



UNE EXPERTISE QUI FAIT LA DIFFÉRENCE

SEPTEMBRE 2015

Dossier : CNI7.F.296

DIR Méditerranée

MAITRISE D'ŒUVRE RELATIVE A LA REPARATION DU PONT

PHASE AVANT-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 AVANT-PROJET

Dossier : CNI7.F.296			Rapport : 01			Contrat : CNI7.F.0182	
Indice	Date	Chargé d'affaire	Visa	Vérifié par	Visa	Contenu	Observations
A	04/09/15	Frédéric GERENTE		Guillaume GASQ		40 pages	
B	23/09/15	Frédéric GERENTE		Guillaume GASQ		42 pages	
C	19/11/15	Frédéric GERENTE		Guillaume GASQ		43 pages	

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	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
4	PARTIE REPARATION STRUCTURELLE DES PARTIES DE L'OUVRAGE	12
4.1	HYPOTHESES DE CALCUL RETENUES	12
4.2	MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'OUVRAGE EXISTANT.....	16
4.3	PRE DIMENSIONNEMENT DES REPARATIONS.....	19
5	PARTIE PROTECTION DES OUVRAGES.....	23
5.1	HYPOTHESES GENERALES	23
5.1.1	Documents de référence.....	23
5.1.2	Courant de protection : Hypothèses de travail	24
5.1.3	Protection cathodique des structures existantes.....	25
5.1.4	Prévention cathodique des structures neuves	27
5.1.5	Problématiques liées au chantier.....	28
5.1.6	Epreuve de convenance	29
5.2	PROPOSITION DE SYSTEMES DE PROTECTION CATHODIQUE.....	30
5.2.1	Description des parties de structure à protéger	30
5.2.2	Calcul des surfaces d'acier.....	30
5.2.3	Calcul des courants de protection.....	32
5.2.4	Pré dimensionnement de différents systèmes anodiques.....	33

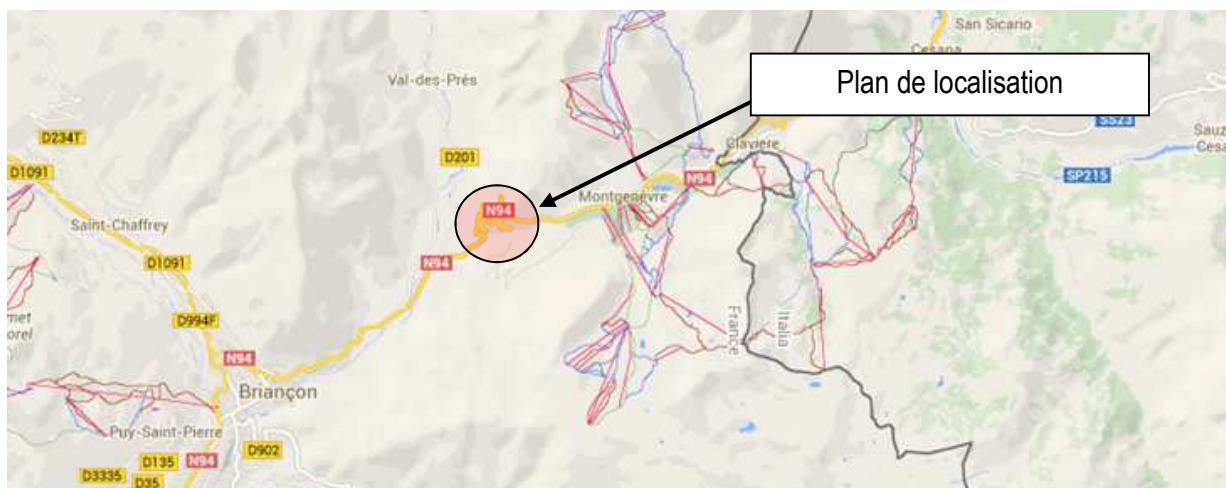


6	PROPOSITIONS DE TRAVAUX	36
6.1	TRAVAUX PREPARATOIRE	36
6.2	PURGE DES BETONS NON ADHERENTS	37
6.3	TRAVAUX DE RENFORCEMENT MECANIQUES	37
6.4	LA PROTECTION ELECTROCHIMIQUE	38
6.4.1	Solution PCCG	38
6.4.2	Solution PCCI	39
6.5	BETON PROJETE PAR VOIE SECHE	40
7	ESTIMATIF DU COÛT DES TRAVAUX	41
7.1	SOLUTION REPARATION ET PROTECTION PCCG	41
7.2	SOLUTION REPARATION ET PROTECTION PCCI	42
8	SYNTHESE DES SOLUTIONS	43

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 :

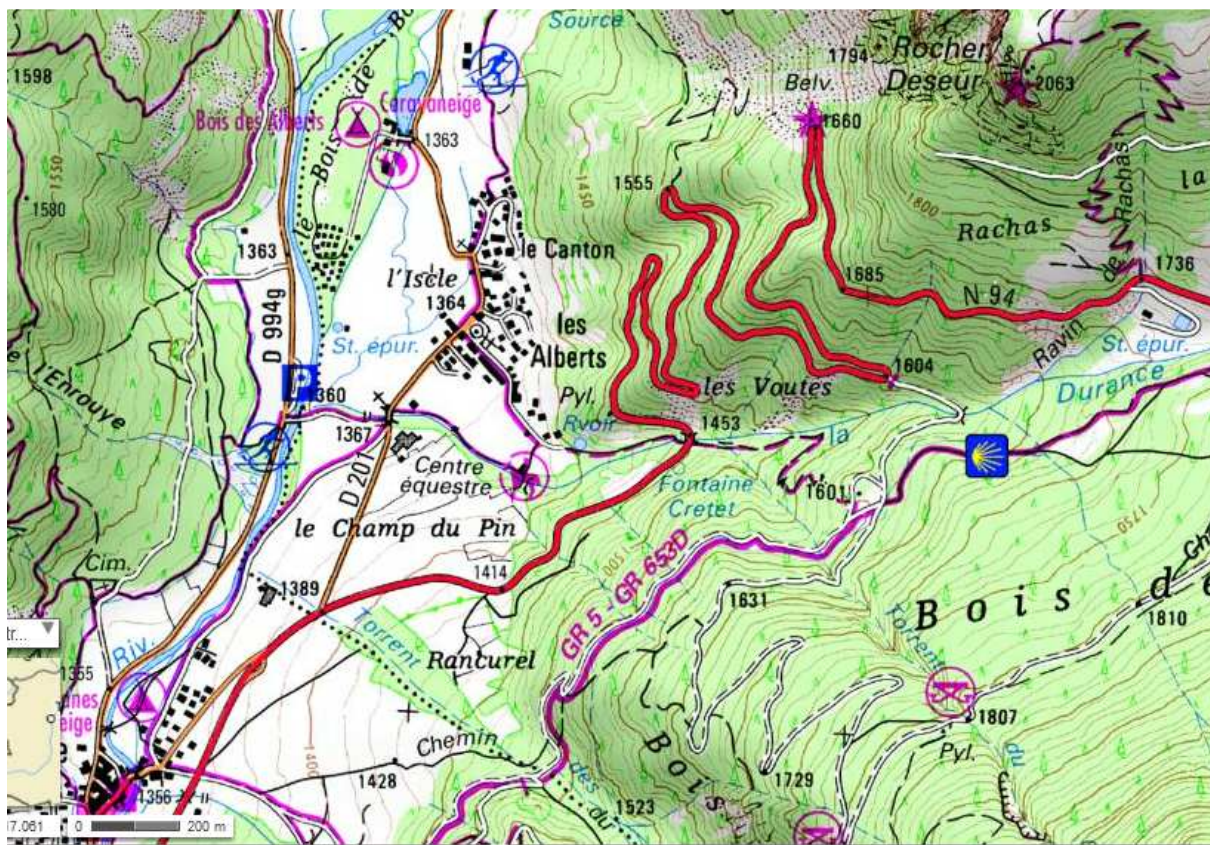




Le plan de situation au 1/100 000 ème en milieu interurbain est donné ci-dessous :



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 d'Avant-Projet.



