

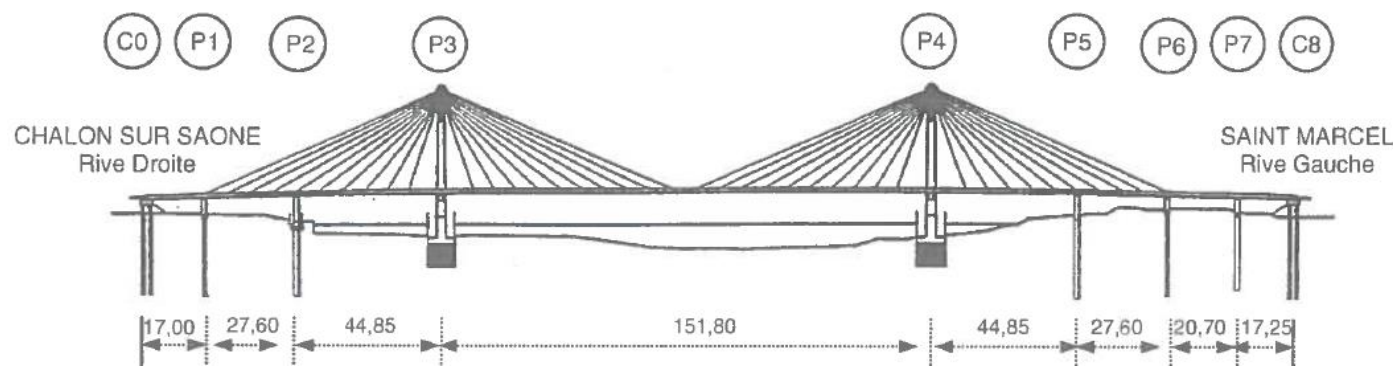
Présentation du projet de confortement des embases des pylônes

Par : Jean-Michel ODIN – Arcadis

Maîtrise d'œuvre

Missions :

- Diagnostic (DIAG)
- Investigations complémentaires
- Avant-Projet (AVP)
- Projet (PRO)
- Dossier loi sur l'eau
- Assistance pour la passation des contrats de travaux (ACT)
- Examen de la conformité (VISA)
- Direction de l'exécution des travaux (DET)
- Assistance lors des opérations de réception (AOR)



Pièces affectées sur les pylônes P3 et P4

Conclusions **des expertises** :

- Entretoises inférieures : pas de RSI
- Jambes : pas de RSI
- Embases : RSI très importante
- Semelles : RSI à cinétique lente



Pièces affectées sur les pylônes P3 et P4

Problématique posée lors de l'expertise :

- Quelle évolution dans le temps de la RSI ?
- Quelle expansion résiduelle ?
 - ⇒ Approche assez prudente du LCPC basée sur les essais les plus défavorables majorés
 - ⇒ Certains experts ont affirmé en 2006 que la RSI des embases était terminée
 - ⇒ Quelle évolution plus de 10 ans après ?

Investigations complémentaires réalisées (2017)

Partie	Investigations complémentaires	Objectif	Apport pour l'étude
A	Inspection détaillée des parties émergées des embases, des jambes et entretoises inférieures	Relevé de la fissuration et détermination des indices de fissuration	Détermination de l'évolution des parties émergées entre la phase d'expertise et 2017 (environ 10 ans)
B	Inspection subaquatique des parties immergées des embases et des semelles	Relevé de la fissuration	Détermination de l'évolution des parties immergées entre la phase d'expertise et 2017 (environ 10 ans)
C	Prélèvement de carottes au cœur du béton des jambes pour examen au MEB et essai de compression	- Validation de la non réactivité des jambes à cœur - Capacité du béton des jambes	Affiner les hypothèses pour l'orientation de la solution de renforcement
D	Etat des bétons (profondeur de carbonatation, teneur en sulfates, chlorures) et des armatures (potentiels d'électrode et contrôle des réductions de section) sur les embases, les jambes et entretoises	Connaître l'état de dégradation compte tenu de la fissuration du béton	Possibilité ou non de tenir compte des armatures existantes à plus ou moins long terme

Résultats des investigations de 2017 (partie A)

- Inspection détaillée parties émergées :
 - Pas d'évolution notable des fissures
 - Indices de fissuration : exemple du relevé d'un trièdre sur P3 :

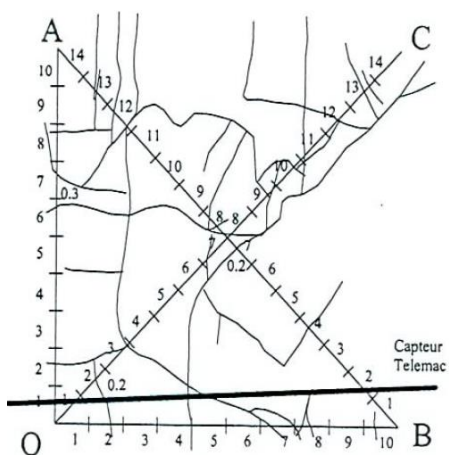


Figure 1 : Relevé des fissures au droit du trièdre D1

Trièdres mesurés le 25/01/2017 par une température extérieure comprise entre -4 °C et +2 °C

Intervall e	1	2	3	4	5	Long bas e (m)	Nbr fissu res	Ouverture (mm)			
	6	7	8	9	10			Totale cumulé e	Moyenn e / fissure	Moyenn e / mètre	Moyenn e globale (IF)
OA	/	0,1"	0,05"	0,05"	/	1	8	0,70	0,09	0,70	
	0,05"	0,3"	0,05"	/	0,05"						
OB	/	0,05"	/	0,1"	0,2"	1	10	0,85	0,09	0,85	
	0,05"	0,05" 0,2"	2*0,05"	0,05"	0,05"						
OC	/	0,2"	/	0,1" 0,2"	/	1,4	13	1,15	0,09	0,82	0,78
	0,05"	0,05"	0,1" 0,05"	/	0,1"						
	0,1"	2*0,05"	2*0,05"	/							
BA	0,05"	/	0,05"	0,1" 0,05"	/	1,4	15	1,05	0,07	0,75	
	0,05"	0,2"	0,1" 2*0,05"	2*0,05"	/						
	/	0,1" 0,05"	2*0,05"	/							

Tableau 1 : Relevé du trièdre D1

Pas d'évolution significative par rapport à 2003 et 2004
IF 2003 = 0,85 (T = 1 °C)
IF 2004 = 0,72 (T = 1 °C)

Résultats des investigations de 2017 (partie A)

- Inspection détaillée parties émergées :
- Indices de fissuration sur pylônes P3 et P4 : pas d'évolution

