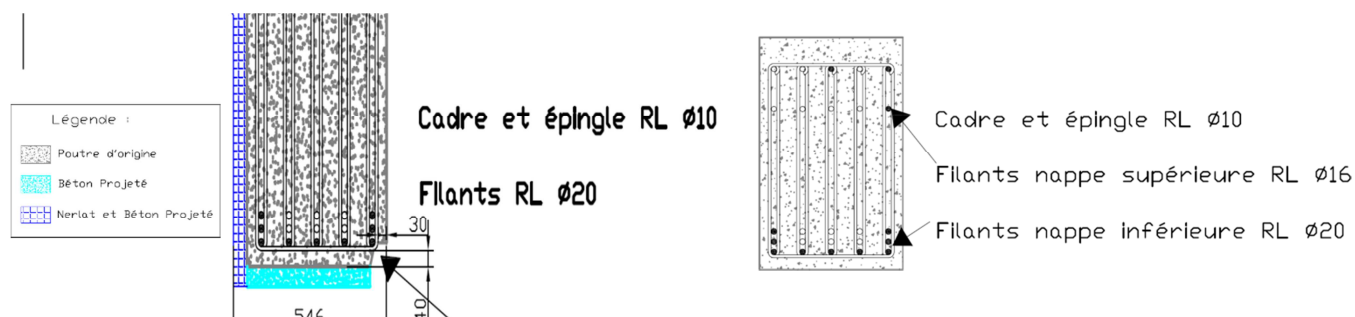
La coupe transversale du tablier permet de repérer les poutres selon la dénomination suivante :



La modélisation de l'ouvrage a été effectuée en prenant en compte les résultats du diagnostic relatifs à l'évaluation de la résistance en compression et à la définition du ferrailage.

- Ferrailage des éléments issu du diagnostic :

Poutres :

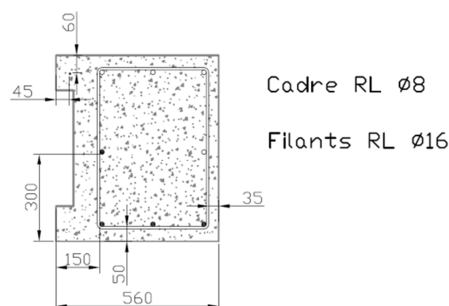


Dans les calculs, le Nerlat n'a pas été pris en compte.

Conformément aux remarques du CEREMA, les armatures longitudinales du 1^{er} lit ainsi que les latérales présentant une forte corrosion ne seront pas prises en compte.

Les armatures transversales ont été reconnues sectionnées en différents endroits. Il est considéré qu'elles ne remplissent plus leur rôle et sont à l'origine du phénomène de fissuration à 45° observé au niveau de la poutre P1. En conséquence, ces armatures ne sont pas prises en compte.

Voûte :



Les aciers Ronds Lisses (RL) existants font l'objet d'une hypothèse de limite élastique $F_e E 235 \text{ MPa}$.

Dans le cadre du calcul, les sections d'acier de la nappe inférieure ne seront pas prises en compte, conformément à l'avis du CEREMA. Pour les cadres, certains sont discontinus. Ces armatures transversales ne seront également pas prises en compte.



- Béton existant de l'ouvrage

Le béton sain de l'ouvrage a été éprouvé par des tests de résistance en compression sur carottes. L'interprétation de ces résultats conformément à la norme NF EN 13 791/CN conduit à retenir une classe de résistance C25/30.

Compte tenu de la non prise en compte des armatures fortement corrodées, la modélisation effectuée ci-après prendra en considération les charges permanentes liées rajout de béton et d'armatures.

Poutres :

Les sections purgées seront étoffées des diamètres des armatures en rajout ainsi que de 5 cm de béton projeté qui intégrera une protection cathodique de surface par courant imposé.

Voûte :

Les sections purgées seront étoffées des diamètres des armatures en rajout ainsi que de 5 cm de béton projeté qui intégrera une protection cathodique de surface par courant imposé.

Dalles :

La sous-face des dalles sera purgée de l'épaisseur du béton projeté, du Nerlat et de l'enrobage des armatures basses. Il sera ensuite rajouté une nappe d'armatures et un système de protection cathodique de surface par courant imposé. Il y a donc lieu de considérer une épaisseur correspondant aux diamètres des armatures en rajout et de 5 cm de béton projeté intégrant la PCCI.

- Charge permanente supplémentaires

Poutres :

Epaisseur de projection latérale (joue) : 9 cm, surépaisseur par rapport à la poutre initiale : 6 cm ; soit 12 cm de large en plus par rapport à la poutre initiale et 4 cm en sous-face.

La charge supplémentaire liée à l'épaississement des poutres à considérer dans le modèle est d'environ 3 kN/ml.

Voûte :

On considère une nouvelle poutre de 52 cm de largeur et de 68 cm de hauteur.

Dalles :

La charge supplémentaire considérée est de 6 cm x 25 kN/m³ soit 1.5 kN/m². Soit une charge répartie au total sur les éléments filaires de 14.35 kN/m²

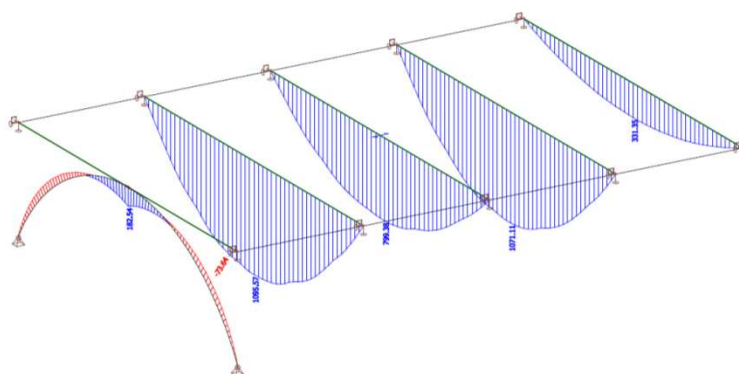


- Modélisation du fonctionnement

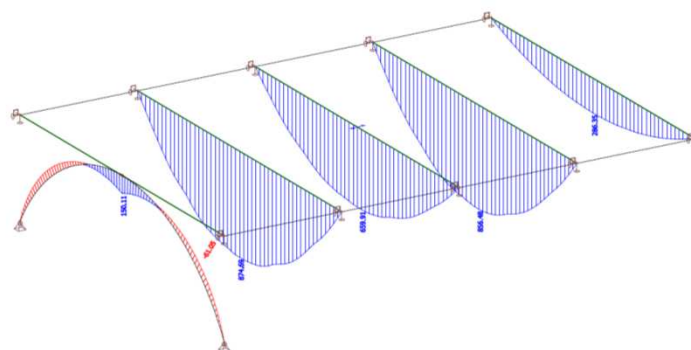
Les modélisations du fonctionnement de l'ouvrage par rapport aux moments de flexion des poutres et de la voute, ainsi que par rapport à l'effort tranchant, sont illustrés sur les images ci-dessous :

Les éléments filaires (poutres et voûte) ont été modélisés à différents niveaux de sollicitation, à savoir :