3 RAPPEL DU CONTEXTE DE LA MISSION

3.1 RESULTATS DE LA MISSION DE DIAGNOSTIC

La mission de diagnostic précédemment effectuée apporte 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 dépasseivation. 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 de la poutre 5. 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 d'une zone d'enrobage des armatures en place, de remplacement des armatures sectionnées, 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

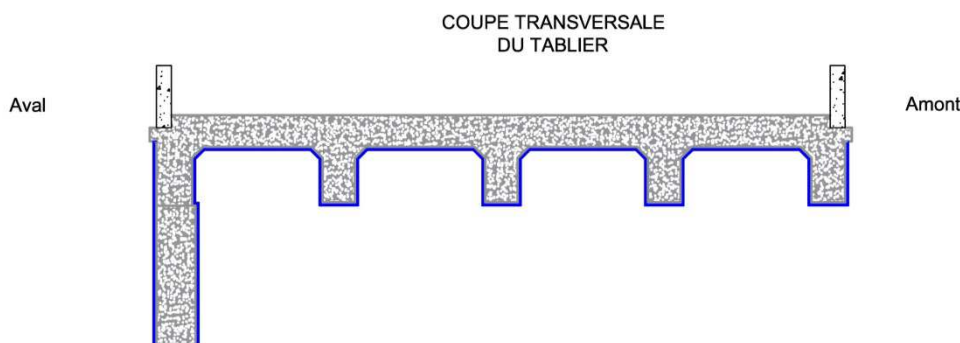
La réparation de cet ouvrage sera abordée sous deux aspects, le premier concernant les hypothèses de calcul vis-à-vis de la stabilité mécanique de l'ouvrage existant ; le second concernant la durabilité des réparations et des parties d'ouvrage dans le scope des études, par rapport à l'environnement.

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).

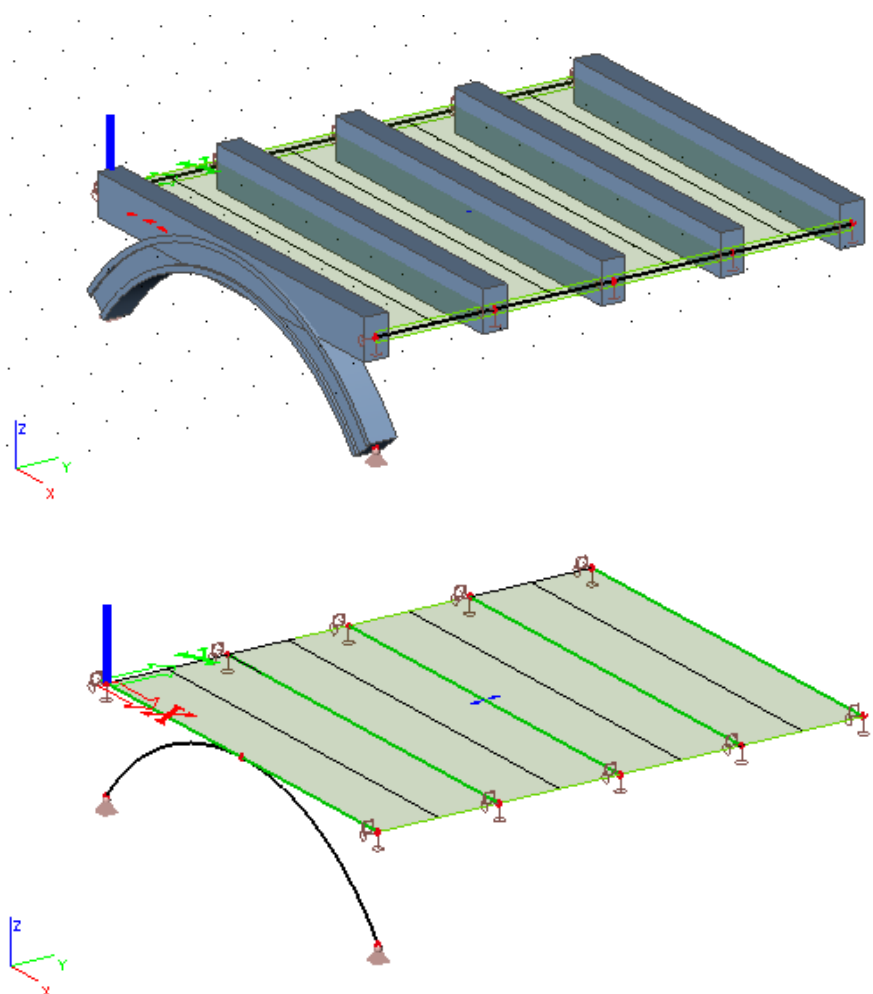
Concernant la durabilité des réparations et des parties traitées, les solutions proposées dans le présent avant-projet seront calculées pour des durées de vie supérieures à 20 ans.

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

4 PARTIE REPARATION STRUCTURELLE DES PARTIES DE L'OUVRAGE

4.1 HYPOTHESES DE CALCUL RETENUES

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.



Modélisation géométrique

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.

Ce dernier point a été confirmé lors de nos investigations complémentaires sur l'ouvrage en accord avec la DIRMED en date du 4 novembre 2015.

Sur la photo ci-dessous sont implantées les différentes zones d'auscultation pachométriques :

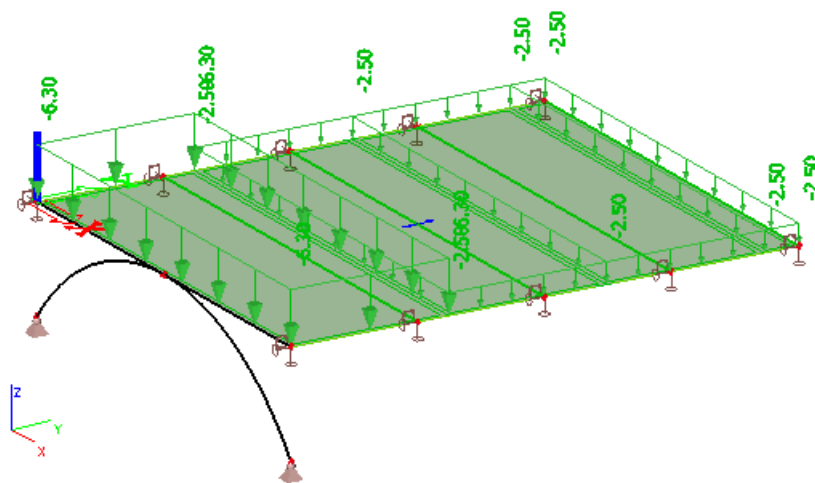


Les feuilles Feroscan dépouillées montrent l'imbrication des aciers de la voûte dans le ferrailage de la poutre.