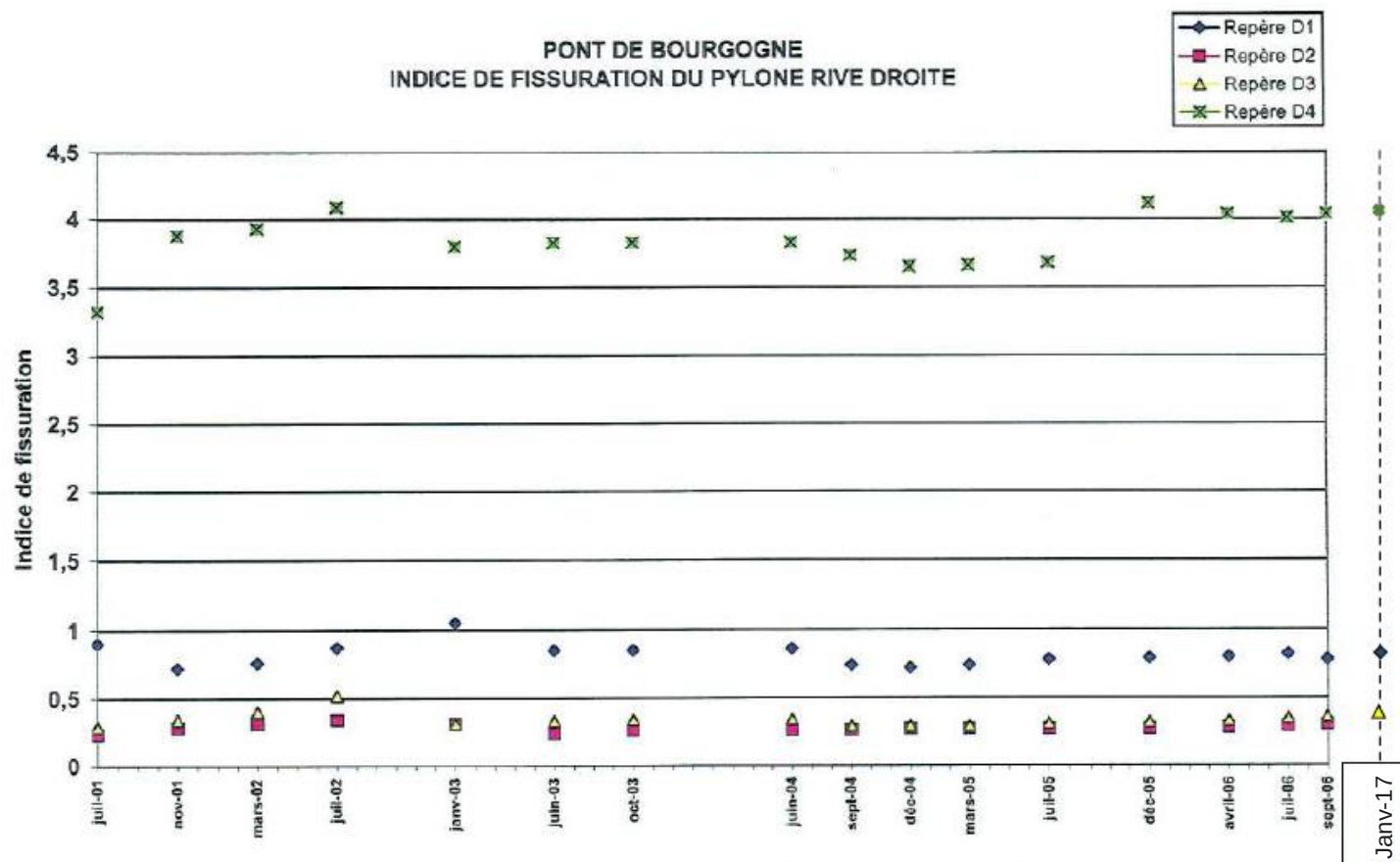


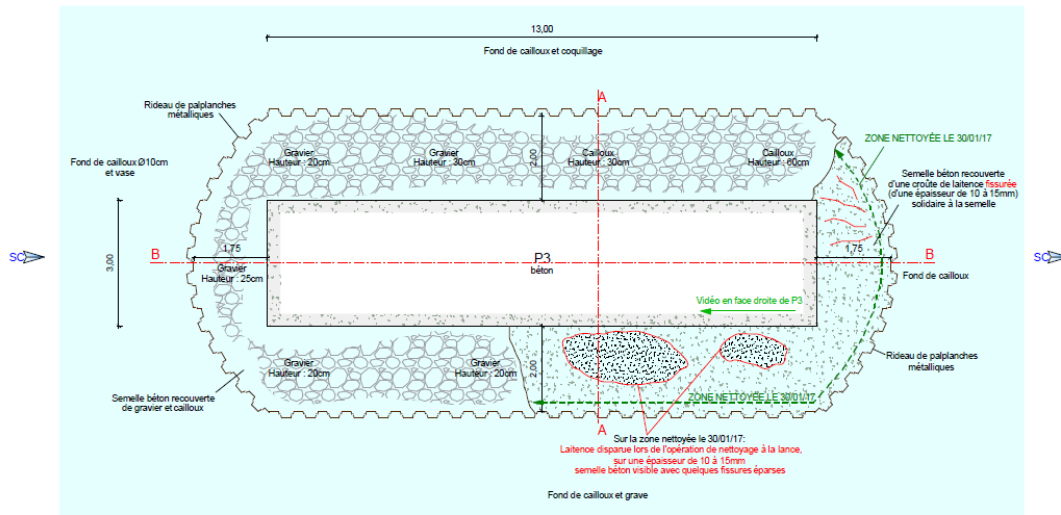
Figure 12 : Suivi de l'indice de fissuration avril 2001 à octobre 2006 - pylône P3

Résultats des investigations de 2017 (partie B)

- **Inspection subaquatique parties immergées :**
 - Présence de quelques fissures éparses, sur les massifs de fondation des deux pylônes 3 et 4
 - Parements masqués par les algues et manque de visibilité dues aux retombées sédimentaires sur les semelles