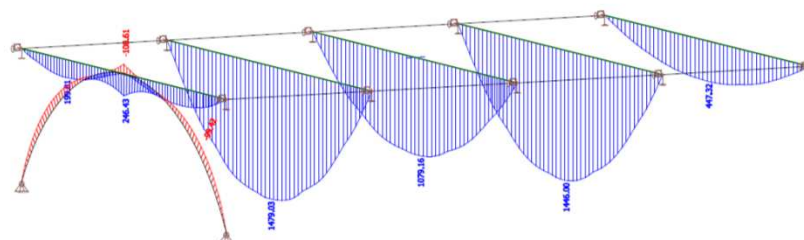
- Moments ELS Car, ELS Fre et ELU



ELS Car

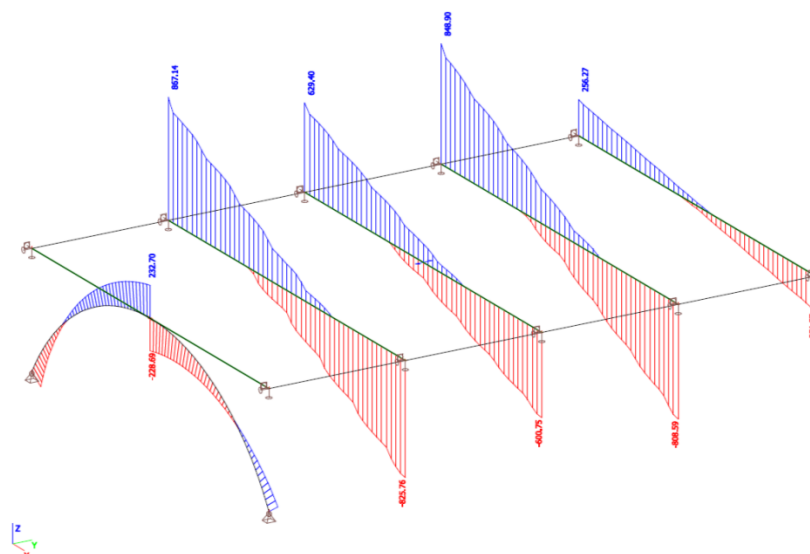


ELS Fre



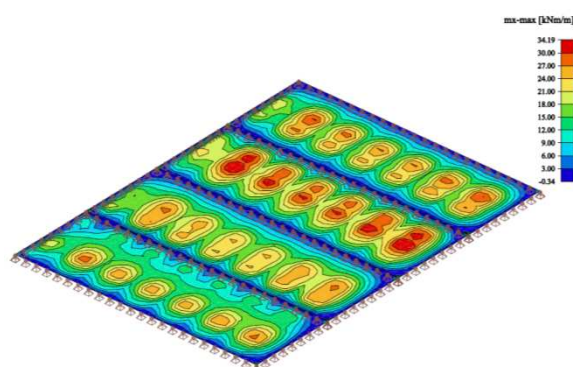
ELU

- Efforts tranchants ELU :

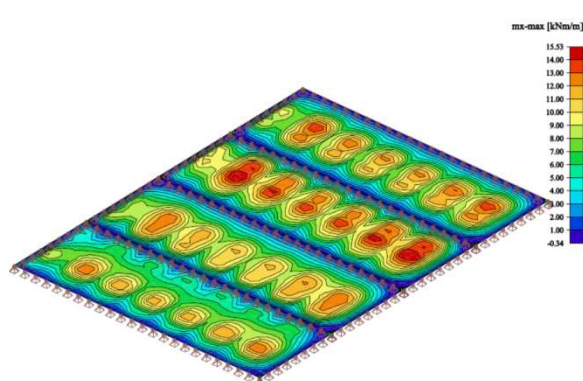


Les éléments dalles ont été modélisés à différents niveaux de sollicitation, à savoir :

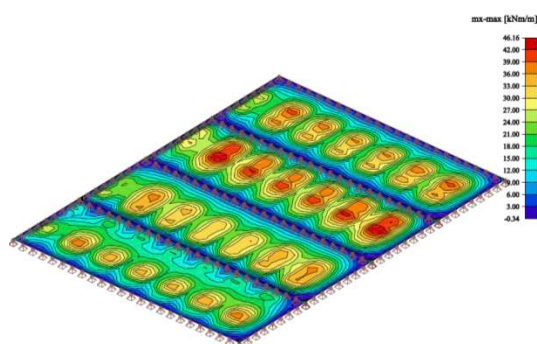
- Moments Mx ELS Car, Mx ELS Fre et Mx ELU



Mx ELSCar

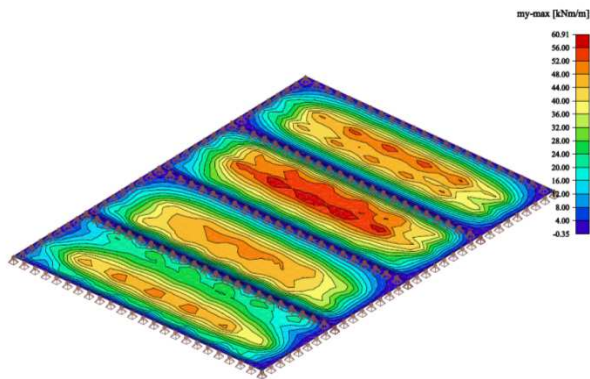


Mx ELSFre

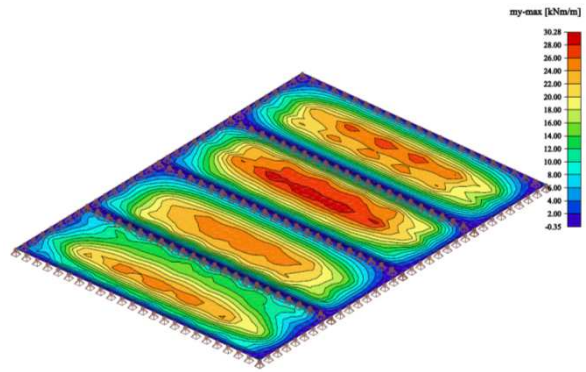


Mx ELU

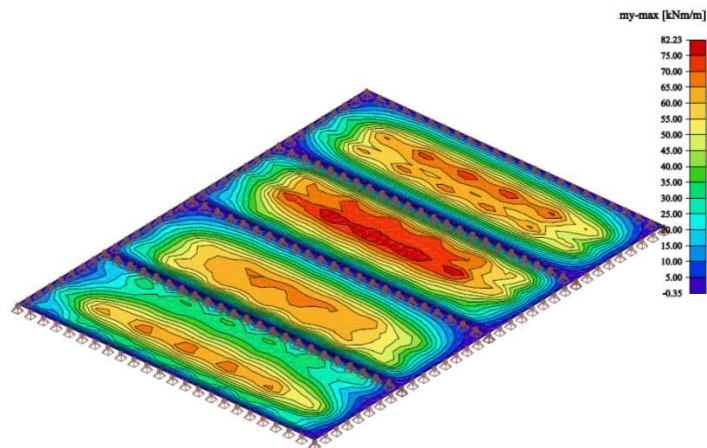
- Moments My ELS Car, My ELS Fre et My ELU



My ELSCar



My ELSFre



My ELU

- Résultats de la modélisation

Poutres P1 à P4 :

Pour les poutres **P1 à P4**, le moment de flexion maximum à l'ELU sous le cas de charge considéré est de : **My (ELU) = 1479,03 kN.m**, pour un My (ELScar) = 1095.57 kN.m et un My (ELSfre) = 874.69 kN.m

Pour les poutres **P1 à P4**, l'effort tranchant maximum à l'ELU sous le cas de charge considéré est de : **Vz (ELU) = 703.73 kN**, à 0.78 m du nu d'appui.

Poutre P5 :

Pour la poutre **P5**, les moments de flexion maximum à l'ELU sous le cas de charge considéré sont de :

My (ELU) trav = 199,81 kN.m

My (ELU) App central = 108,61 kN.m

Voûte:

Pour la poutre voûte, les moments de flexion maximum à l'ELU sous le cas de charge considéré sont de :

My (ELU) trav = 246,43 kN.m

My (ELU) arc sup = 99,42 kN.m

L'effort tranchant maximum à l'ELU sous le cas de charge considéré est de :

Vz (ELU) = 232.70 kN.

Dalles :

Pour les poutres dalles, les moments de flexion maximum à considérer sont de :

My (ELU)	= 82.23 kN.m/ml	Mx (ELU)	= 46.16 kN.m/ml
My (ELScar)	= 60.91 kN.m/ml	Mx (ELScar)	= 34.19 kN.m/ml
My (ELSfre)	= 30.28 kN.m/ml	Mx (ELSfre)	= 15.53 kN.m/ml

4.2 DIMENSIONNEMENT DES REPARATIONS

4.2.1 Poutres P1 à P4

- Armatures longitudinales

En négligeant les armatures existantes corrodées au niveau des poutres **P1 à P4**, le moment résiduel des poutres est de 251 kN.m. Afin d'équilibrer le moment sollicitant retenu ci-avant, il convient d'ajouter une section d'armatures longitudinales en renfort de :

Section As ajout = 39.44 cm² avec une limite élastique de 500 MPa.

Cela conduit à renforcer la poutre à l'aide de **5 barres HA 32 de type B500B**.

- Armatures d'effort tranchant

Ce calcul d'armature a été effectué en ne considérant plus aucune armature à l'effort tranchant existante.

Cela conduit à retenir des cadres **HA 12 de type B500B** espacés tous **10 cm sur les 2 premiers mètres** et espacés de **20 cm en partie courante**.

- Vérification des contraintes

Seule la vérification des contraintes à court terme s'impose, compte tenu de la protection cathodique pour le long terme.

