

IMGC

LA DURABILITÉ DE LA PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE

Journée Technique
Vendredi 27 septembre 2018
FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS

AFGC
Association Française de Génie Civil



Les Viaducs du Boulonnais

Pathologies, Diagnostics, Réparations

Yannick Jeanjean – Sanef
Jean-Bernard Datry - *Setec TPI*

Sommaire

RAPPEL HISTORIQUE
PRÉSENTATION DES OUVRAGES
CONSTATS

- Festonnage gaine
- Déchirure gaine section courante
- Fissuration blocs déviateurs hauts
- Reprise des réparations sur gaines
- Ouvertures gaines _ constats sur l'état des coulis et torons
- Cas des zones sans pathologie avancée : réparations A et B
- Cas des zones avec corrosion :
  - > type de raccords
  - > neutralisation zone
  - > réduction circulation
  - > investigations / tension résiduelle

MODELISATIONS -> Phasage de remplacement

DEPOSE DES CABLES :

- Détente « brutale » câbles très corrodés
- Détente contrôlée

REMPLACEMENT DES CABLES

Historique

1996 / 1997 – Construction des 3 ouvrages / marché conception construction

- Bouygues / Norpac / Demathieu et Bard _ MOE Scetauroute (Egis)
- Architecte Pierre Louis Carlier

2006-2009 : réfection proctection anticorrosion des bracons

2013 : traitement intérieur résine des têtes de piles

Février 2012 : Gaine déchirée : Investigations IFSTTAR / CETE sur la précontrainte

Juillet 2012 : Constat fissuration blocs déviateurs hauts _ mise sous surveillance renforcée avec essai de chargement pour définition seuils alerte

2013 : Modélisation et recalcul blocs hauts _ réunion de clôture Décembre 2012

2014 : Reprise complexe étanchéité roulement viaduc d'Echinghen

2015 : Reprise complexe étanchéité roulement viaducs Quehen et Herquelingue

Réfection système anticorrosion platines hautes et basses des diagonales

Historique

2016/2017 - Reprise des réparations des gaines de précontrainte extérieure

- MOE : Egis
- Contrôle extérieur / AMO : IFSTTAR et CEREMA Nord
- Travaux : Bouygues TPRF

Octobre 2017: Constat de corrosion sur plusieurs câbles

- MOE Egis / travaux Bouygues TPRF
- Neutralisation voies lentes et interdiction circulation PL

Décembre 2018 – Juin 2018 : Sécurisation des câbles

- Fin de reprise des travaux de réparation gaines
- Fin de sécurisation des câbles : blocs amortisseurs et treillis pour éviter fouettement
- Fin Juin : réouverture circulation PL