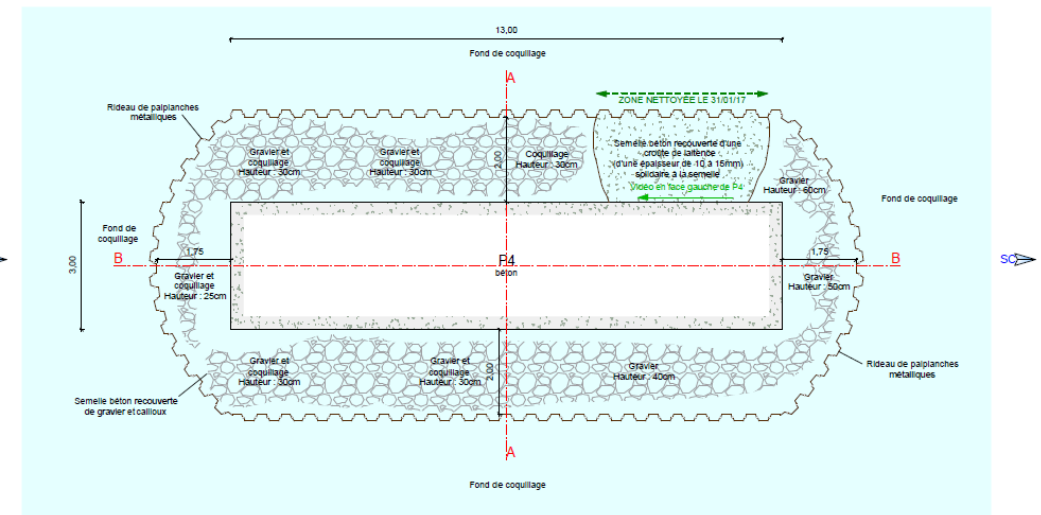
VUE EN PLAN DE P3
Ech 1/75

Pour information : P3 recouvert d'algues sous eau, fissures non visibles



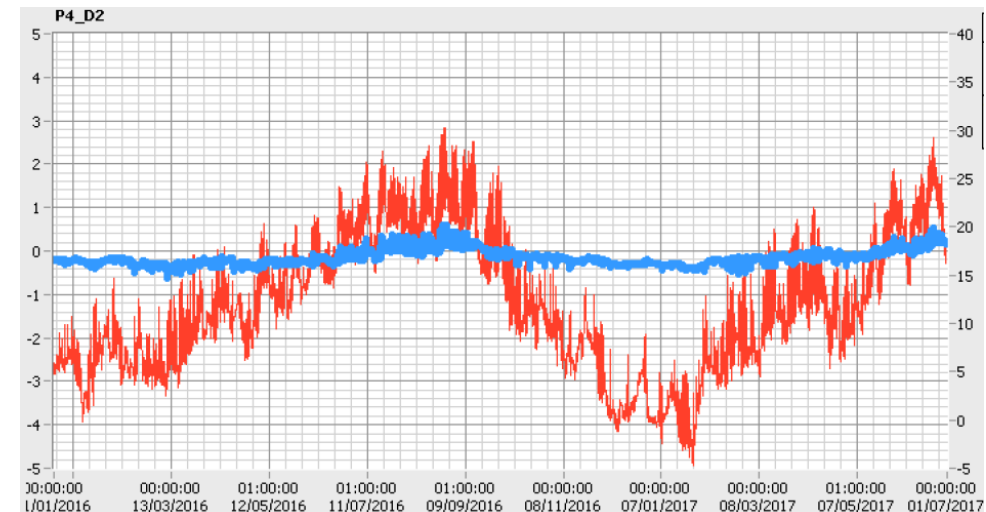
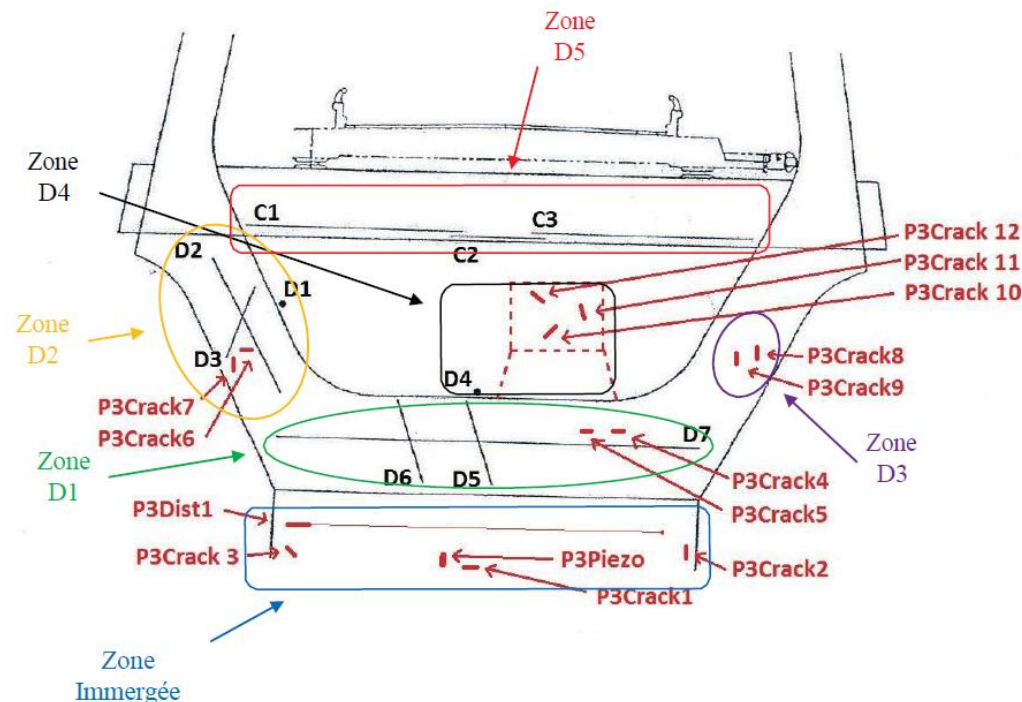
VUE EN PLAN DE P4
Ech 1/75

Pour information : P4 recouvert d'algues sous eau, fissures non visibles



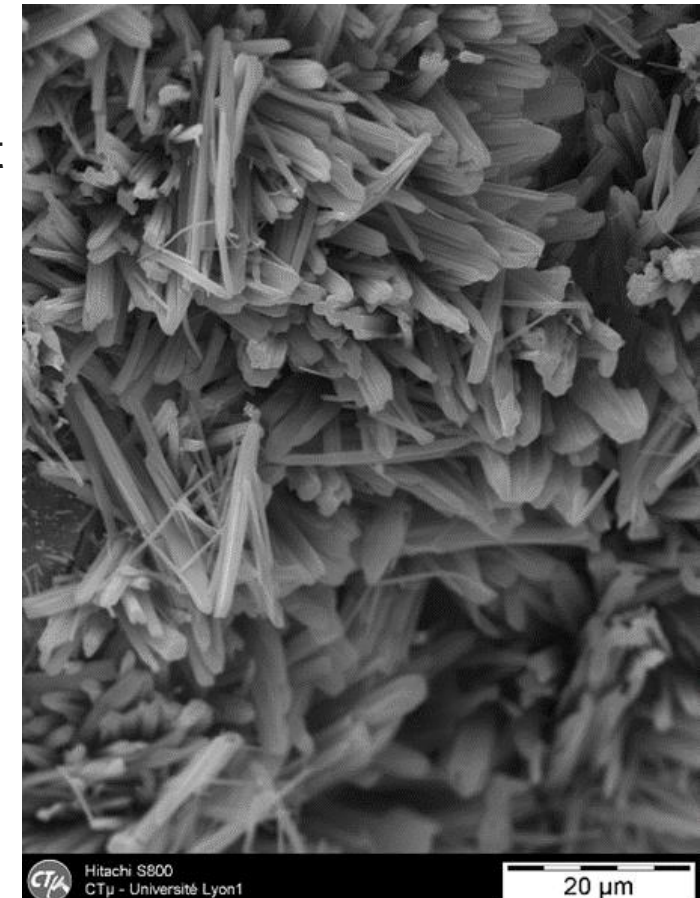
Exploitation de l'instrumentation

- Instrumentation mise en place en 2013 (Cementys) :
 - Capteurs à corde vibrante sur fissures et distancemètres
 - Quasi-stabilisation des ouvertures des fissures instrumentées
 - Pas de comparaison possible sur les distancemètres avec les résultats de l'instrumentation faite lors de l'expertise



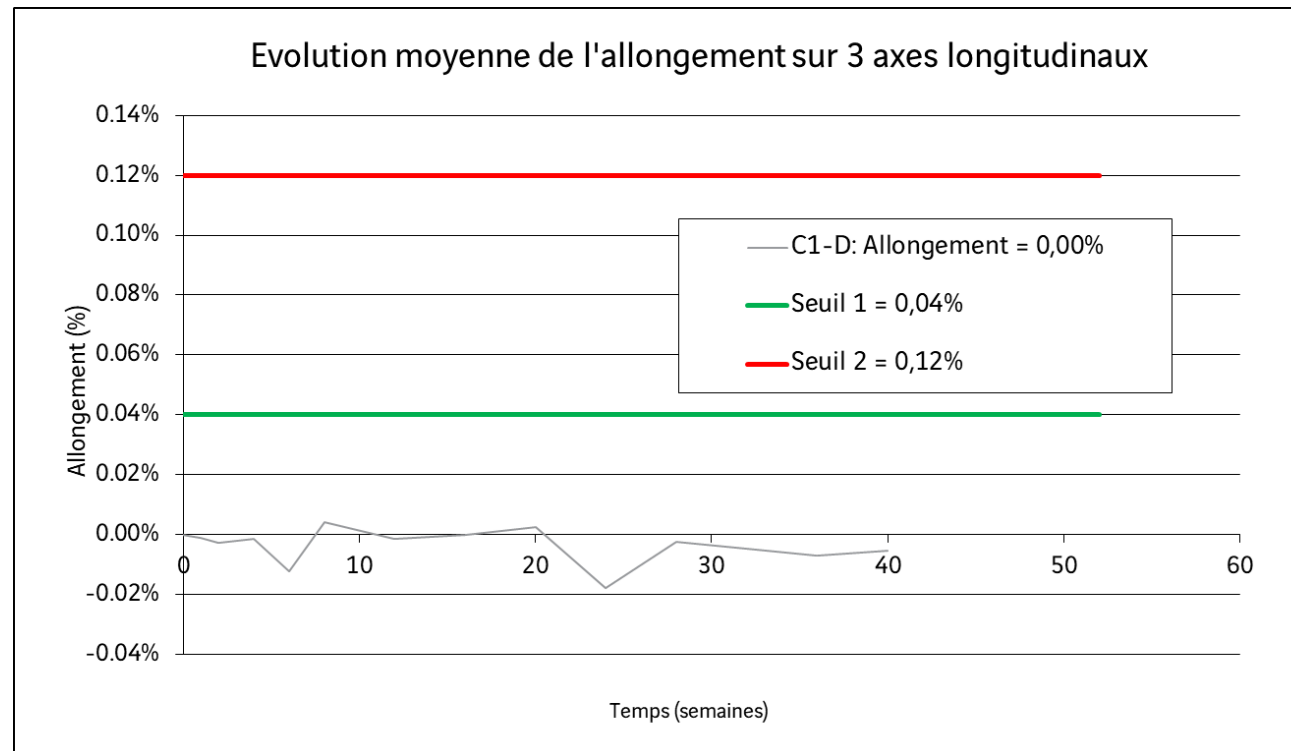
Résultats des investigations de 2017 (partie C)

- **Investigations sur le béton des jambes :**
 - Résistance mécanique : $R_c \approx 50 \text{ MPa}$ (pour un béton type « B40 »)
 - Examen au MEB :
 - matrice cimentaire présentant une bonne hydratation
 - cristaux d'ettringite secondaire observés très ponctuellement dans les pores et dans la matrice cimentaire



Résultats des investigations de 2017 (partie C)

- **Investigations sur le béton des jambes :**
 - Essai d'expansion résiduelle sur 1 échantillon prélevé à cœur d'une jambe de pylône (1.20 m de profondeur) : RSI mais sans gonflement résiduel (après 40 semaines d'essai)