Court terme :

$$\sigma_{car} = M.y/I = 14.6 \text{ MPa} < 0.8 \cdot f_{ck}$$

$$\sigma_s = [\alpha_e \cdot \sigma_e \cdot (d-y)]/y = 271.5 \text{ MPa} < 0.8 \cdot f_e$$

Vérification des contraintes à court terme validée.



4.2.2 Poutres P5

Le moment résiduel de la poutre en négligeant les aciers corrodés est de 251.34 kN.m. Il est donc supérieur au moment sollicitant modélisé.

De façon sécuritaire, il sera procédé au même ferrailage en renforcement pour les armatures transversales, et uniquement par l'ajout de **2 barres HA 32** longitudinales de part et d'autre de la poutre, en intersection avec les renforts de la voûte.

4.2.3 Voûte

- Armatures longitudinales

En négligeant les armatures existantes corrodées et en prenant en compte l'imbrication de la poutre, cela conduit à retenir un ajout d'armatures longitudinales en renfort de :

Section As inf ajout = 8.04 cm² en fibre inférieure avec une limite élastique de 500 MPa, et,

Section As sup ajout = 8.04 cm² en fibre supérieure avec une limite élastique de 500 MPa.

Cela conduit à renforcer la voute à l'aide de **2 x 4 barres HA 16 de type B500B**.

- Armatures d'effort tranchant

Ce calcul d'armature a été effectué en ne considérant plus aucune armature à l'effort tranchant existante.

Cela conduit à retenir des cadres **HA 12 de type B500B** espacés tous **20 cm**.

- Vérification des contraintes

Le dépassement des contraintes dans le béton et les aciers n'est pas à craindre. La durabilité vis-à-vis du critère de fissuration est assurée par la protection cathodique.

Vérification des contraintes à court terme validée.



4.2.4 Dalle

- Armatures longitudinales en sous-face

Le calcul a été effectué en ne considérant plus aucune armature longitudinale en sous-face de dalle. De plus les moments sollicitant ont été calculés sans continuité entre les éléments de dalle.

Le dimensionnement conduit à retenir une section d'armature en renfort en sous-face de 10.5 cm²/m dans le sens le plus défavorable.

Cela correspond à rajouter **2 nappes de treillis ST 50 C**

- Vérification des contraintes

Seule la vérification des contraintes à court terme s'impose, compte tenu de la protection cathodique pour le long terme.

Court terme :

$$\sigma_{car} = 18.7 \text{ MPa} \sim 0.75 \cdot f_{ck}$$

$$\sigma_s = 275.8 \text{ MPa} < 0.8 \cdot f_e$$

Vérification des contraintes à court terme validée.

Les schémas ci-dessous illustrent les principes réparatoires proposés.

COUPE SUR P1 à P4

ech: 1/25

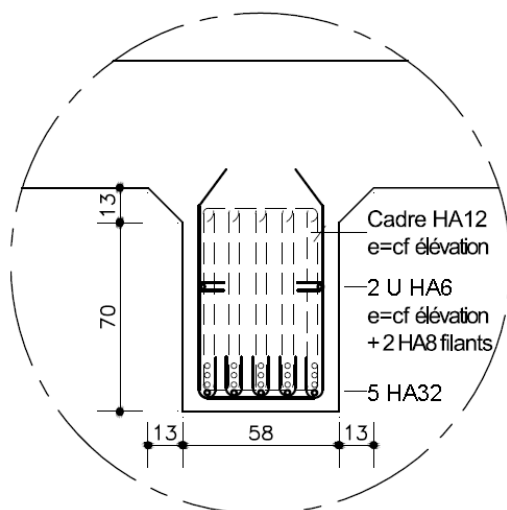
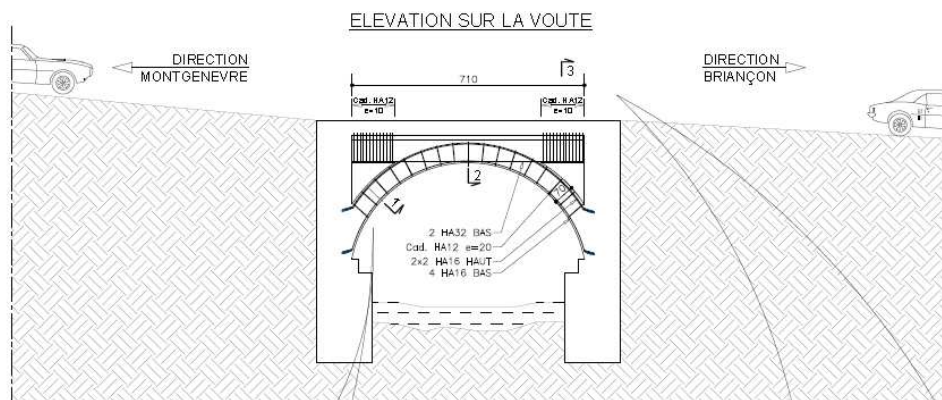
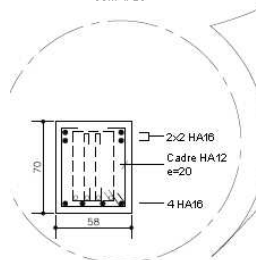


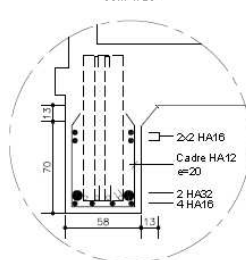
Schéma poutre partie courante



COUPE 1-1
ech: 1/25



COUPE 2-2
ech: 1/25



COUPE 3-3
ech: 1/25

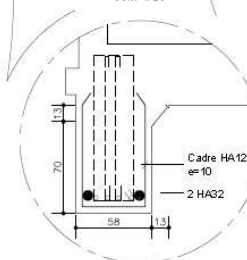


Schéma du renforcement de la voûte

Le schéma ci-dessous illustre les dispositions de renforcement pour les dalles.

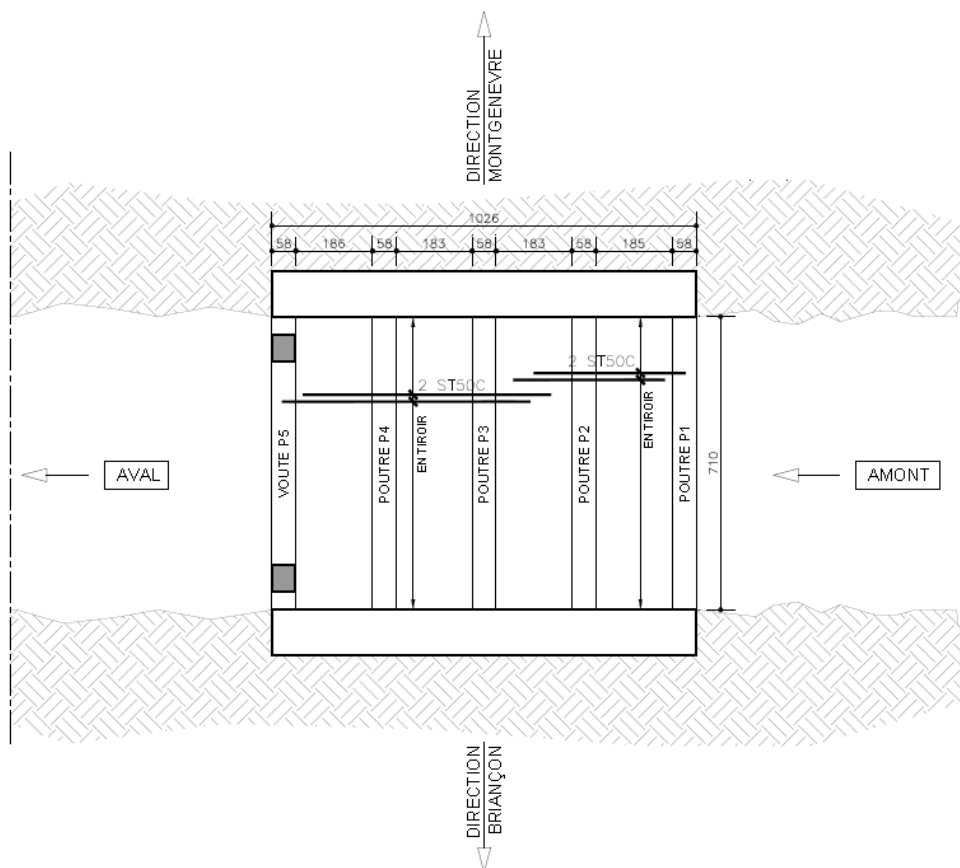


Schéma de reprise des dalles

Les plans de reprise sont diffusés dans un plan à part du présent document.