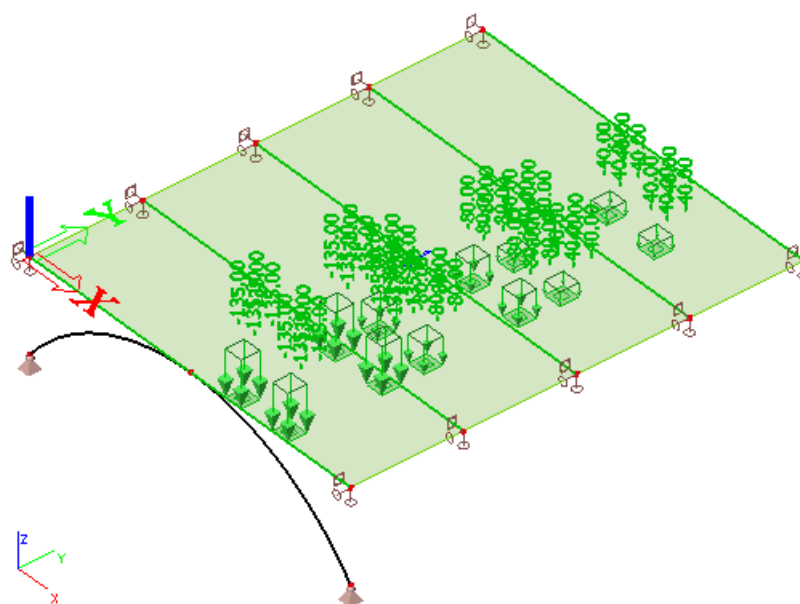


Simulation des différents cas de charge :