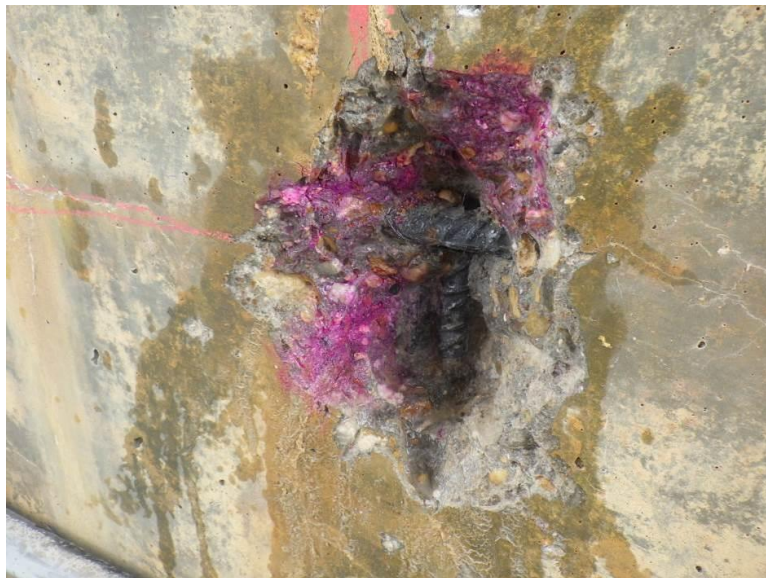
Résultats des investigations de 2017 (partie D)

- **Etat du béton et des armatures des jambes :**
 - Teneur en sulfates très importantes
 - Absence de corrosion des armatures
 - Faible carbonatation
 - Teneur en chlorures inférieure au seuil de dépassement des armatures
 - Armatures saines



Résultats des investigations de 2017

- **Etat du béton et des armatures des entretoises et des embases :**
 - Teneur en sulfates très importantes
 - Absence de corrosion des armatures
 - Faible carbonatation
 - Teneur en chlorures inférieure au seuil de dépassement des armatures
 - Armatures saines



Pièces affectées sur les pylônes P3 et P4

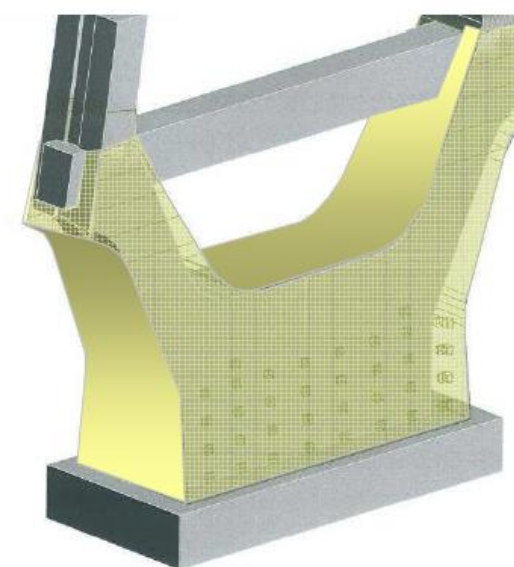
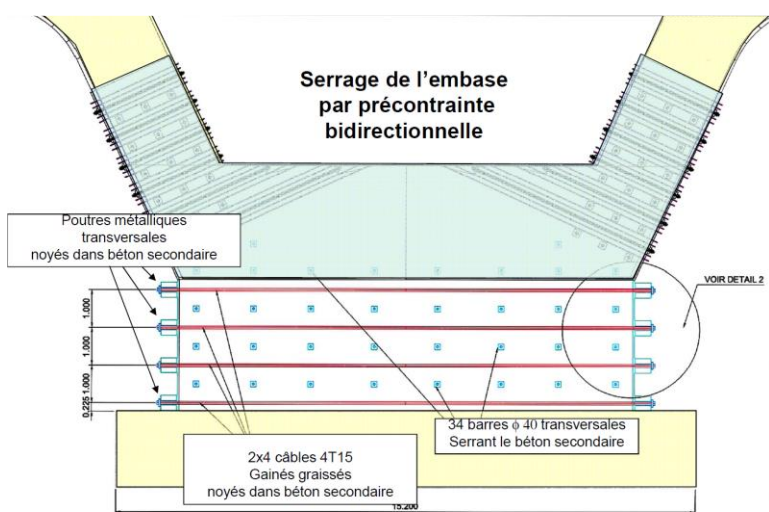
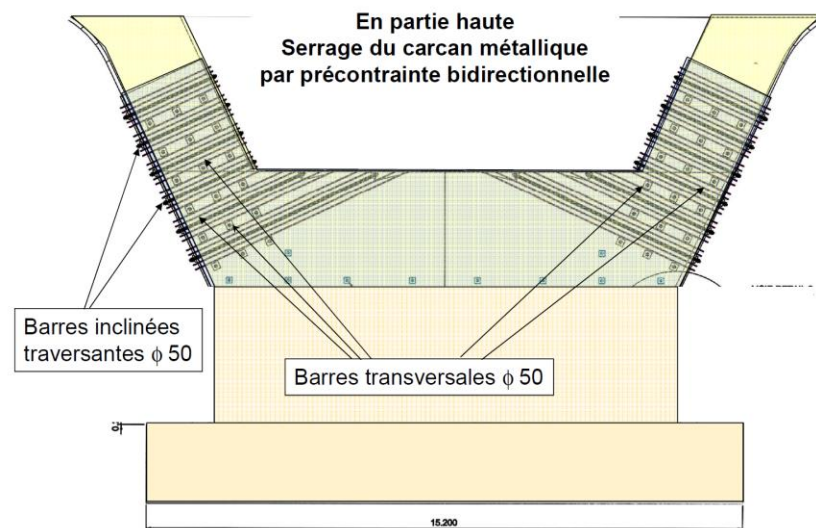
Conclusions **après investigations complémentaires** :

- Entretoises inférieures :
 - RSI inactive
 - Pas de corrosion des armatures
- Jambes :
 - RSI inactive
 - Pas de corrosion des armatures
- Embases :
 - RSI très importante
 - Expansion peu évolutive voir stabilisée
 - Pas de corrosion des armatures
- Semelles :
 - RSI à cinétique lente peu évolutive



Solutions proposées lors de l'expertise

- Solution 1 : traitement des fissures des embases par injection d'une résine, puis application d'un tissu en fibre de carbone sur les parements extérieurs et d'un revêtement en mortier de résine
- Solution 2 : corsetage métal / béton précontraint



CARCAN ACIER
ENVELOPPE BETON

- Confiner la structure actuelle
- Elargir la zone d'appui sur la semelle
- Conserver la conception architecturale

3 scénarios différents envisagés en AVP

- Etude de 3 solutions :
 - Solution A : traitement des fissures des embases par injection d'une résine, puis application d'un tissu en fibre de carbone sur les parements extérieurs et d'un revêtement en mortier de résine
 - Solution B : corsetage métal / béton précontraint
 - Solution C : corsetage BFUP

Objectifs à atteindre

- Application du guide du LCPC de 2010 « Protection et Réparation des ouvrages atteints de réaction de gonflement interne du béton » : application de l'analyse des risques pour le choix de traitement d'un ouvrage dont la réaction de gonflement est encore active :
- Vulnérabilité de niveau V4 (très élevée)
- Potentiel de gonflement résiduel : faible

Seuils	Potentiel négligeable	Potentiel faible	Potentiel fort
Réaction sulfatique interne (RSI) ou Alcali-réaction (AR - y.c. reprise en eau des éprouvettes)	Allongement < 0,04 % à 12 mois	$0,04 \% \leq \text{Allongement} \leq 0,12 \%$ à 12 mois	Allongement > 0,12 % à 12 mois