- Béton

L'ensemble de ces renforcements sera enrobé d'un minimum de 5 cm de béton projeté par voie sèche, de façon à considérer un monolithisme au niveau des réparations entre le béton existant et le béton rajouté. Il devra être choisi un béton de type **C 35/45 XD3** selon la norme NF EN 206 CN de décembre 2014

4.3 PHASE PROVISOIRE

Les contraintes imposées par la DIRMED relatives au maintien intégral de la circulation sur l'ouvrage pendant les travaux réparatoires nécessite la prise en compte de certaines dispositions pendant les phases critiques.

Ces phases critiques sont les suivantes :

- Purge des bétons, nettoyage des armatures (élimination de la délamination),
- Renforcement de l'ouvrage par ajout d'armatures,
- Réalisation du béton projeté relatif à la reconstitution de l'enrobage des armatures.

Pour ces 3 phases, il sera nécessaire de réaliser un étalement provisoire dont les efforts devront être repris au niveau des culés existantes. Ces renforts pourront consister à soulager les dalles ou les poutres par l'intermédiaire de poutres treillis démontables et manu portables reposant sur des corbeaux fixés sur les culés.

5 PARTIE PROTECTION DES OUVRAGES

Les principales tâches à réaliser sont : la purge des bétons dégradés, le traitement des aciers en place et leur remplacement ou ajout éventuel, la reconstitution du parement par mise en œuvre d'un béton projeté par voie sèche, et enfin la protection des aciers par la mise en œuvre d'une protection cathodique.

La protection cathodique est la seule technique éprouvée qui permet de rallonger la durée de service des ouvrages en béton armé soumis à des polluants entraînant la corrosion des armatures pour des durées de vie supérieures à 20 ans.

Le présent document est une étude de projet fixant les hypothèses issues du diagnostic, du pré-design de la Protection cathodique par courant imposé, conformément aux recommandations de la norme EN 15-257. Les personnels impliqués dans la conception du projet doivent avoir validé un niveau de compétences en fonction des tâches qui leur incombent, en conséquence de quoi, cette partie du document est rédigé par Mr GERENTE Frédéric **certifié Niv2 Béton suivant la norme EN 15-257**.

L'ensemble des procédures et documents concernant la protection cathodique des aciers dans le béton est basé sur les recommandations de la norme A05 800.

Le reste des travaux concernant les réparations des superstructures est présenté dans les autres chapitres relatifs aux préconisations des travaux de renforcement.



5.1 HYPOTHESES GENERALES

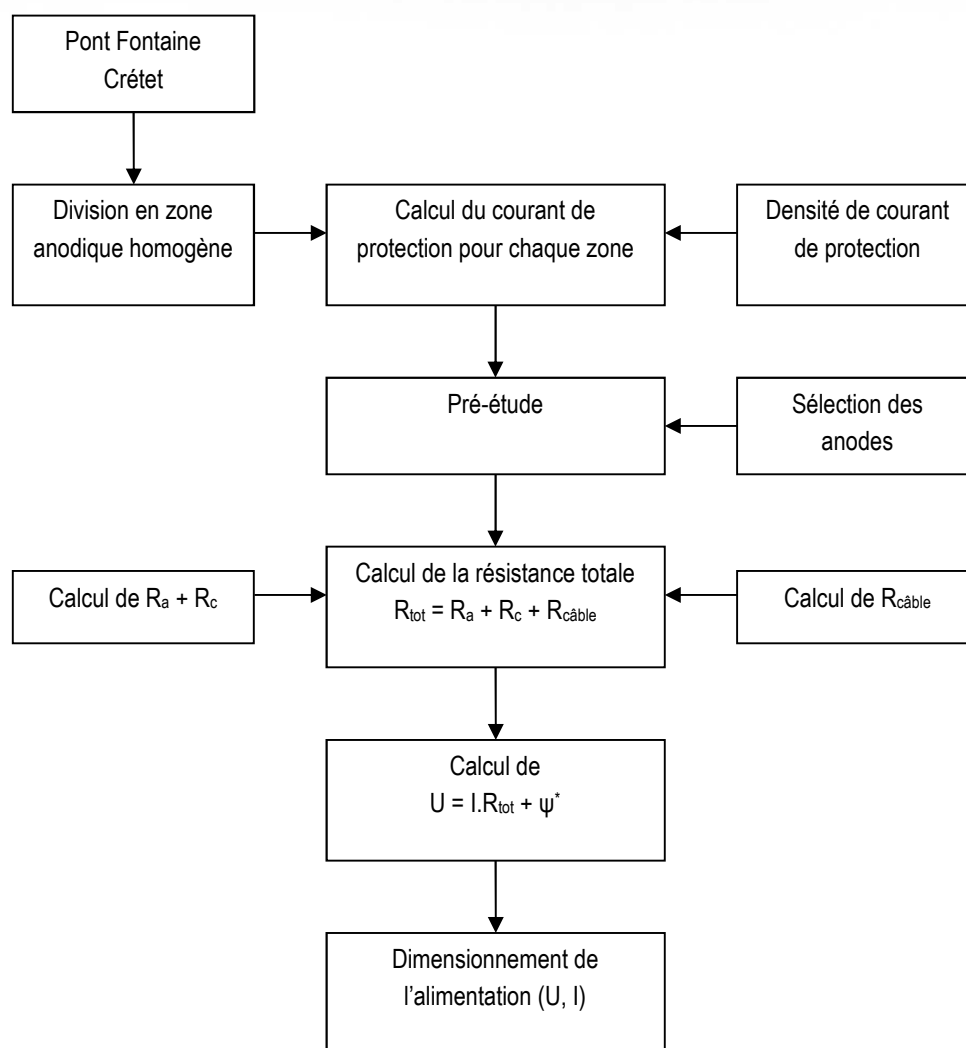
5.1.1 Documents de référence

- **Norme NF EN 12696, Avril 2012 (Protection cathodique de l'acier dans le béton).**
Cette norme spécifie les exigences de performances pour la protection cathodique de l'acier dans le béton exposé à l'atmosphère.
- **Normes NF EN 1504 parties 1 à 10, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité**
Cette série de normes spécifie les exigences de performances pour les travaux de réparation du béton armé.
- **Norme NF A 05 800 de Mars 2006 « Prestations de services en protection cathodique »,**
Cette norme spécifie les engagements des prestataires de services en protection cathodique (y compris de l'acier dans le béton).
- **Norme NF 15 257 de Mars 2007 « Niveaux de compétences et certification du personnel en protection cathodique »,**
Cette norme spécifie entre autre, les compétences et niveaux de certification des personnels impliqués dans les études, et la mise en œuvre d'une protection cathodique de l'acier dans le béton.

5.1.2 Méthodologie de travail

Les études de design suivent le schéma directeur présenté ci-après, l'idée étant de partir de la structure existante et d'intégrer les aciers rajoutés dans le cadre des travaux de renforcement. Compte tenu de l'environnement de l'ouvrage il y a lieu de considérer les sources de pollution comme permanente (sels de déverglaçages et carbonatation atmosphérique des bétons).

Dans le cadre de l'ouvrage du pont Fontaine Crétet, la méthodologie décrite dans les paragraphes suivants est adaptée à un système de protection cathodique par courant imposé.



5.1.3 Protection cathodique des structures existantes

L'intensité de courant appliquée pour une protection cathodique dépend de la résistivité du béton (ohm – cm) cette résistivité n'est jamais connue lors de l'élaboration d'un projet, mais la puissance nécessaire doit être estimée pour déterminer l'installation et ses composants.

La norme **NF EN 12696** fixe les courants de protection cathodique comme pouvant être compris entre 2 et 20mA/m² de cathode d'armature et pouvant atteindre dans certains cas jusqu'à 50mA/m², sans dépasser 110 mA/m² d'anode. Seules pendant la période de rééquilibrage, des densités de fonctionnement allant jusqu'à 220 mA/m² d'anode sont envisageables.

Dans le cas d'un béton contaminé par les ions chlorures, le courant de protection pour le dimensionnement devra dans tous les cas être supérieur à 10mA/m² de cathode.



Il est fréquent que les courants soient proches de la grille proposée ci-dessous :

ρ = résistivité du béton (ouvrages d'exposition atmosphérique)

ρ (k Ω -cm)	> 10	> 5 <10	< 5
mA/m ² d'acier	10	20	30 à 50

La résistivité du béton est liée à la compacité, à l'humidité, et à sa teneur en chlorures. Un béton résistif nécessitera moins de courant qu'un béton peu résistif (il faut compenser les pertes par fuites dans le cas d'un béton très conducteur)

Il est rappelé que le béton de l'ouvrage est soumis aux intempéries et aux sels de déverglaçages.