- Eurocode EC1

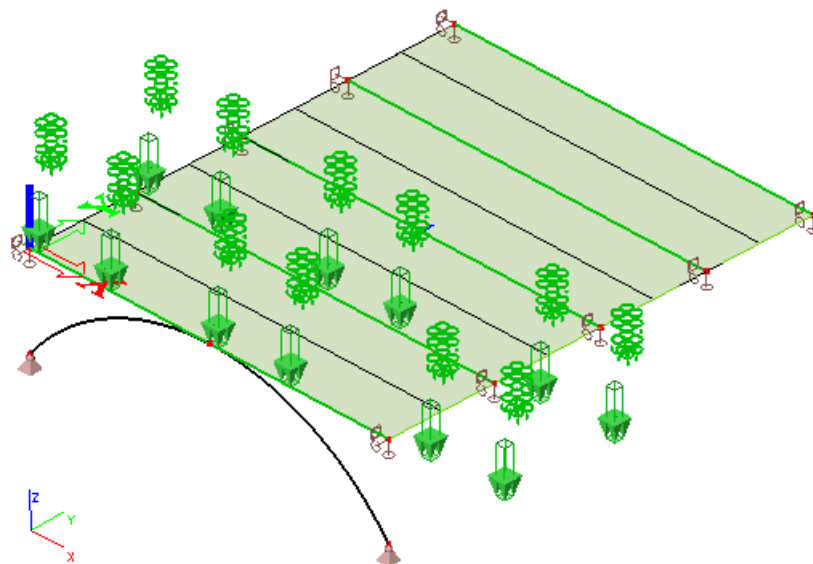


UDL Eurocode EC 1

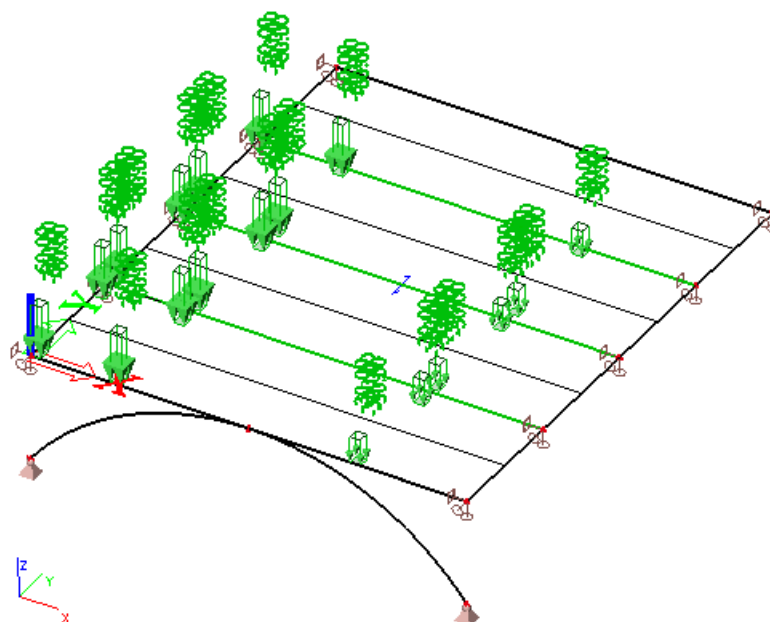


TS Eurocode EC1

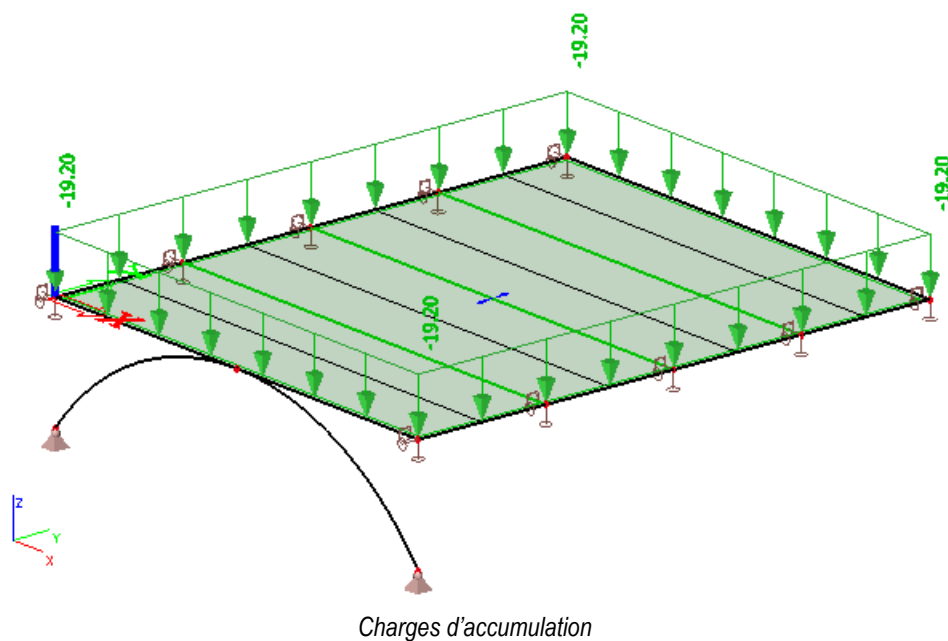
- Grue mobile 72 tonnes



- Fascicule 61 Titre II



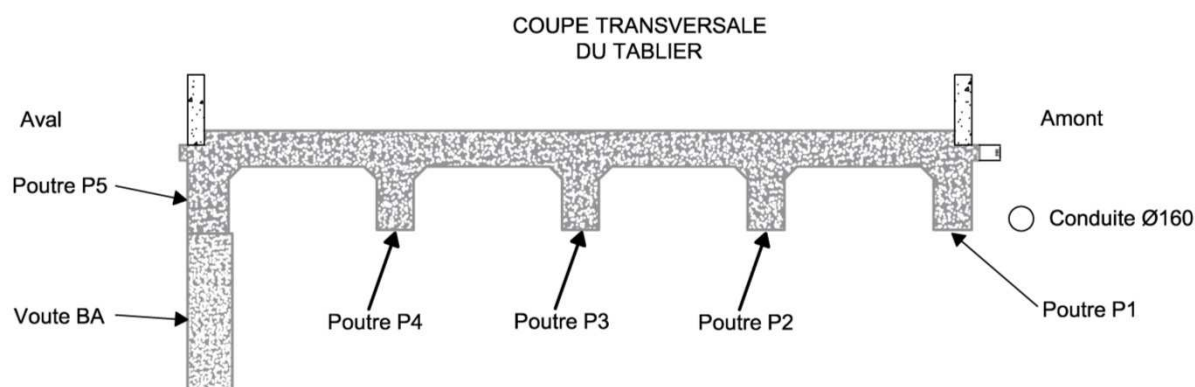
Convoi BC



Les résultats montrent que le cas de charge le plus défavorable pour 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/m^2 .

4.2 MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DE L'OUVRAGE EXISTANT

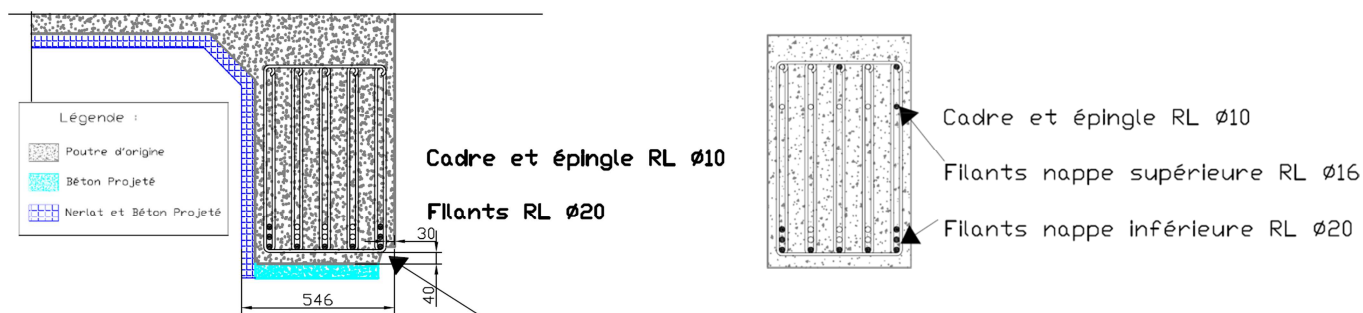
La coupe transversale du tablier permet de repérer les poutres selon la dénomination suivante :



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.

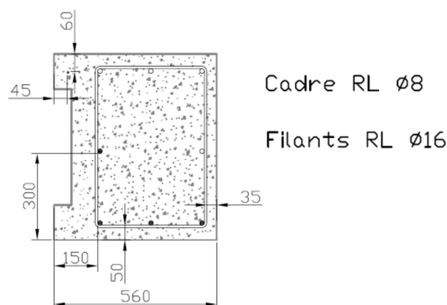
- Ferrailage des éléments pris en compte :

Poutres :



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

Voûte :



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

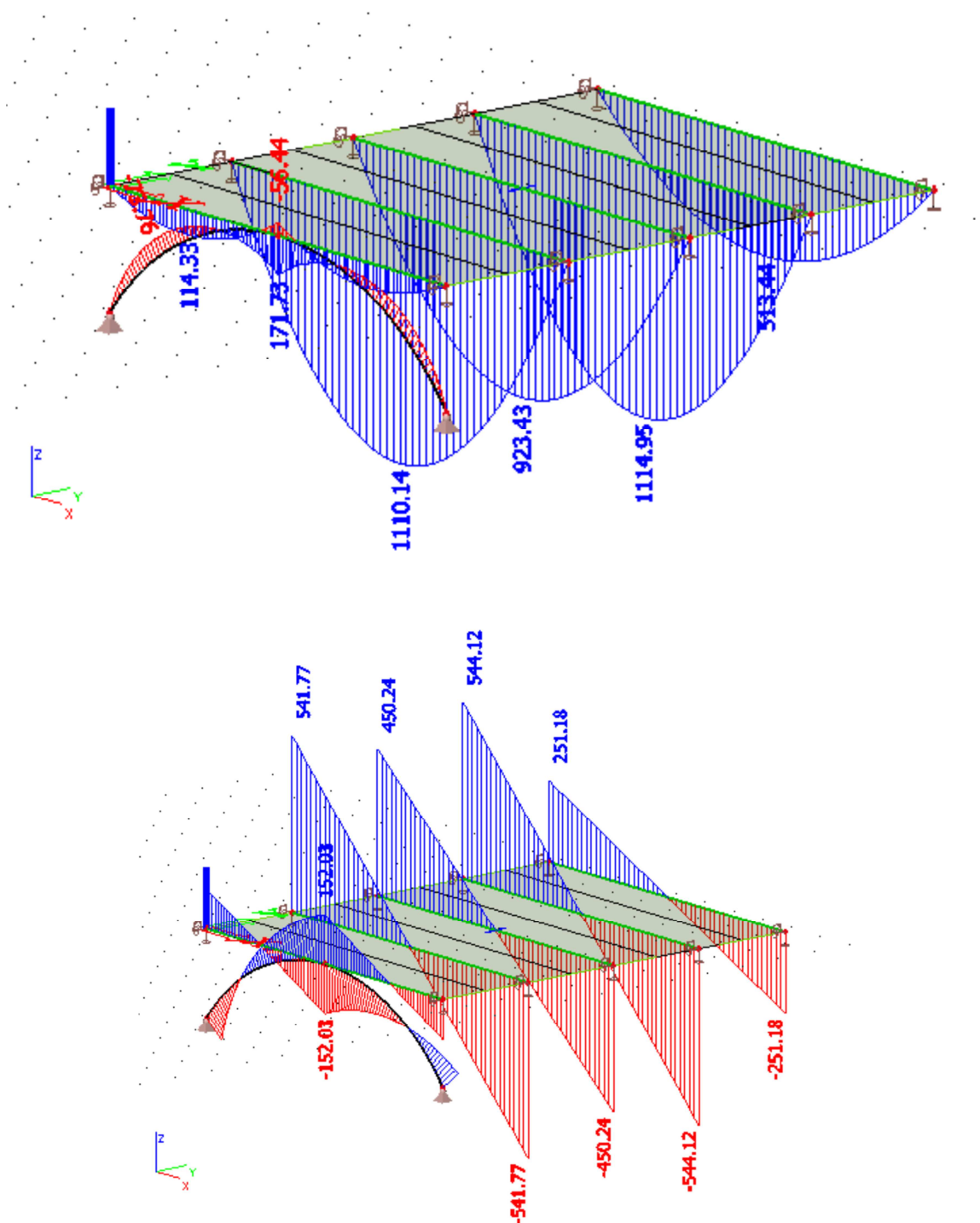
Dans le cadre du calcul, les sections d'acier de la nappe inférieure seront diminuées de 20%, mesures effectuées lors du diagnostic pour les pertes de section liées à la corrosion. Pour les cadres, certains sont discontinus.