Tableau 9. Seuils de potentiels de gonflement résiduel

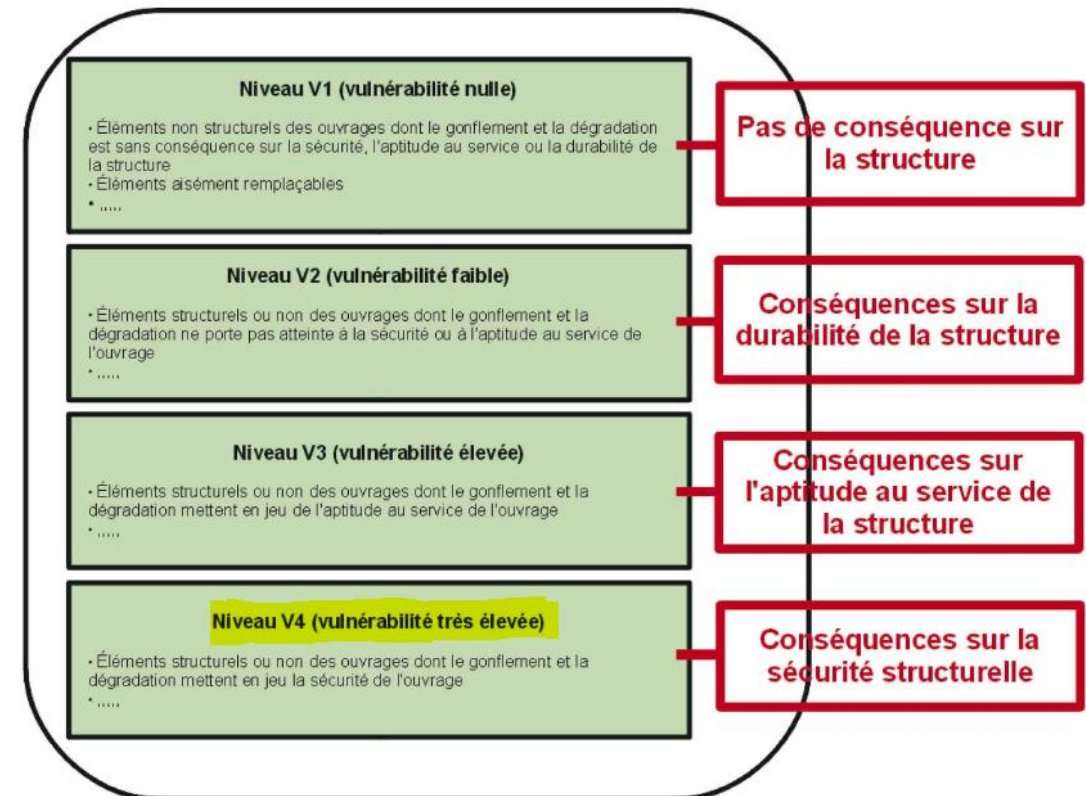


Figure 8. Vulnérabilité de la structure vis-à-vis du gonflement d'un élément

Objectifs à atteindre

- => Criticité C2 : impact moyen de l'aléa sur la structure



Aléa Vulnérabilité	Potentiel faible Environnement sec	Potentiel faible Environnement humide	Potentiel fort Environnement sec	Potentiel fort Environnement humide
V1	C0	C0	C0	C0
V2	C0	C1	C1	C2
V3	C1	C2	C2	C3
 V4	C1	C2	C3	C4

Tableau 10. Niveaux de criticité

- Enjeux : E2
 - E0 : ouvrage à enjeux faibles,
 - E1 : ouvrage à enjeux modérés,
 - E2 : ouvrage à enjeux importants,
 - E3 : ouvrage stratégique indispensable.

Objectifs à atteindre

- => Niveau de traitement : N2 : intervention curative ou préventive contre la perte d'aptitude au service et/ou de durabilité

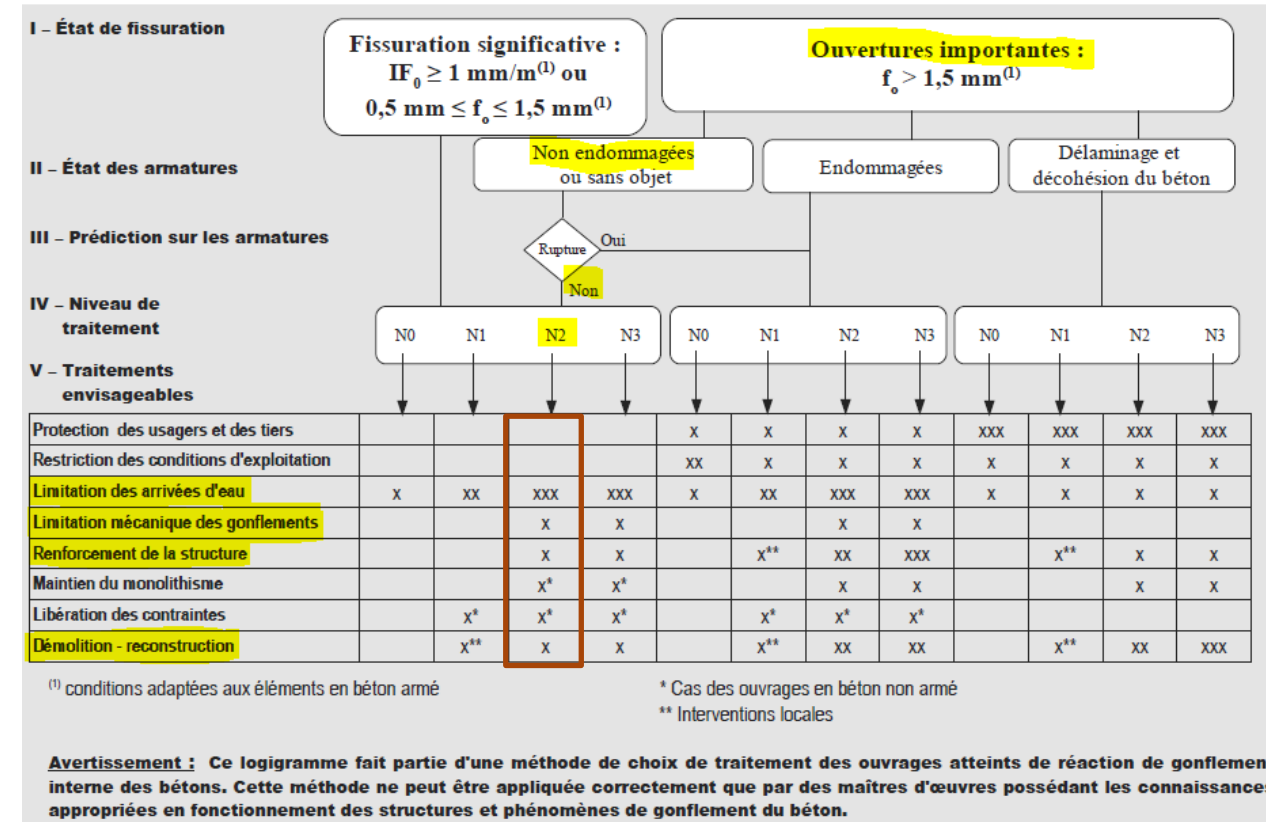
Niveau de traitement	C0	C1	C2	C3	C4
E0	N0	N0	N1	N1	N2
E1	N0	N1	N1	N2	N3
E2	N1	N1	N2	N2	N3
E3	N1	N2	N2	N3	N3

Tableau 11. Niveaux de traitement

Objectifs à atteindre

⇒ Traitements envisageables :

- Limitation des arrivées d'eau
- Limitation mécanique des gonflements
- Renforcement de la structure
- Démolition - reconstruction