L'hypothèse, consiste à considérer que le béton d'enrobage non endommagé sera conservé, et donc pouvant contenir une teneur en ions chlorures de l'ordre de 1 à 1.5 % par rapport taux de ciment, couplé avec un phénomène de carbonatation atteignant les armatures les plus proches du parement. **Dans cette hypothèse, il conviendra de retenir comme densité de courant de protection $I_{proj} = 15$ mA/m² d'armature.**

5.1.4 Prévention cathodique des structures neuves

Dans le cas précis de l'ouvrage, ces armatures en rajout seront traitées par le même système de protection cathodique que celui de protection des structures existantes. En conséquence, la prévention cathodique sera calculée avec le même courant projet que celui de la protection cathodique. Cela permettra également d'intégrer un facteur de sécurité.



5.1.5 Problématiques liées au chantier

- Pendant les périodes hivernales, la température de l'ouvrage peut descendre en dessous de 0°C, en conséquence, la surveillance des potentiels peut s'avérer impossible. Il conviendra de prendre en compte ce paramètre pour l'interprétation des mesures.
- La mise en place du système de protection cathodique se fera depuis la sous-face de l'ouvrage. Compte tenu de la présence du ruisseau (La Durance), de la prise en compte des facteurs environnementaux (pollution interdite du ruisseau) et de l'impossibilité de travailler dans l'emprise de la chaussée, les travaux devront être effectués sur échafaudage avec un système de confinement des gravas au niveau du platelage pour une évacuation et mise en décharge.
- Théoriquement, le fait d'imposer du courant par le biais d'une PCCI, recrée des alcalins au droits de aciers (site cathodique), et attirent les chlorures au droit des sites anodiques. Cela peut générer une acidification au niveau des anodes. Les anodes et les mortiers enrobant les anodes devront être choisies pour résister à des expositions sévères aux acides. Dans la note de calcul de design, le concepteur doit, pour éviter ce type de problèmes, envisager un nombre d'anodes suffisant pour que la quantité de courant diffusée par unité soit faible (notion de taux de travail qui correspond au ratio entre la capacité maximale de diffusion de courant des anodes, et la quantité réellement diffusée par unité). Dans le cadre de cette opération et par rapport aux pratiques usuelles, des anodes en titane activé devront être choisies. Elles peuvent se présenter sous la forme d'anodes discrètes, de rubans ou encre de treillis.
- L'ouvrage étant relativement étanche en partie supérieure, les gradients d'humidité relative interne à l'ouvrage sont négligeable compte tenu de l'absence de sites de perforation pour les évacuations des eaux de ruissellement. En conséquence, le risque de courant de fuite est négligeables en partie courante de l'ouvrage et peut être traité par un larmier efficace au niveau des rives amont et aval du tablier.
- A ce jour, l'ouvrage ne supporte pas de moyens de transports électriques sur rails (tramway par exemple), pouvant générer des courants vagabonds. En conséquence, ce risque peut être écarté à ce stade du projet.
- L'ouvrage ne comporte pas de précontrainte. En conséquence, le risque de fragilisation à l'hydrogène des armatures est négligeable et peut être écarté à ce stade du projet.



5.1.6 Epreuve de convenance

Pour la mise en place d'un système tel que décrit ci-avant, il est préférable d'effectuer un essai de convenance sur une zone témoin permettant ainsi de valider toutes les étapes depuis les hypothèses jusqu'à la mise en route et à l'évaluation de sa performance.

Compte tenu de l'exposition de l'ouvrage, il pourrait être nécessaire d'intégrer durant la convenance une étude spécifique de protection céramique.

Cette épreuve de convenance serait à réaliser en phase de préparation de chantier avec un délai d'évaluation d'un mois.

En suivant, cette solution pourrait être alors décrite de façon généralisée lors des travaux.

5.2 PROPOSITION DU SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE

Dans le cadre de la protection des réparations et des parties de la structure de l'ouvrage et à ce stade de l'étude, seule la solution de protection cathodique par courant imposé sera étudiée.

5.2.1 Description des parties de structure à protéger

Les parties qui seront mises sous protection concernent 3 types d'éléments, les poutres, les dalles et la voûte. Pour chacun de ces éléments, il est nécessaire de calculer les surfaces d'acier à protéger. Ces calculs prennent en compte la première nappe ou le premier lit des armatures existantes, ainsi que les armatures de renforcement. Ils sont basés sur les schémas proposés au chapitre 4.2.

5.2.2 Calcul des surfaces d'acier

Pour les poutres, les surfaces d'acier considérées sont celles sur appuis, présentant les plus fortes densités.

Poutres P1 à P4 :

Diamètre acier (mm)	Nbre ml de barres Verticales	Nbre ml de barres Horizontales	Surf. acier développée au ml/m2	S. acier / parement béton de 1 ml de poutre
4			0.013	0.000
6	1.6		0.019	0.030
8		2	0.025	0.050
10	28.61		0.031	0.899
12	23.6		0.038	0.890
14			0.044	0.000
16		4	0.050	0.201
20		15	0.063	0.942
25			0.079	0.000
32		5	0.101	0.503
40			0.126	0.000

m² d e parement considéré	2.13
---------------------------	------

1.650	S. acier / m2 de parement béton
-------	---------------------------------

Dalles :

Au niveau des dalles, leurs ferrailages n'étant pas connus à ce jour, on considère un renforcement à l'aide de 2 nappes de treillis type ST 50C à protéger. Pour les surfaces d'acier existant on prendra comme hypothèses la même surface que celle apportée par les armatures en renforcement, soit l'équivalent de la surface d'acier de 2 nappes de treillis ST 50C. Cette hypothèse est basé sur le fait que la demande en courant des 2 nappes rajoutées est considérée comme négligeable (armatures passivées dans un béton sain).

Diamètre acier (mm)	Nbre ml de barres trame	Nbre ml de barres chaîne	Surf. acier développée au ml/m2	S. acier / m2 de parement béton
4			0.013	0.000
6			0.019	0.000
8	20	20	0.025	1.005
10			0.031	0.000
12			0.038	0.000
14			0.044	0.000
16			0.050	0.000
20			0.063	0.000
25			0.079	0.000
32			0.101	0.000
40			0.126	0.000

1.005



Voute :

Au niveau de la voute, les aciers considérés sont ceux de la partie hors encastrement dans la poutre P5.

Diamètre acier (mm)	Nbre ml de barres Transversales	Nbre ml de barres Longitudinales	Surf. acier développée au ml/m2	S. acier / parement béton de 1 ml de poutre
4			0.013	0.000
6			0.019	0.000
8	10.5		0.025	0.264
10			0.031	0.000
12	10.5		0.038	0.396
14			0.044	0.000
16		16	0.050	0.804
20			0.063	0.000
25			0.079	0.000
32			0.101	0.000
40			0.126	0.000

m² de parement considéré	1
--------------------------	---

1.464	S. acier / m2 de parement béton
-------	---------------------------------

Poutre P5 :

La poutre P5 nécessitant moins d'armatures en renforts et étant en partie intégrée surfaciquement à la voute, il sera pris par hypothèse et pour des questions d'homogénéité la même densité de surface d'acier à protéger que celle de la voûte, à savoir un ration **Sa / Sb = 1.464**.

5.2.3 Calcul des courants de protection

Le courant de protection a été défini dans le chapitre 5.1.3., soit 15 mA/m² pour la protection cathodique par courant imposé.

Elément	Nombre	Surface de parement en m ²	Densité d'armatures Sa/Sb	Demande en courant à Iproj 15 mA/m ²	Densité de courant en mA/m ² de béton
Poutres	4	15.33	1.650	379.5 mA	24.75
Dalles	4	12.99	1.005	195.9 mA	15.08
Voûte	1	26.17	1.464	574.7 mA	21.96

Pour une demande totale en courant de **2.9 Ampères**.

5.2.4 Pré dimensionnement du système anodique

- Solution par PCCI

La protection cathodique par courant imposé est une technique de « protection active » contre la corrosion d'un matériau métallique au contact d'un électrolyte (le 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 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.

Pour cela on fait circuler un courant électrique continu entre une ou des anode(s) rapportées et le matériau à protéger, qui constitue la cathode (armatures de l'ouvrage). L'efficacité de la méthode exige un contact intime de l'électrolyte avec le matériau à protéger en tout point de celui-ci. Le courant, qui circule dans l'électrolyte vers le métal, est ajusté de façon à fournir une densité de courant cathodique permettant d'atteindre une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse de corrosion du métal devient très faible.