- 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.

- 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 :





- Résultats de la modélisation

Pour les poutres **P1 à P4**, le moment de flexion maximum à l'ELU sous le cas de charge considéré est de : **$M_y (ELU) = 1114,95 \text{ kN.m}$**

Pour la poutre **P5**, les moments de flexion maximum à l'ELU sous le cas de charge considéré sont de :
 $M_y (ELU)_{\text{trav}} = 114,33 \text{ kN.m}$
 $M_y (ELU)_{\text{App central}} = 56,44 \text{ kN.m}$

Pour les poutres **P1 à P5**, l'effort tranchant maximum à l'ELU sous le cas de charge considéré est de :
 $V_z (ELU) = 544.12 \text{ kN}$

4.3 PRE DIMENSIONNEMENT DES REPARATIONS

- Armatures longitudinales des poutres et de la voûte

En prenant en compte les sections d'armatures existantes au niveau des poutres **P1 à P4** en opposition au moment fléchissant calculé ci-avant, le résultat conduit à un rajout d'armatures longitudinales de :
Section A_s ajout = 15 cm^2 avec une limite élastique de 500 MPa.

Cela conduit à renforcer la poutre à l'aide de **5 barres HA 20 de type B500B**.

Au niveau de la voute, en considérant les sections d'armature originelles, le résultat du calcul ne conduit pas à la nécessité de rajouter de la section d'acier. Cependant, compte tenu de l'état de corrosion des armatures, et par mesure de sécurité, il est préconisé de rajouter l'équivalent en section d'armature, permettant ainsi de s'affranchir d'un risque ponctuel de discontinuité d'armature (corrosion par piqure pouvant être non visible au niveau du parement).

Soit un ajout de **3 barres HA 16 de type B500B**.

- Armatures transversales des poutres et de la voûte

De la même façon, en prenant en compte les sections d'armature transversales originelles pour les poutres P1 à P5 (hors parties en intersection avec la voûte) et la voûte, pour la reprise des efforts tranchants calculés ci-avant, les calculs avec des armatures de type Fe E 235 montrent qu'il n'y a pas lieu de rajouter de la section d'acier.

Cependant, les armatures transversales ayant été reconnues sectionnées en différents endroits, ne remplissent plus leur rôle et sont à l'origine du phénomène de fissuration à 45° observé au niveau de la poutre P1. Il est donc nécessaire de reconstituer totalement ces armatures.

Cela conduit à retenir au niveau des **poutres**, des **cadres et épingles** en barres façonnées **HA 10 de type B500B** avec un espacement de **15 cm sur les 2 premiers mètres** depuis les appuis, et un espacement de **30 cm en partie courante**.

Pour la **voûte**, le renforcement sera réalisé à l'aide de **cadres HA 8** de type B500B avec un **espacement de 30 cm**

Pour des raisons évidentes de mise en œuvre, les cadres pourront être constitués en 2 parties et les épingles constituées de U en scellement.

Les schémas ci-dessous illustrent le principe réparatoire proposé.