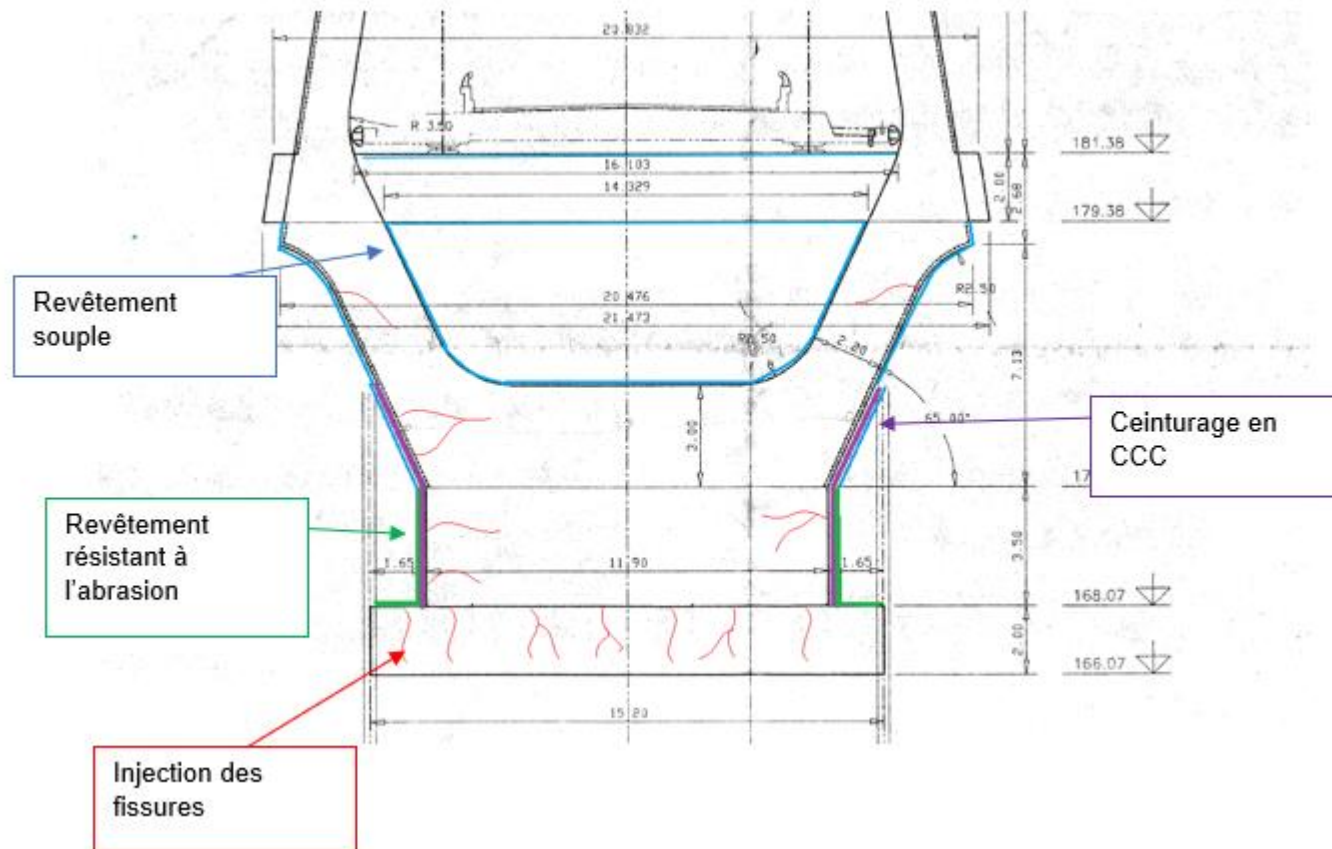


Solution A - ceinturage en CCC

- Objectifs atteints :
 - Limitation des venues d'eau et protection des armatures existantes contre la corrosion
- Travaux prévus :
 - Semelle : injection des fissures
 - Embase : injection des fissures, composite carbone collé, revêtement résistant à l'abrasion
 - Base des jambes et entretoises : injection des fissures et revêtement souple

Solution A - ceinturage en CCC

- Incertitudes sur l'adhérence du CCC sur un parement très fissuré et saturé en eau
- Nécessite des travaux lourds du fait du besoin d'un batardeau



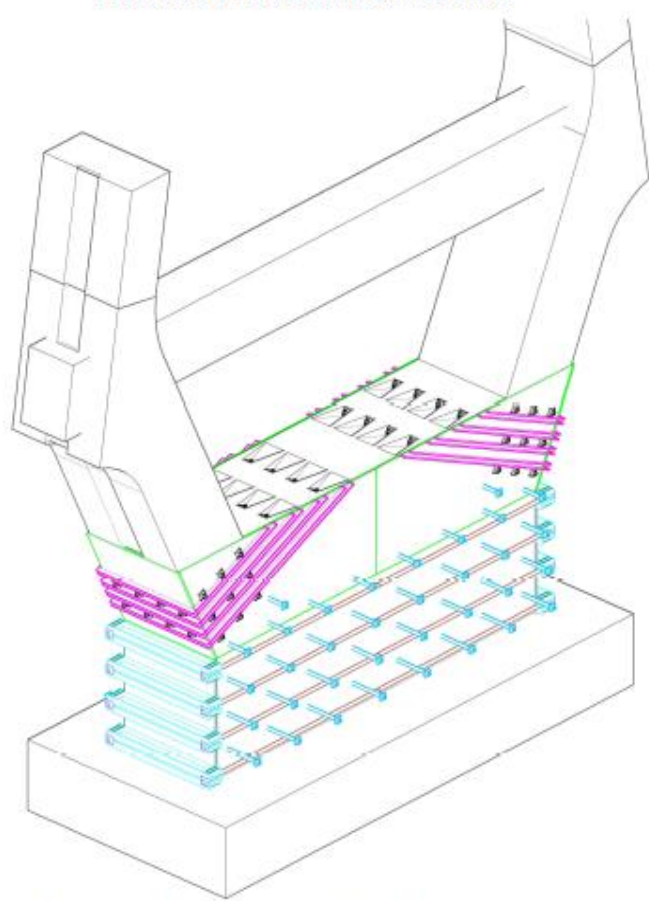
Solution B - corsetage métal / béton précontraint

- Objectifs atteints :
 - Limitation des venues d'eau et protection des armatures existantes contre la corrosion
 - Renforcement actif de l'embase
- Travaux prévus :
 - Semelle : injection des fissures
 - Embase :
 - reconstruction de la partie supérieure
 - corset métallique précontraint protégé par un béton armé fibré épaisseur 0.50 à 1.20 m
 - Base des jambes et entretoises : injection des fissures et revêtement souple

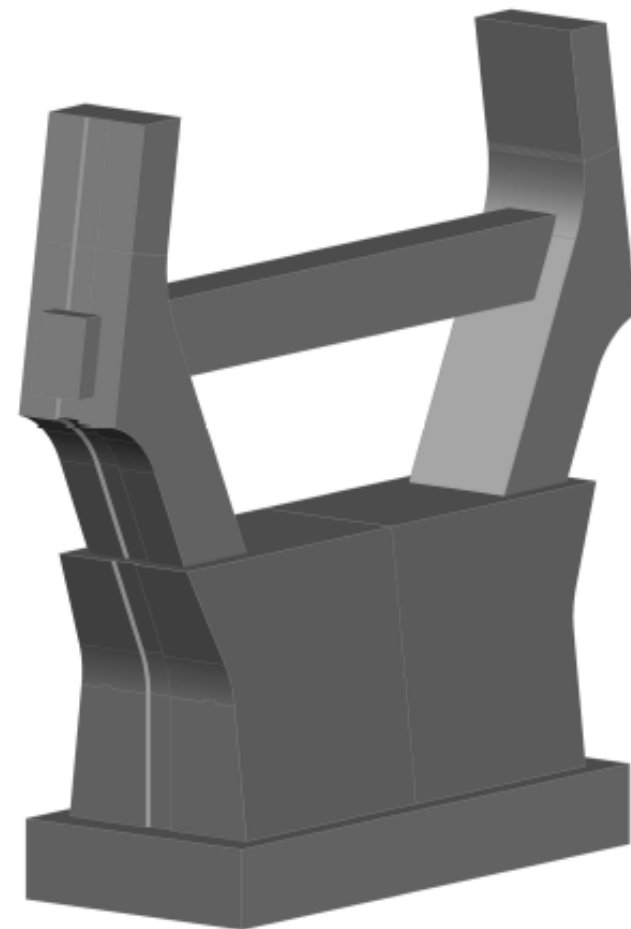
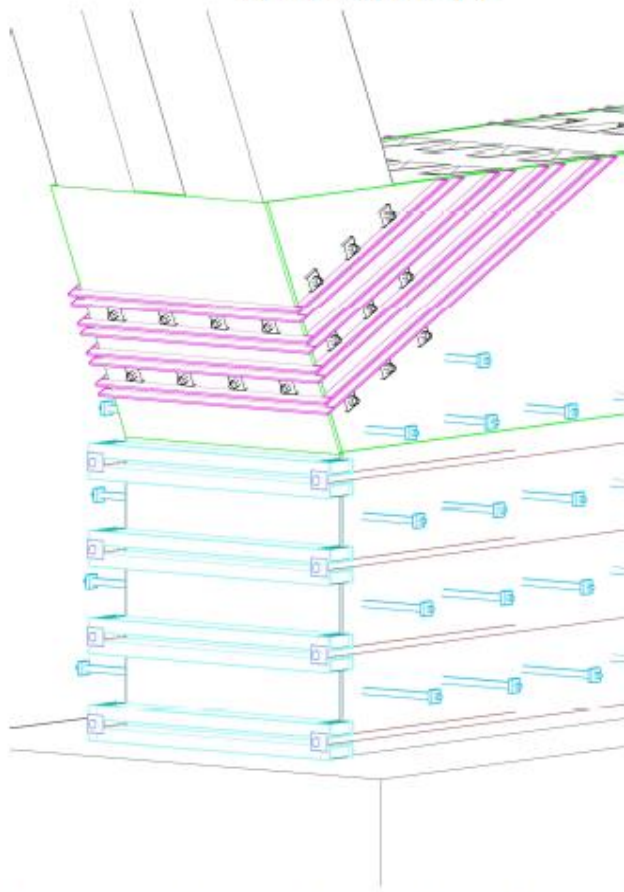
Solution B - corsetage métal / béton précontraint