La mise en œuvre d'une telle solution pour la protection des armatures existantes devra faire l'objet d'une conception de base qui prendra en compte les points suivants :

- Reprise de l'hypothèse sur le courant de protection



- Prise en compte des quantités d'acier existants à protéger et des armatures de renfort
- Les exigences relatives à la durée de vie

Cette étude, effectuée pour chaque élément type permettra alors la définition des zones de protection cathodique, étant convenu que la distribution des anodes pourra permettre la protection des zones de ferrailage plus dense.

Généralement, ces zones sont définies au maximum pour des surfaces homogènes à des superficies de l'ordre de 500 m² maximum ou pour des courants assignés allant de 0.5 A à 2 A.

En fonction de l'étendue des réparations choisies, cela pourra conduire à la mise en place de contrôleurs secondaires. Le contrôleur principal pouvant recevoir environ 5 contrôleurs secondaires. Ces dispositifs devront être mis en place dans des armoires dont il y aura lieu de prévoir leur emplacement en fonction de la configuration du site et des solutions retenues.

Les systèmes de protection cathodiques par courant imposé qui seraient mis en place sur cet ouvrage nécessiteraient un monitoring régulier et fiable du système. En effet cela permettra de vérifier si les critères de fonctionnement seront atteints et de se prémunir d'une sur polarisation. Cela se traduit par la mise en place de multiples électrodes de référence, avec des coupons titane et métalliques reliés à des centrales d'acquisition en continu avec des critères d'alarme.

Dans le cas précis de l'ouvrage, les densités d'armature en partie inférieures de poutres sont très dense et oriente le choix des anodes. Il sera donc préféré des anodes surfaciques (rubans ou treillis), permettant d'éviter les courts-circuits entre l'anode et la cathode.

5.2.1 Durée de vie et caractéristique du système anodique

Pour l'ensemble des anodes du projet, il sera retenu des anodes en titane activé de type (Ti/MMO) avec de durée de vie minimales de 50 ans.

Par rapport aux problématiques d'acidification à l'anode, il sera privilégié une répartition anodique plus dense. Le dimensionnement est effectué sur la base d'anodes ruban de 15 mm de largeur avec les caractéristiques suivantes :



LIDA® GRID
ACTIVATED TITANIUM EXPANDED MESH RIBBON FOR CATHODIC PROTECTION
OF STEEL IN CONCRETE

MATERIAL SPECIFICATIONS			
MESH RIBBON 15 mm width		Unit	
Current Rating at 110 mA/m ²		mA/m	3,97
Dimensions	Width	mm	15 ± 0,5
	Thickness	mm	0,9 ± 0,1
	Unit Lengths	m	26 + 0,3/ -0
Weight (Approx) per roll of 26 m		g/roll	554 ± 10 %
Electrical resistance		Ohm/m	0,33
Expected design life		Years	100
ANODE CONCRETE INTERFACE			
MAXIMUM CURRENT DENSITY			
FHWA limit		mA/m ²	110
Short Term limit		mA/m ²	220
SUBSTRATE COMPOSITION		ASTM 265 Titanium Grade 1	
CATALYST		Noble Mixed Metal Oxide	
CURRENT DISTRIBUTOR			
Width		mm	15
Thickness		mm	1
Weight		g/m	68
Electrical resistance		Ohm/m	0,04

The values reported in the material specifications are nominal.

Milan December, 2012

All information, recommendations and suggestions in this brochure concerning the use of products are based upon tests and data believed to be reliable. Since the actual use by others is beyond control of Industrie De Nora S.p.A no guarantee, expressed or implied, is made by Industrie De Nora S.p.A as to the effect of such use or the results to be obtained, nor does Industrie De Nora S.p.A assume any liability arising out of use by others of the products referred to herein. Nor is the information herein to be construed as absolutely complete since additional information may be necessary or desirable when particular or exceptional conditions or circumstances exist or because of applicable laws or government regulations. Nothing herein contained is to be construed as permission or as a recommendation to infringe any patent.

Via Ristolfi, 35 - 20134 Milano Italia
Tel: 39.02.21251 - Fax: 39.02.21252425
industriedenora@denora.it - www.denora.com

CAP 502 - 61505126 (a) res. n° 11/1000 - C.F. 01984110150

La densité de courant linéique pour ce type d'anodes est $I_a = 3.97 \text{ mA/ml}$

Le tableau ci-dessous indique le nombre d'anodes ruban à positionner par élément, avec leurs espacements.

Elément	Nombre	Surface de parement en m^2	Densité de courant en mA/m^2 de béton	Nombre de ruban de 15 mm	Espacement des rubans de 15 mm
Poutres P1 à P4	4	15.33	24.75	14	15 cm
Dalles	4	12.99	15.08	10	20 cm
Voûte + poutre P5	1	26.17	21.96	Poutre 14 Voûte 16	15 cm

5.2.1 Bilan de puissance

Elément	Nombre	Surface de parement en m^2	Demande en courant par élément	Demande en courant total	Demande totale
Poutres P1 à P4	4	15.33	379.5 mA	1518 mA	2.88 A
Dalles	4	12.99	195.9 mA	784 mA	
Voûte + poutre P5	1	26.17	574.7 mA	575 mA	

Soit un total de 2.88 A arrondi à 3 A.

Selon la norme EN 12 696 :2012, chaque zone typique pour la PCCI ont des courant assignés pouvant atteindre 2 A. Cela conduit à définir 3 stations de répartition qui seront positionnées dans une armoire électrique à proximité de l'ouvrage.

Chaque station de répartition alimentera donc les différents types d'éléments, qui pourront être regroupées en fonction des niveaux d'exposition et de la façon suivante :

- Station de répartition n°1 : Poutres P1, P5 et Voûte 955 mA
- Station de répartition n°2 : Dalles 784 mA
- Station de répartition n°3 : Poutres P2, P3 et P4 1140 mA

Les connexions des entre les stations de répartition et les zones de protection seront assuré par 2 types de câble :

- câble monofilaire **rouge** cuivre rigide XLPE/XLPE 1 x 2.5mm²
avec $R = 7.41 \times 10^{-3} \Omega/m$
- câble monofilaire noir cuivre rigide XLPE/XLPE 1 x 2.5mm²
avec $R = 7.41 \times 10^{-3} \Omega/m$

Dans un premier temps, il sera considéré une longueur de 40 ml entre les stations de répartition et les zones de protection cathodique.

Sur chaque site, il sera également mis en place des bandes conductrices en titane pour la diffusion du courant dans les rubans anodiques, avec une résistance linéique de 0.11 Ω/m pour une longueur maximale de 1.90 m, on obtient une résistance de 0.21 Ω .

En considérant la zone la plus éloignée, on obtient :

$$R_{\text{câbles positifs}} = 40 \times 7.41 \times 10^{-3} = 0.3 \Omega$$

$$R_{\text{câbles négatifs}} = 40 \times 7.41 \times 10^{-3} = 0.3 \Omega$$

En considérant le cas le plus défavorable pour un générateur, correspondant à une résistance du béton nulle, il convient de vérifier conformément à la norme EN 12 696 : 2012 que la densité de courant anodique en tout point doit être uniforme à 10% près.

Les résistances cumulées des câbles d'alimentation ne permettant pas de respecter cette uniformité de distribution de courant, il conviendra si nécessaire de positionner avant chaque système anodique une résistance talon (habituellement 200 à 300 Ω).

Le schéma électrique du circuit anodique fait fonctionner les anodes en parallèle les unes des autres, la formule pour le calcul de la résistance équivalent de circuit d'anode par zone sera donc $1/R_{eq} = N_{anode} \times 1/R_{anode}$.