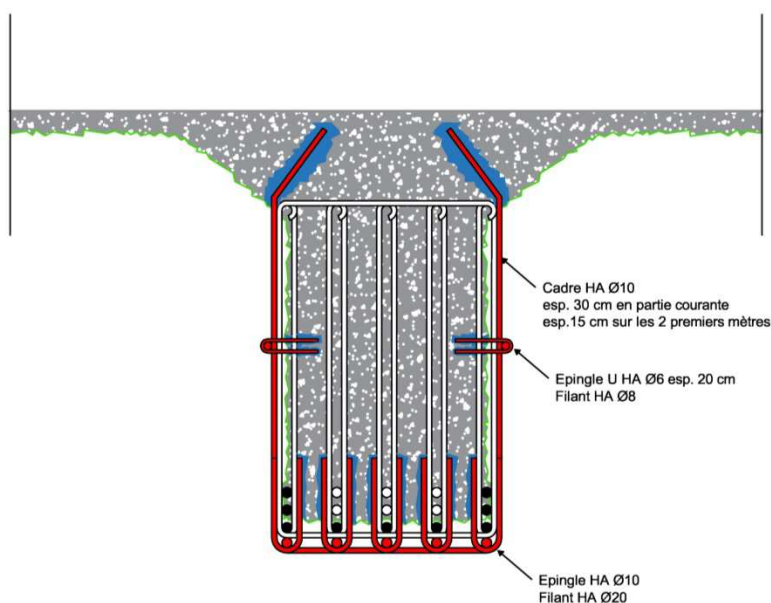


Schéma poutre partie courante

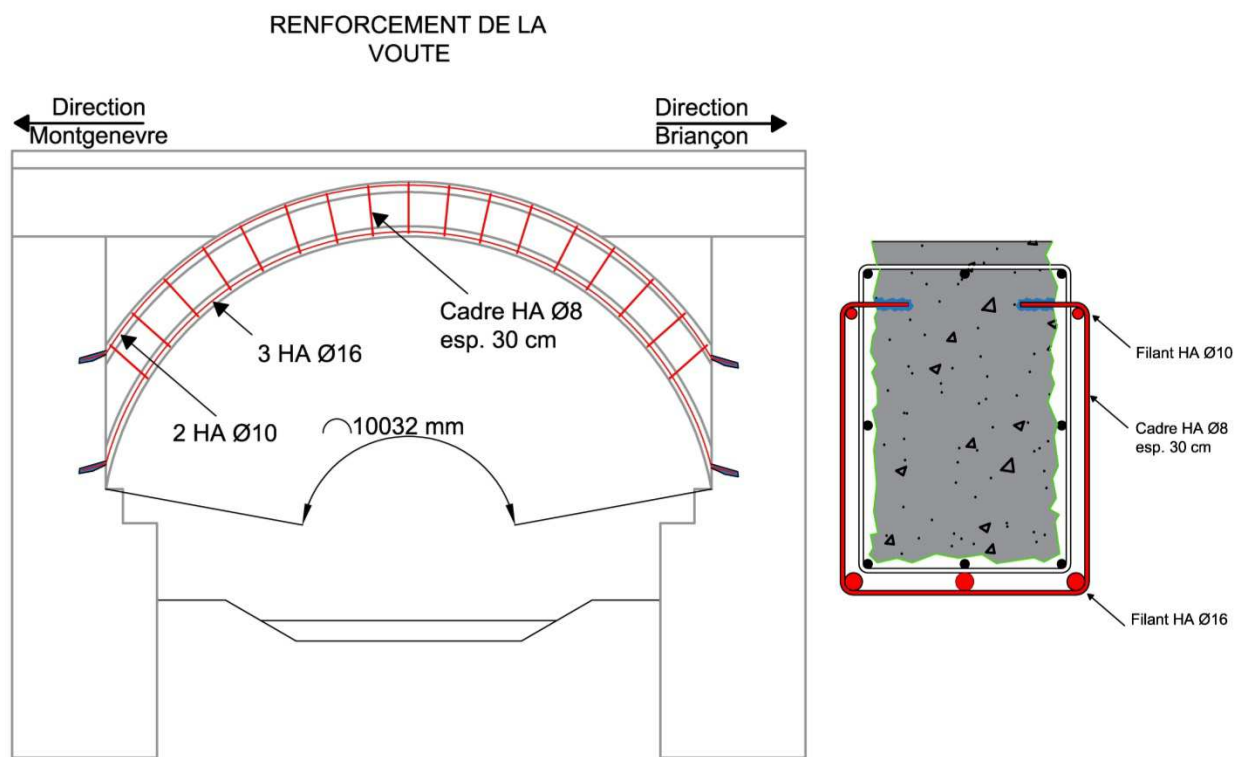


Schéma du renforcement de la voûte

- Armatures des dalles

Le ferrailage des dalles n'étant pas déterminé, il sera appliqué par principe de précaution, le même raisonnement que celui des renforcements des poutres et de la voûte à l'effort tranchant.

En conséquence, ce renforcement des **dalles** sera effectué par l'ajout d'un treillis soudé de type **ST 50C**, broché sur les dalles existantes.

Le schéma ci-dessous illustre cette disposition.

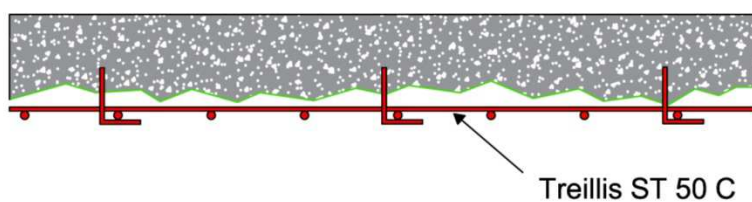


Schéma de reprise des dalles



- 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



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 préalable fixant les hypothèses issues du diagnostic, ainsi que le pré-design d'une Protection cathodique au stade de l'avant-projet, 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.

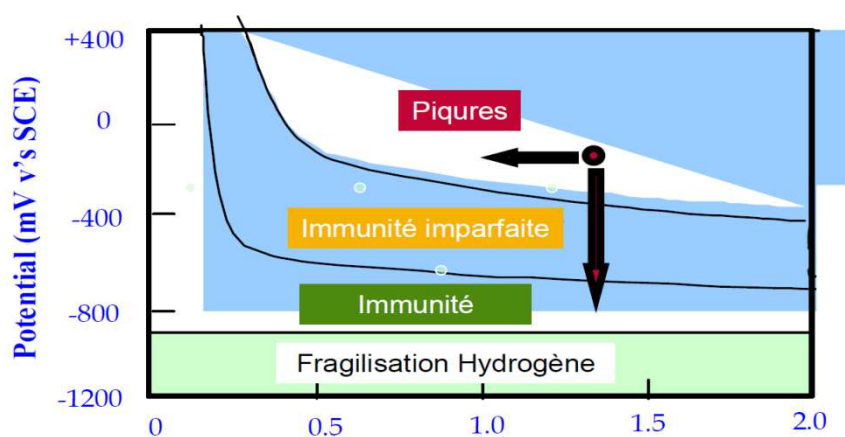
- **Norme NF A 05 800 de Mars 2006 « Prestations de services en protection cathodique »**,
Cette norme spécifie les engagements des prestataires de services en protection cathodique (y compris de l'acier dans le béton).
- **Norme NF 15 257 de Mars 2007 « Niveaux de compétences et certification du personnel 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 Courant de protection : Hypothèses de travail

Dans le cadre du projet de réparation, deux familles de solutions sont envisageables : une première concerne la réparation des structures existantes, et la seconde propose le remplacement d'éléments altérés par des éléments neufs.

Compte tenu de l'environnement et de la pollution du béton par les ions chlorures, trois approches de traitement électrochimiques sont possibles :

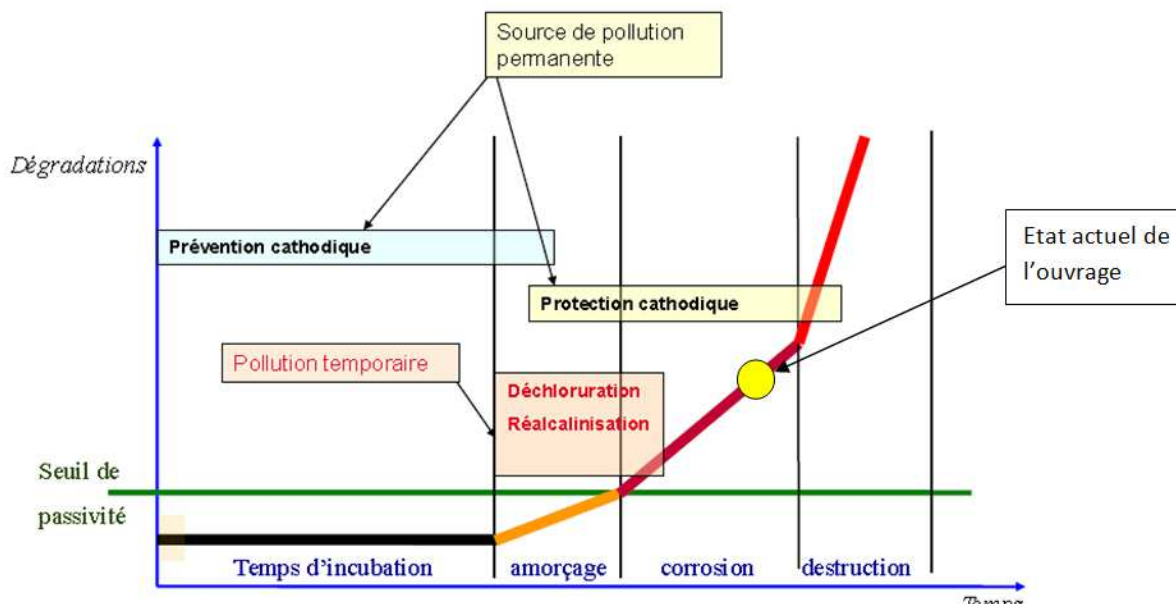
- 1 – Un traitement par extraction des ions chlorures
- 2 – Un traitement de Protection Cathodique pour les structures existantes
- 3 – Un traitement de Prévention Cathodique pour les structures neuves



Le diagramme de Pedefferri présenté ci-dessus illustre le potentiel de piqûration en fonction de la teneur en chlorure. Le traitement par extraction consiste à diminuer la concentration en chlorure pour ramener l'acier dans un domaine d'immunité. Les traitements de protection cathodiques ou de prévention

cathodique ont pour objectif d'abaisser le potentiel de l'acier pour les mettre respectivement en condition d'immunité ou d'immunité imparfaite.