- Travaux prévus : illustration :

PERSPECTIVE sans béton secondaire



PERSPECTIVE DETAIL



Solution B - corsetage métal / béton précontraint

- Phasage des travaux :

Phases 1 et 2 :

- Battage des palplanches
- Nettoyage et étanchéité du batardeau



Phases 3 à 7 :

- Sciage dans l'axe du pylône
- Démolition et reconstruction de la partie supérieure de l'embase par $\frac{1}{2}$ largeur.



Phase 8 :

- Carottage des réservations pour précontrainte longitudinale dans la partie supérieure de l'embase.

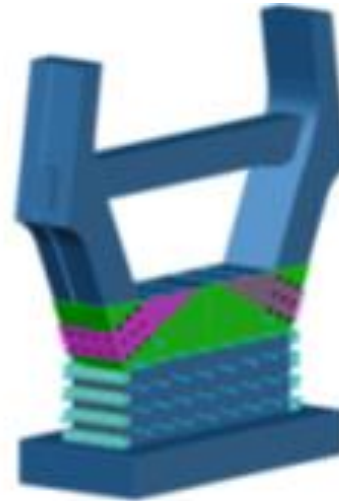
Batardeau non représenté

Solution B - corsetage métal / béton précontraint

- Phasage des travaux :

Phases 9 et 10 :

- Carottage des réservations pour précontrainte transversale dans l'embase
- Repiquage ou hydro démolition légère des parements
- Injection des fissures

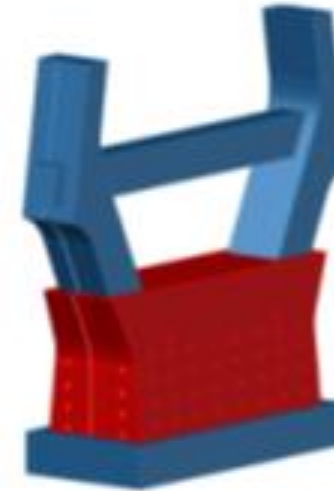


Phases 11 à 13 :

- Mise en place des éléments métalliques
- Mise en tension des barres de précontrainte dans la partie supérieure de l'embase
- Pose des gaines pour les câbles 4T15

Phases 14 et 15 :

- Réalisation du béton
- Mise en tension des barres et câbles de précontrainte



Phases 16 et 17 :

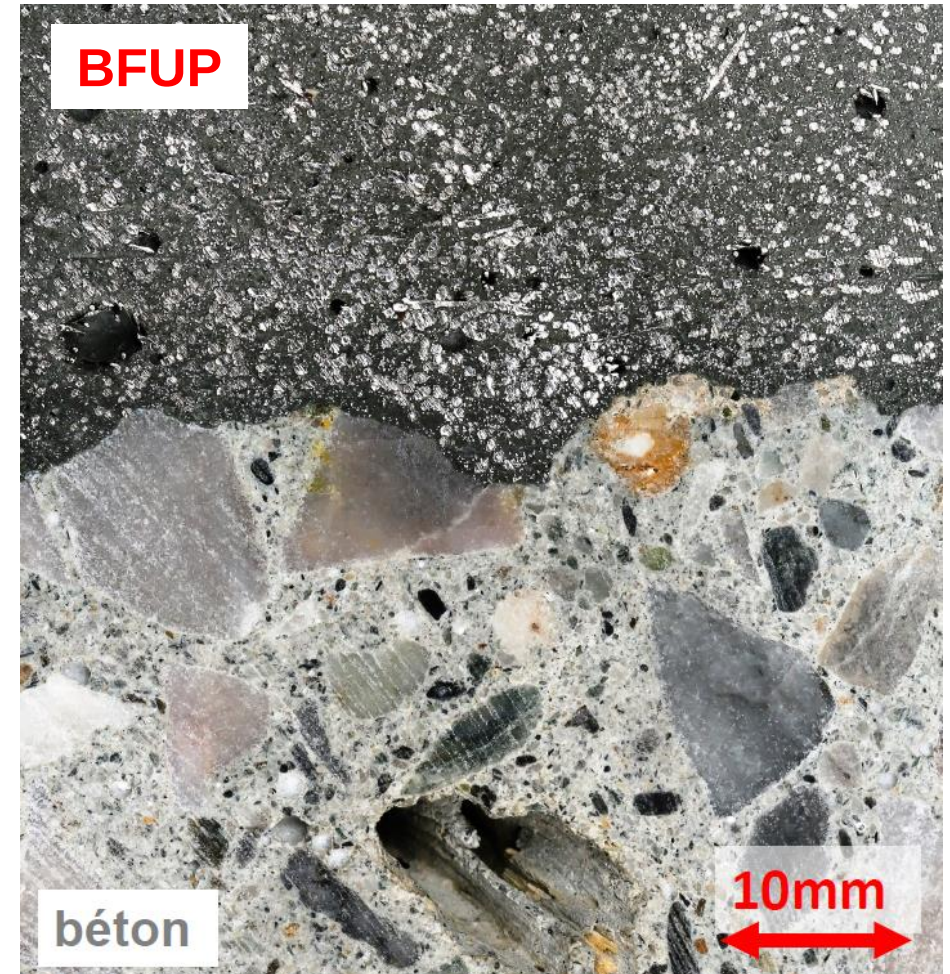
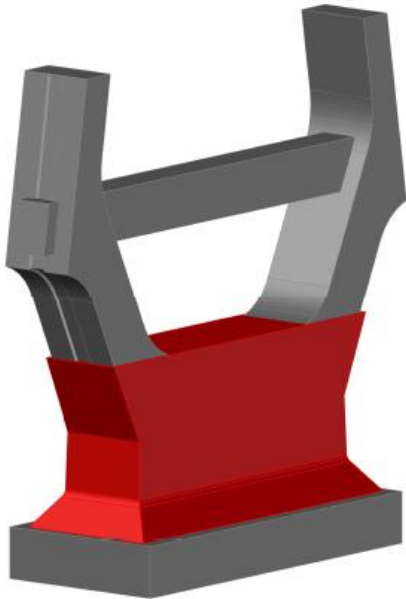
- Cachetage des ancrages de précontrainte
- Recepage du batardeau

Solution C - corsetage BFUP

- Objectifs atteints :
 - Limitation des venues d'eau et protection des armatures existantes contre la corrosion
 - Renforcement passif de l'embase
- Travaux prévus :
 - Semelle : injection des fissures
 - Embase : corsetage par un béton fibré ultra-haute performance armé (BFUP armé) épaisseur 10 cm
 - Base des jambes et entretoises : injection des fissures et revêtement souple

Solution C - corsetage BFUP

- BFUP :
 - Porosité très faible
 - Résistances élevées
 - Forte résistance à l'abrasion