Pour ce calcul il sera pris en compte la plus grande longueur de ruban, soit 10 ml pour 12 rubans.

$$R_{anode} = 300 + 0.43 \times 10 = 304.30 \Omega$$

$$\text{Soit } R_{eq \max} = 25.36 \Omega$$

Soit une résistance anodique maximale de $R_{\text{anodique}} = 25.36 \, \Omega$

Compte tenu que les systèmes anodique vont travailler en parallèle, nous considérons une chute de tension de :

$$R_{\text{Total}} = \sum R_{\text{cables}} + R_{\text{anodique}}$$

$$\text{Soit un } R_{\text{Total}} = 0.3 + 0.3 + 0.21 + 25.36 = 26.2 \, \Omega$$

Le courant anodique maximal pris en compte dans le cadre de ce dimensionnement est de 1518 mA / 14 ruban et majoré de 10 %, soit I_{anode} pour une anode ruban = 120 mA.

$$\text{D'où : } U_{\text{perte max}} = 26.2 \, \Omega \times 120 \, \text{mA} = 4.15 \, \text{Volts}$$

A cela il convient de rajouter une force contre électromotrice ψ^* de 2 Volts

Soit un dimensionnement de : $(U_{\text{perte}} + \psi^*) \sim 7 \, \text{Volts}$ et $I_{\text{station}} = 2 \, \text{A}$ par station de répartition

Donc, nous retiendrons 3 stations de répartition nécessitant 7 V et 2 A pour l'ensemble des de l'ouvrage.

Le poste de soutirage doit être dimensionné en tenant compte de l'impédance totale de l'installation (perte de tension des conducteurs et résistance intrinsèque du système)

On intégrera donc dans le calcul :

- la longueur, la section et le type de câbles pour l'alimentation,
- l'impédance des anodes,
- le rendement du transformateur redresseur.

Un coefficient de service est également pris en compte pour tenir compte de la perte d'efficienc au fur et à mesure du vieillissement des installations.

Pour le dimensionnement des matériels, nous retiendrons les hypothèses suivantes :

Rendement de la station de soutirage :

Estimé pour tous types de transformateur $K = 0.9$

Coefficient de service :

Le taux de travail du transformateur est estimé à 80% $K_1 = 1.2$

Calcul de la puissance d'installation requise :

Sur ce chantier le transformateur redresseur sera un appareil de 150 Watt.

5.2.1 Système de mesure

Afin de s'assurer du bon fonctionnement du système, il sera nécessaire de positionner les Eref contre les aciers d'origine. Ce dispositif permettra de valider la capacité des anodes à polariser les aciers tout en ayant un niveau de polarisation acceptable par rapport au fonctionnement des anodes.

Le mesurage s'effectue à l'aide d'électrodes de référence Manganèse/dioxyde de Manganèse (Mn/MnO₂) et de sondes de dépolarisation en titane activé installées par paire.

Les électrodes et les sondes seront installées par paire, afin de minimiser les travaux de maintenance dans le long terme (remplacement des électrodes). Les électrodes à base de manganèse (Mn/MnO₂) peuvent cesser d'être opérationnelles, de façon satisfaisante, après environ 15-20 ans mais les sondes adjacentes de décroissance de potentiel Ti /MMO (comme dans EN 12696 Clause 6.3.3.1) doivent prendre leur fonction pour la période restante au-delà de 50 ans. Il sera prévu 8 électrodes Mn/MnO₂ et 12 sondes de dépolarisation distribuées en différents points de l'ouvrage.



6 PROPOSITIONS DE TRAVAUX

Les travaux ont pour objet de stopper l'évolution de la corrosion au niveau du béton armé ainsi que de remettre en état la structure par ajout d'armature, de façon à répondre au cas de charge demandé.

Des réparations ponctuelles et traditionnelles avec un piquage des aciers, un détournage et une protection des armatures à l'aide d'un produit ne sont pas suffisantes sans reprise de l'étanchéité générale du tablier pour éviter la propagation de la corrosion et peuvent également induire un phénomène de pile induite, pouvant encore accélérer le processus de dégradation.

De façon générale, les types de travaux retenus par le MOA sont les suivants :

- Purge de tout le béton non adhérent,
- Rajout d'armatures longitudinales (si perte de section trop importante) et transversales à proximité des appuis (fissures à 45°),
- Reprise des zones de béton détruites,
- Reconstitution des enrobages,
- Mise en place d'un système de protection électrochimique

Le système de protection électrochimique envisagé permet de garantir la durabilité de l'ouvrage et des réparations vis-à-vis de la corrosion des armatures du béton. Afin de s'affranchir des venues d'eau et du drainage des ions chlorures, la reprise de l'étanchéité générale doit être envisagée. Hors cet ouvrage est sur un axe stratégique qui assure à la fois la desserte des Alpes et la desserte vers l'Italie par le col du Montgenèvre. Il n'est donc pas possible et inenvisageable de prévoir un alternat ou une coupure partielle en raison d'une impossibilité à assurer la giration des Poids Lourds ou des Bus. Raisons pour lesquelles la protection électrochimique est envisagée.

6.1 TRAVAUX PREPARATOIRE

Avant le démarrage des travaux de réparation de l'ouvrage, l'entreprise devra réaliser les notes techniques de dimensionnement ainsi que les plans d'exécutions.

Ensuite l'entreprise devra installer un platelage de travail en sous-face de l'ouvrage avec un cheminement depuis les zones de stockage et d'installation de chantier. Le platelage devra également

servir de support au système de confinement des gravas issus du chantier afin de ne pas polluer le ruisseau franchit.

6.2 ETAIEMENT PROVISOIRE

La consistance des travaux retenus prévoient la purge de tous les bétons non adhérents en sous-face de l'ouvrage avant la mise en œuvre des renforcements. D'autre part, selon les décisions de la maîtrise d'ouvrage, une restriction de la circulation n'est pas envisageable. En conséquence, l'ouvrage non renforcé et purgé sera soumis pendant une période aux charges permanentes et d'exploitation. Cette phase est la plus critique d'un point de vue mécanique et du point de vue des travaux de renforcement.

Il est donc nécessaire de prévoir pendant cette phase un étalement provisoire permettant la reprise d'une partie des charges. Cet état sera modélisé et calculé pour permettre le dimensionnement des renforcements provisoires par étalement.

Le choix du principe d'étalement est de la responsabilité de l'entreprise adjudicatrice. Cette solution devra être justifiée et contrôlée.

6.3 PURGE DES BETONS NON ADHERENTS

Les bétons de surface de l'ouvrage existant sont soumis à la fois aux agressions extérieures, principalement les effets du gel, mais également aux pressions internes de poussée liées à l'expansion du volume des armatures par phénomène de corrosion. En conséquence, il y aura lieu de prévoir une purge des bétons.

Dans un premier temps, cette purge consistera à enlever le béton projeté sur le Nerlat, puis par procédé mécanique de purger les bétons non adhérents. Le niveau de purge (profondeur) sera fonction de la solution de protection choisie. En effet si la protection PCCI est retenue, la purge sera limitée aux bétons non adhérents. A l'inverse si la solution retenue est la protection PCCG, la purge devra être réalisée sur une profondeur de 4 à 5 cm.

Une fois les purges de béton réalisées, la préparation des armatures existantes ainsi que la surface du béton devra être réalisée par un procédé de type sablage.

6.4 TRAVAUX DE RENFORCEMENT MECANIQUES

Les renforcements des éléments structurels seront effectués conformément aux résultats des calculs effectués selon les hypothèses de cas de charge retenues. Cela peut donner lieu au dimensionnement réalisé au chapitre 4.

Une attention particulière devra être portée sur la vérification ou la création de la continuité électrique des armatures existantes et des armatures rajoutées.

6.5 LA PROTECTION ELECTROCHIMIQUE

6.5.1 Solution PCCI

Cette solution nécessite un branchement permanent sur le réseau électrique. Lors de notre visite du site, nous avons relevé la présence d'un réseau électrique d'alimentation des panneaux de coupure de la circulation (de part et d'autre de l'ouvrage) en provenance depuis le poste de transformation électrique en amont. Ce réseau chemine à l'intérieur de fourreaux dont un regard est situé à proximité immédiate de l'ouvrage.



Panneau de coupure



Poste de transformation



Réseau cheminant sur l'ouvrage

Cependant, l'autorisation d'utilisation de ce réseau électrique pour la PCCI devra être validée par le Maître d'Ouvrage.

La description des travaux de réparation peut être la suivante, et conformes à la norme NF EN 12 696 :

- Elimination des oxydes, vérification et mise en continuité des armatures, connexion des « négatives », et des systèmes de contrôle,
- Positionnement et câblage des anodes surfaciques,

- Vérification de l'absence de court-circuit entre les systèmes anodiques et cathodiques,
- Création d'une armoire électrique à proximité de l'ouvrage, création de l'alimentation électrique depuis les regards d'alimentation des panneaux de signalisation électriques. Mise en place du transformateur redresseur, des éventuelles sous-stations et des automates de contrôle et de réglage. Cette armoire pourrait être mise en place sur le parement du mur de soutènement.
- Raccordement électriques des circuits anodiques et cathodiques
- Reconstitution des enrobages à l'aide d'un béton projeté par voie sèche.