Cette courbe d'endommagement permet de situer les différentes techniques applicables en fonction de l'altération des ouvrages.



Les études de pré-design suivent le schéma directeur présenté ci-avant, 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).

En conséquence, la solution de traitement par extraction des ions chlorures sera écartée. Seules les solutions de protection cathodique et de prévention cathodiques seront développées dans le présent avant-projet.

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.

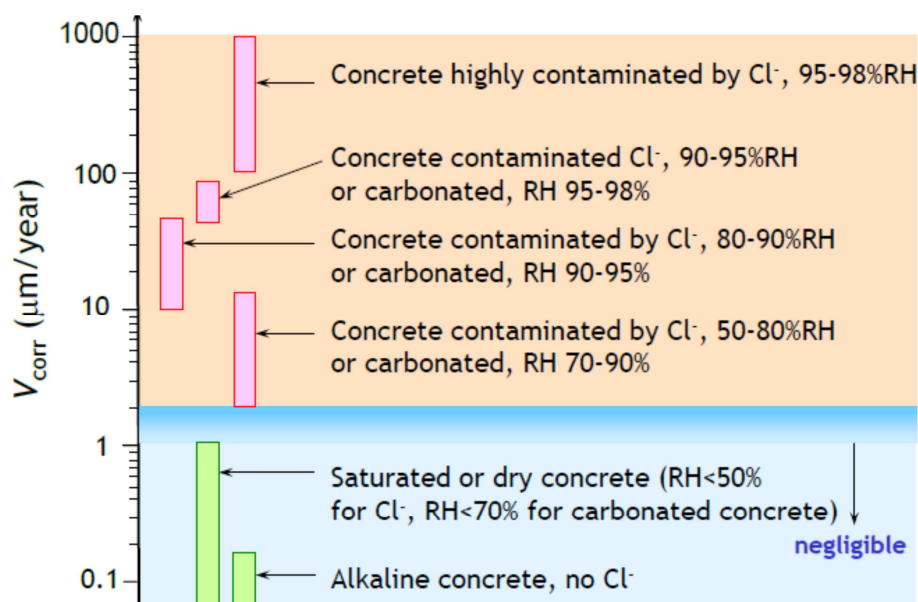
Il est fréquent que les courants soient proches de la grille proposée ci-dessous :

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)

Les différentes mesures effectuées lors du diagnostic, couplées au fait que le béton est soumis aux intempéries et aux sels de déverglaçages, il conviendra de retenir deux possibilité comme courant de protection, en fonction du niveau de purge des bétons existants.



- La première 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 courant**



de protection $I_{proj} = 15 \text{ mA/m}^2$ d'armature. Par rapport à cette densité de courant de protection, les protections galvaniques ne permettent pas d'atteindre de tels débits, ni les critères de polarisation défini dans la norme EN 12 696.

- La seconde hypothèse, consiste à considérer que le béton d'enrobage sera purgé jusqu'à une profondeur de 4 à 5 cm par rapport au parement de l'ouvrage après purge du béton projeté et du Nerlat existant. Dans ce cas de figure, les teneurs en ions chlorures seront de l'ordre de 0.5 % par rapport taux de ciment. **Dans cette hypothèse, il conviendra de retenir comme courant de protection $I_{proj} = 7 \text{ mA/m}^2$ d'armature.** Par rapport à cette densité de courant de protection, les protections galvaniques permettent également d'atteindre de tels débits.

5.1.4 Prévention cathodique des structures neuves

L'avant-projet de réparation envisage l'ajout d'armatures en renfort au niveau des poutres et du tablier.

Ce principe consiste à la mise en place d'un système de protection cathodique intégré, fonctionnant avec un très faible courant protecteur. L'objectif consiste à éviter que les ions chlorures ne s'approchent des armatures, ce qui correspond à placer l'acier dans une zone d'immunité imparfaite ou immunité totale empêchant la corrosion par piqure de s'amorcer.

La norme **NF EN 12696** fixe les courants de prévention cathodique comme pouvant être compris entre 0,2 et 2mA/m² d'armature.

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 ne sera pas dimensionnante, et sera calculée avec le même courant projet que celui de la protection cathodique.



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 droit des 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 choisis 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 ribons 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 DE SYSTEMES DE PROTECTION CATHODIQUE

Dans le cadre de la protection des réparations et des parties de la structure de l'ouvrage, deux types de protection cathodique sont possibles, un par courant imposé et l'autre par courant galvanique. Ces deux solutions seront étudiées.

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 4.3.

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.

Diamètre acier (mm)	Nbre ml de barres Verticales	Nbre ml de barres Horizontales	Surf. acier développée au m/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	50.08		0.031	1.573
12			0.038	0.000
14			0.044	0.000
16		4	0.050	0.201
20		14	0.063	0.880
25			0.079	0.000
32			0.101	0.000
40			0.126	0.000

m² de parement considéré	2.13
--------------------------	------

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

Au niveau des dalles, leurs ferrailages n'étant pas connus à ce jour, on considère un renforcement à l'aide d'un 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.

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

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	15.84		0.025	0.398
10		2	0.031	0.063
12			0.038	0.000
14			0.044	0.000
16		11	0.050	0.553
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
--------------------------	---

1.014

S. acier / m2 de parement béton

5.2.3 Calcul des courants de protection

Les courants de protection ont été définis dans le chapitre 5.1.3., soit 15 mA/m² ou 7 mA/m² en fonction du niveau de purge du béton. Il est généralement admis que pour des densités de courant de protection projet supérieures à 7 mA/m², les systèmes de protection galvanique ne permettent pas de débiter assez de courant. En conséquence, deux approches sont possibles, une première par protection galvanique avec un important niveau de purge et une seconde par courant imposé avec une purge moins importante. Les deux approches seront conduites en parallèle.

Elément	Nombre	Surface de parement en m ²	Densité d'armatures Sa/Sb	Demande en courant à Iproj 7 mA/m ²	Demande en courant à Iproj 15 mA/m ²
Poutres	5	15.33	1.284	137.8 mA	295.3 mA
Dalles	4	12.99	1.005	91.4 mA	195.8 mA
Voûte	1	15.14	1.014	107.5 mA	230.3 mA

- Protection Cathodique par Courant Galvanique (PCCG)

Elément	Nombre	Surface de parement en m ²	Demande en courant à Iproj 7 mA/m ² par elt	Demande totale en courant
Poutres	5	15.33	137.8 mA	1.17 A
Dalles	4	12.99	91.4 mA	
Voûte	1	15.14	107.5 mA	

Soit une demande totale en courant de 1.17 Ampères.