Comparaison des solutions : atteinte des objectifs

Objectif des traitements		<u>Solution A :</u> Injections de fissures et ceinturage en CCC	<u>Solution B :</u> Corsetage précontraint	<u>Solution C :</u> Corsetage BFUP
Limitations des venues d'eau	Résistance à l'abrasion, usure, ...	Moyenne =	Très bonne +	Très bonne +
	Résistance aux chocs (embâcles, ...)	Non -	Oui +	Oui +
	Durabilité globale des réparations	Moyenne, les éléments mis en place peuvent se détériorer sur une échelle de quelques dizaines d'année. Mise en œuvre difficile sur béton durablement humide et fissuré. -	Bonne, la précontrainte reste un point de fragilité =	Très bonne +
Limitations mécaniques des gonflements		Non -	Oui en théorie mais l'effort à appliquer est de 5 à 10 MPa alors que la solution applique 1 MPa environ =	Oui partiel de par la résistance passive du corsetage et la résistance post-fissuration du BFUP =
Renforcement de la structure	Renforcement interne de l'embase	Non =	Oui +	Non =
	Confinement extérieur de l'embase	Oui une direction =	Oui deux directions +	Oui une direction =
	Répartition de la descente de charge verticale sur la semelle	Non -	Oui +	Partiellement =

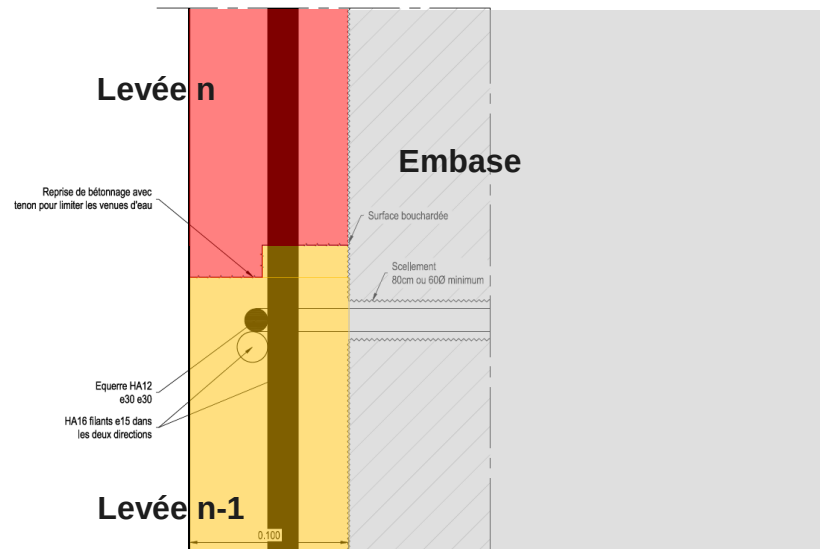
Comparaison des solutions : coût et impacts

Autres critères de choix	<u>Solution A :</u> Injections de fissures et ceinturage en CCC	<u>Solution B :</u> Corsetage précontraint	<u>Solution C :</u> Corsetage BFUP
Coût € HT	Env. 3.2 M€ =	Env. 4.2 M€ -	Env. 3.2 M€ =
Impact sur la circulation	Faible, un trottoir neutralisé et accès ponctuels pour livraison =	Faible, un trottoir neutralisé et accès ponctuels pour livraison =	Faible, un trottoir neutralisé et accès ponctuels pour livraison =
Impact environnemental loi sur l'eau	Oui + Phase provisoire	Oui - Phase prov et définitive	Oui + Phase provisoire
Impact navigation fluviale	Oui phase provisoire =	Oui phase provisoire =	Oui phase provisoire =

⇒ **Solution corsetage BFUP retenue à l'issue de l'AVP**

Conception du corsetage en BFUP

- **En réponse à l'objectif de limitation des venues d'eau :**
 - Le BFUP est intrinsèquement un matériau adapté (utilisé en étanchéité)
 - Limitation des points « faibles » que sont les joints ou reprises :
 - ✓ Solution coulée en place plutôt que préfabriquée
 - ✓ Traitement des reprises de bétonnage : réalisation d'un tenon

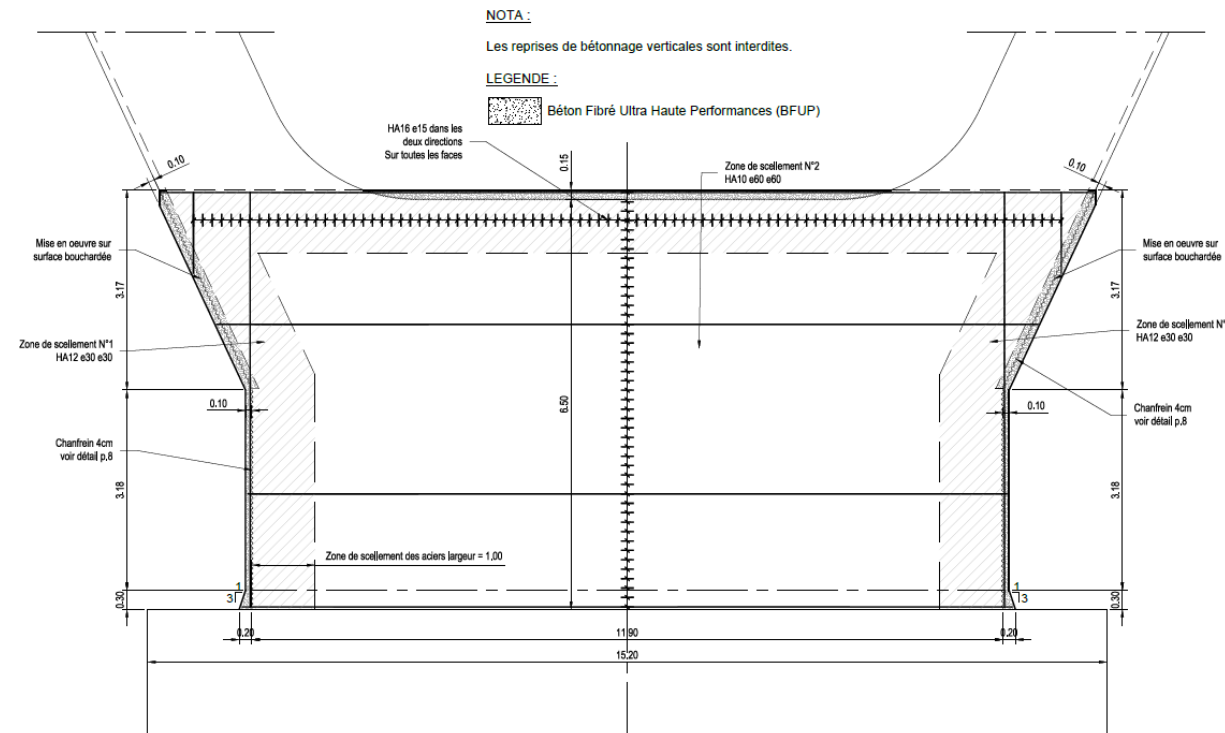


Conception du corsetage en BFUP

- **En réponse à l'objectif de confortement de l'embase :**
 - Capacité du corsetage à reprendre une partie des charges verticales si nécessaire :
 - ✓ Création d'une structure adhérente et liaisonnée au béton de l'embase : réalisation de nombreux scellements d'armatures
 - ✓ Solution coulée en place plutôt que préfabriquée
 - ✓ Gousset à la base (doublement de l'épaisseur) pour assurer une meilleure transmission de la descente de charge vers la semelle
 - Capacité du corsetage à reprendre un éventuel effort d'expansion de l'embase :
 - ✓ Résistance élevée à la traction et caractère écrouissant du BFUP pour bénéficier d'une résistance post-fissuration
 - ✓ Mise en place d'un ferrailage passif en plus de l'action des fibres
- ⇒ Épaisseur 10 cm sur la périphérie de l'embase et 15 cm sur le dessus de l'embase

Conception du corsetage en BFUP

- **Prise en compte du retrait :**
 - Les BFUP font généralement un retrait important
 - Valeur de 5.5×10^{-4} pris en compte en phase conception
 - Dimensionnement de l'accrochage du retrait sur l'embase => scellements d'aciers plus dense



Conception du corsetage en BFUP - Synthèse

- Les contraintes techniques recoupent souvent plusieurs objectifs du projet :

Prescriptions de conception	Étanchéité	Confortement de l'embase	Limitation effet du retrait
Reprises de bétonnage verticales interdites Reprises horizontales avec tenons et mortaises	X	X	
Réservation pour fixation du coffrage interdites	X		
Scellements entre le corsetage et l'existant		X	X
Coulage en place	X	X	
Ferraillage passif redondant et imposé + scellements + bouchardage de la surface		X	X
Gousset en partie basse		X	
Caractère écrouissant T3	X	X	X