Cette solution technique permet donc de garantir des réparations pour une pérennité calculée de 50 ans.

Selon une première approche, il sera nécessaire d'utiliser 3 sous stations de 50 Watt environ, soit une puissance totale du poste de soutirage de 150 Watt.

La solution PCCI nécessite également un suivi pour la mise en fonctionnement du système, dont les réglages doivent être affinés sur une période de 1 an. Par la suite et durant toute la durée de vie du système, un suivi annuel avec un recalage éventuel est à prévoir.

6.5.2 Définition du matériel à mettre en œuvre

Par définition un système de protection cathodique par courant imposé (PCCI) comporte les éléments suivant :

- 1 transformateur redresseur automatisé (transforme et redresse le courant alternatif 230 volts AC en courant continu 48 Volts DC pour alimenter les sous stations) qui fournit le courant nécessaire à la protection des armatures, ce matériel doit être conditionné dans des armoires IP66, afin de s'adapter à l'ambiance particulière liée à l'exposition du site.
- Un circuit anodique relié au redresseur diffuse le courant de protection dans le béton (avec des câbles en cuivre revêtu XLPE/XLPE connectés au système anodique et ramenés au pôle positif de l'alimentation électrique/redresseur).
- Des câbles de cuivre revêtu XLPE/XLPE connectés aux armatures et ramenés au pôle négatif de l'alimentation électrique/redresseur.
- Des électrodes de référence installées dans les zones de réparation avec leurs câbles XLPE/XLPE ramenés à la centrale de mesure. Ces électrodes permettent de mesurer le potentiel électrochimique des aciers et de vérifier les niveaux de protection appliquée (monitoring).



Après la purge du béton existant, la préparation des aciers, le contrôle de continuité, les connexions électriques sur les armatures, les ragréages nécessaires, les anodes seront installées directement sur une première couche de béton projeté de l'ordre de 2 cm.

Une fois le système anodique mis en place avec les autres éléments tels que les câbles connexion aux aciers et pose des sondes de monitoring une deuxième couche de béton sera projeté d'au minimum afin d'achever le renforcement préalable à la pose du nouveau système d'étanchéité.

6.5.3 Alimentation électrique

Par principe, un système par courant imposé nécessite une alimentation électrique en courant alternatif (230 VAC) pour faire fonctionner le redresseur de protection cathodique.

L'armoire principale sera installée au niveau de la culée amont. A ce stade de l'étude l'emplacement exact de cette armoire n'a pas été définie avec précision.

Les demandes de raccordement électrique et les travaux associés sont à la charge du maître d'ouvrage. Un disjoncteur différentiel de courbe D devra être mis en place au niveau du poste de transformation. Prévoir un départ 220VAC – 16A.

L'entreprise retenue fournira une armoire maîtresse contenant la centrale d'acquisition de mesure.

Cette centrale recevra les informations provenant des systèmes de protection cathodique par courant imposé. Il sera capable de piloter à distance ces systèmes (commande et réglage) et sera connectable sur une liaison GSM pour une consultation à distance. Il est à noter que la consommation électrique du système proposé est de l'ordre de 150 W maximum (centrale 150W, redresseurs 50W max).

6.5.4 Monitoring et mise en service

L'armoire contrôleur maître de protection cathodique comprendra un système de télésurveillance (monitoring) permettant de contrôler le courant et effectuer les tests de fonctionnement à distance.

Après la mise en service du système la norme en vigueur (EN 12696) impose à minima un contrôle annuel des installations. Une inspection visuelle annuelle et les évaluations à distance du bon fonctionnement en fonction des critères de L'EN 12696 (dépolérisation) pourront être réalisées.

L'entreprise adjudicatrice devra prévoir dans son offre le suivi pour la première année de fonctionnement par un personnel certifié niveau 2 secteur béton en protection cathodique, suivant la norme EN 15-257. Ce suivi de la première année nécessitera un minimum de 4 visites trimestrielles.

6.6 BETON PROJETE PAR VOIE SECHE

Le béton mis en œuvre devra être conforme à la norme NF EN 206/CN et de classe **C 35/45 XD3**.

Il devra être appliqué sur un béton support préalablement sablé, conformément à la norme NF P 95-102 et aux recommandations ASQUAPRO.

La mise en œuvre devra permettre d'obtenir en tous point une épaisseur d'enrobage des armatures de 5 cm.

6.7 TRAVAUX DE REPRISE DES LAMIERS

Dans le cadre des travaux de réparation de l'ouvrage, la Maîtrise d'ouvrage n'a pas choisi d'effectuer la réfection de l'étanchéité du tablier. Cependant les extrémités amont et aval du tablier sont fortement endommagées par les actions du gel et autres. Les travaux de réparation précédemment décrits intègrent la réfection de ces zones.

Les adaptations proposées consistent à réaliser un larmier en protection de ces abouts de tablier par la mise en œuvre d'une cornière en tôle de cuivre prenant naissance sous l'étanchéité existante et retombant 2 à 3 cm plus bas que l'arase inférieure de dalle. Cette tôle sera fixée mécaniquement directement dans le tablier sur les surfaces horizontales et verticales. Un calfeutrement à l'aide d'un produit bitumineux sera indispensable à l'interface entre le béton et la tôle, afin de ne pas laisser la possibilité à l'eau de s'infiltrer.

Les parties horizontales seront alors protégées par une couche d'enrobé ou de béton.

7 ESTIMATIF DU COÛT DES TRAVAUX

Le tableau ci-dessous présente l'estimation des travaux de réparation de l'ouvrage avec la mise en place d'un système de protection cathodique par courant imposé.

ESTIMATION PROJET Solution Réparation structurelle et PCCI					
Articles	Désignation des ouvrages	Unités	Quantités	Prix unitaires	Produits
1	Installation de chantier	ens	1	12 000.00	12 000.00
2	Etudes d'exécution	ft	1	8 500.00	8 500.00
3	Mise en place des moyens d'accès				
	- Echafaudages	m'	140	45.00	6 300.00
	- Dispositifs anti-pollution du ruisseau	ft	1	3 500.00	3 500.00
4	Purge des zones à traiter				
	- Purge du béton projeté sur Nerlat	m'	160	75.00	12 000.00
	- Purge des bétons non adhérents et évacuation	m'	180	112.00	20 160.00
	- Etalement provisoire	ft	1	17 640.00	17 640.00
	- Préparation surfacique des bétons (sablage)	m'	180	79.00	14 220.00
5	Réparations structurelles				
	- Préparation et repositionnement des armatures existantes	ft	1	12 000.00	12 000.00
	- Rajout d'armatures en renforts, y compris façonnage, pose, scellements chimiques et réalisation des continuités électriques	m'	180	165.00	29 700.00
6	Traitement des armatures du béton par PCCI				
	- Création d'une armoire électrique sur socle et raccordement	ft	1	5 500.00	5 500.00
	- Fourniture et mise en place des bandes de treillis titane	ml	304	58.00	52 432.00
	- Fourniture et mise en place des électrodes de référence Mn/MnO2	u	8	338.00	2 704.00
	- Fourniture et mise en place des sondes de référence en titane activé	u	12	149.00	1 788.00
	- Fourniture et mise en place du réseau de distribution du courant électrique	ft	1	6 700.00	6 700.00
	- Fourniture et mise en place station de puissance principale	u	1	7 500.00	7 500.00
	- Fourniture et mise en place sous station de répartition et de mesure	u	3	2 600.00	7 800.00
	- Réalisation des essais, réception et réglages de l'installation et suivi du fonctionnement pendant l'année de Garantie de Parfait Achèvement	ft	1	10 400.00	10 400.00
7	Réfection des parements				
	- Réfection locale d'enrobage ou points singulier au mortier	ft	1	15 600.00	15 600.00
	- Réalisation d'un béton projeté par voie sèche	m'	180	695.00	125 100.00
8	Travaux annexes				
	- Reprise des larmiers en périphérie des dalles	ml	20	210.00	4 200.00
9	Aléas	‰	5	18 787.00	18 787.00
Montant total HT :					334 531.00

Ce chiffrage prend en compte le suivi et le réglage de la PCCI sur la durée de 1 an. Par contre il y a lieu de budgéter une prestation annuelle de suivi et d'un éventuel recalage pour la durée de vie demandée. Ces contrats peuvent être effectués par d'autres prestataires que l'entreprise et sont généralement chiffrés à 4000 € HT par tranche de 5 ans.