- Protection Cathodique par Courant Imposé (PCCI)

Elément	Nombre	Surface de parement en m ²	Demande en courant à Iproj 15 mA/m ²	Densité de courant en mA/m ² de béton
Poutres	5	15.33	295.3 mA	19.26
Dalles	4	12.99	195.8 mA	15.07
Voûte	1	15.14	230.3 mA	15.21

Pour une demande totale en courant de 2.49 Ampères.

5.2.4 Pré dimensionnement de différents systèmes anodiques

- Solution par PCCG

Le principe consiste à substituer la corrosion des armatures par la corrosion d'un autre matériau. Ce matériau est généralement du zinc qui est moins noble que l'acier. Deux types de protection galvanique sont présentés : les anodes forcées ou du zinc projeté.

Le principe est de mettre en contact des anodes discrètes ou un revêtement en zinc avec les armatures déjà en place. Cette connexion permet le couplage des deux matériaux et crée ainsi une protection cathodique des armatures du béton.

Le dimensionnement de la solution dans le temps se fait par rapport à la masse de zinc apportée. En application des lois de Coulomb et de Faraday, on obtient ainsi une quantité de zinc à mettre en œuvre pour une durée de vie du système. Ces calculs prennent également en compte la quantité d'armature à protéger selon une hypothèse sur le courant de protection qui est issu du diagnostic.

La masse de zinc sacrificielle est calculée pour une durée de vie de 20 ans (période maximale généralement admise pour ce type de système).

Loi de Faraday : $Wt = Km \times I_{corr} \times t$

En application des coefficients de rendement et des coefficients d'utilisation des anodes, on obtient les masses d'anode suivantes :

Elément	Nombre	Surface de parement en m ²	Demande en courant par élément	Masses d'anode Zn par élément
Poutres	5	15.33	137.8 mA	40.95 kg
Dalles	4	12.99	91.4 mA	27.16 kg
Voûte	1	15.14	107.5 mA	31.94 kg

Dans le cas de l'ouvrage actuel, l'étanchéité du tablier pouvant être défailante ponctuellement, ou défailante pendant la période de fonctionnement du système, la possibilité d'infiltrations d'eau au travers du tablier n'est pas à exclure. Cet état rend incompatible l'application d'une pellicule surfacique de zinc qui pourrait entraîner des phénomènes de cloquage, rendant inopérant le système.



En considérant des anodes de 150 g de Zn, cela correspond à positionner 273 anodes sur chaque poutre, 182 anodes sur chaque dalle et 213 anodes sur la voûte.

- 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.

Elément	Nombre	Surface de parement en m ²	Demande en courant à Iproj 15 mA/m ²	Densité de courant en mA/m ² de béton
Poutres	5	15.33	295.3 mA	19.26
Dalles	4	12.99	195.8 mA	15.07
Voûte	1	15.14	230.3 mA	15.21

Par exemple, une anode ruban fournissant une densité de courant linéique $i_a = 3.97 \text{ mA/ml}$ conduit à retenir un espacement de 20 cm entre les anodes rubans longitudinales pour les poutres, un espacement de 25 cm pour les dalles et un espacement de 25 cm pour la voûte.



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 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.

6.3 TRAVAUX DE RENFORCEMENT MECANIQUES

Les renforcements des éléments structuraux 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.

6.4 LA PROTECTION ELECTROCHIMIQUE

6.4.1 Solution PCCG

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 galvaniques,
- Enrobage des anodes à l'aide d'un mortier prêt à l'emploi spécifique aux anodes,
- Reconstitution des enrobages à l'aide d'un béton projeté par voie sèche.

Dans cette solution, le niveau de purge est plus important car il a également pour rôle d'éliminer les polluants et entraine donc une épaisseur de béton de reconstitution plus important.

Cette solution technique permet donc de garantir des réparations pour une pérennité calculée de 20 ans.

6.4.2 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 2 sous stations de 50 Watt environ, soit une puissance totale du poste de soutirage de 100 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 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.

7 ESTIMATIF DU COÛT DES TRAVAUX

Les solutions de travaux ont été décrites au chapitre 8 ci-avant et se différencient uniquement par le choix du système de protection cathodique. Les renforcements structuels étant identiques pour les deux solutions.

7.1 SOLUTION REPARATION ET PROTECTION PCCG

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 galvanique.

ESTIMATION AVANT PROJET Solution Réparation structurelle et PCCG					
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	6 000.00	6 000.00
3	Mise en place des moyens d'accès				
	- Echafaudages	m²	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	m²	160	75.00	12 000.00
	- Purge des bétons non adhérents et évacuation	m²	180	135.00	24 300.00
	- Préparation surfacique des bétons (sablage)	m²	180	75.00	13 500.00
5	Réparations structurelles				
	- Rajout d'armatures en renforts, y compris façonnage, pose, scellements chimiques et réalisation des continuité électriques	m²	180	140.00	25 200.00
6	Traitement des bétons				
	- Protection des armatures par PCCG y compris mise en place du système anodique et de suivi	m²	180	1 325.00	238 500.00
7	Réfection des parements				
	- Réalisation d'un béton projeté par voie sèche	m²	180	1 100.00	198 000.00
8	Travaux annexes				
	- Reprise des larmiers en périphérie des dalles	ml	20	210.00	4 200.00
9	Aléas sur solution	%	10	54 350.00	54 350.00
Montant total HT :					597 850.00

7.2 SOLUTION REPARATION ET PROTECTION PCCI

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 AVANT 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	9 500.00	9 500.00
3	Mise en place des moyens d'accès				
	- Echafaudages	m³	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	m³	160	75.00	12 000.00
	- Purge des bétons non adhérents et évacuation	m³	180	85.00	15 300.00
	- Préparation surfacique des bétons (sablage)	m³	180	75.00	13 500.00
5	Réparations structurelles				
	- Rajout d'armatures en renforts, y compris façonnage, pose, scellements chimiques et réalisation des continuité électriques	m³	180	140.00	25 200.00
6	Traitement des bétons				
	- Protection des armatures par PCCI	m³	180	485.00	87 300.00
	- y compris mise en place du système anodique, de suivi				
	- Fourniture et pose du transformateur et sous-stations	ft	1	14 500.00	14 500.00
	- Création d'une armoire électrique sur socle et raccordement	ft	1	6 500.00	6 500.00
7	Réfection des parements				
	- Réalisation d'un béton projeté par voie sèche	m³	180	800.00	144 000.00
8	Travaux annexes				
	- Reprise des larmiers en périphérie des dalles	ml	20	210.00	4 200.00
9	Aléas sur solution	‰	10	35 380.00	35 380.00
Montant total HT :					389 180.00

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.



8 SYNTHÈSE DES SOLUTIONS

Le tableau ci-dessous présente un récapitulatif à ce stade de l'étude :

Solution	Type	Cout € HT	Délai	Pérennité
1	PCCG	597 850	3 mois	20 ans
2	PCCI	389 180	3 mois	50 ans