Juillet 2018 : Travaux de dépose des câbles corrodés

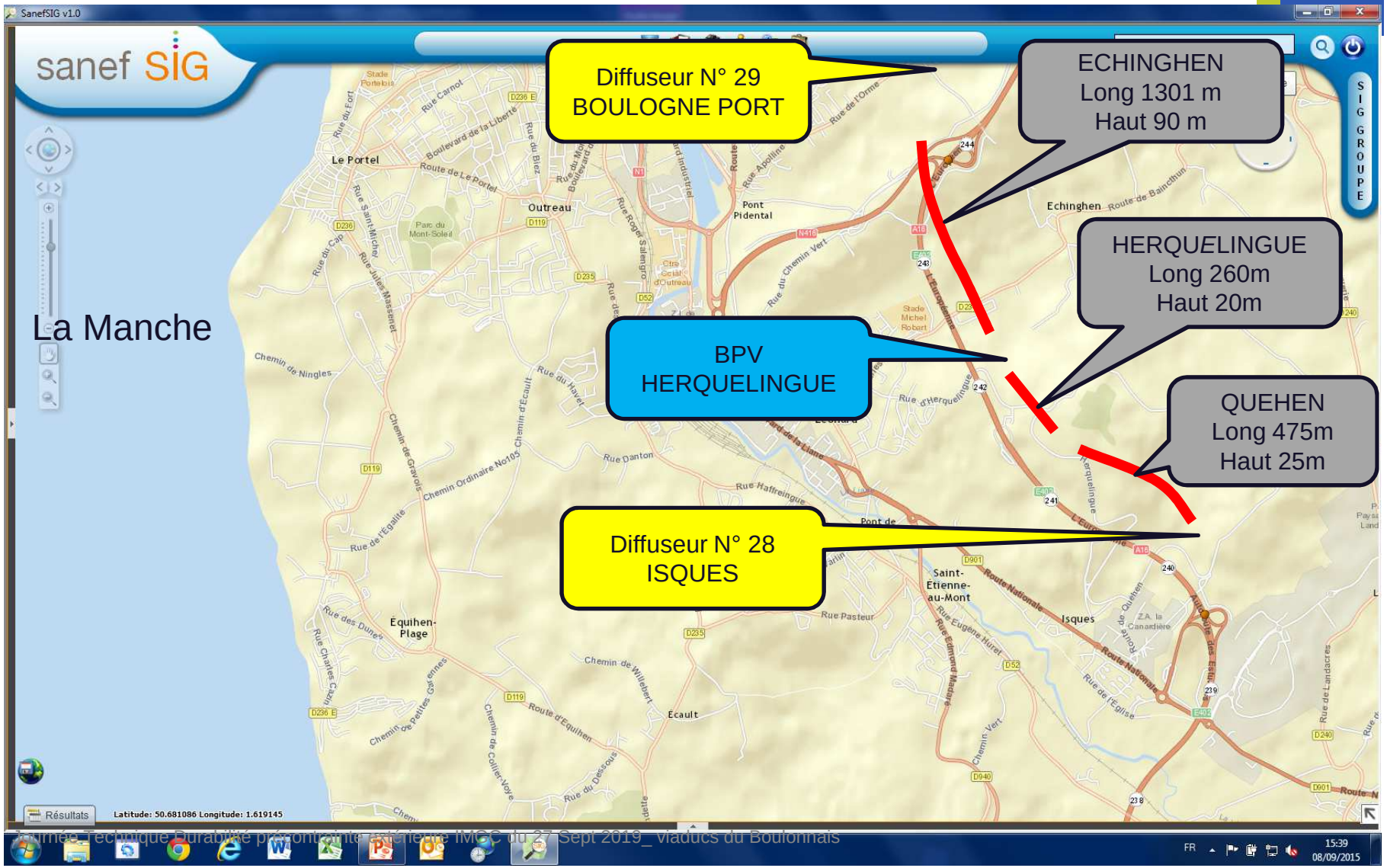
- MOE Setec / Travaux Freyssinet

Mai 2019 : Travaux de repose des câbles

- MOE Setec / Travaux Etic

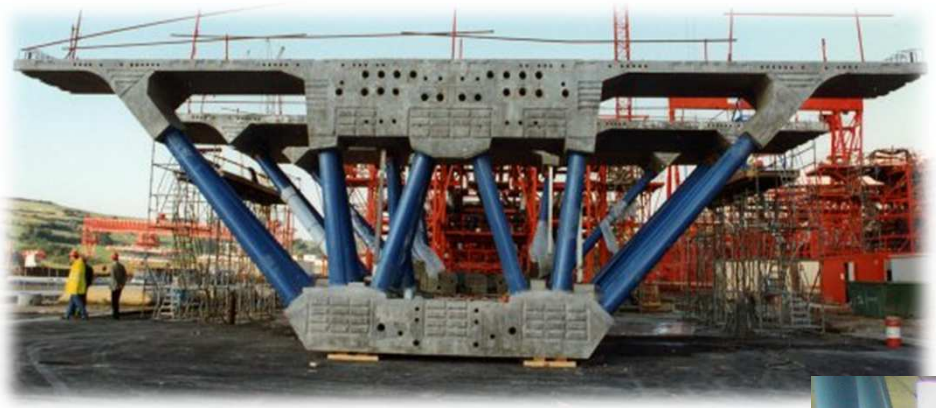
PRESENTATION DES VIADUCS

Situation


SanefSIG v1.0
sanef SIG
Diffuseur N° 29
BOULOGNE PORT
ECHINGHEN
Long 1301 m
Haut 90 m
HERQUELINGUE
Long 260m
Haut 20m
BPV
HERQUELINGUE
QUEHEN
Long 475m
Haut 25m
Diffuseur N° 28
ISQUES
La Manche
Le Portel
Outreau
Pont
Pidental
Echinghen
Route de Baincthun
Rue du Chemin Vert
Rue d'Herquelingue
Rue Danton
Rue Haffreingue
Chemin de Ningles
Chemin Ordinaire No105
Rue de l'Egalité
Rue des Dunes
Équihen-
Plage
Chemin de Willebert
Ecault
Route d'Equihen
Rue Pasteur
Saint-
Étienne-
au-Mont
Isques
Route Nationale
Résultats
Latitude: 50.681086 Longitude: 1.619145
15:39
08/09/2015

Présentation des Ouvrages

Viaducs construits par encorbellements successifs par voussoirs préfabriqués .
Ames ajourées par diagonales métalliques.

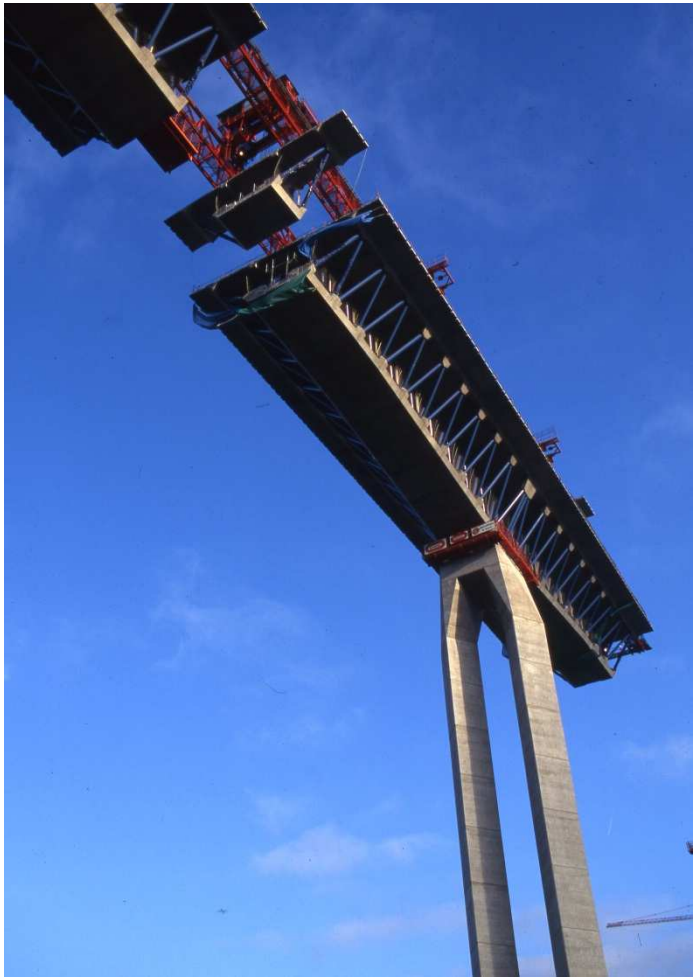




Présentation des Ouvrages

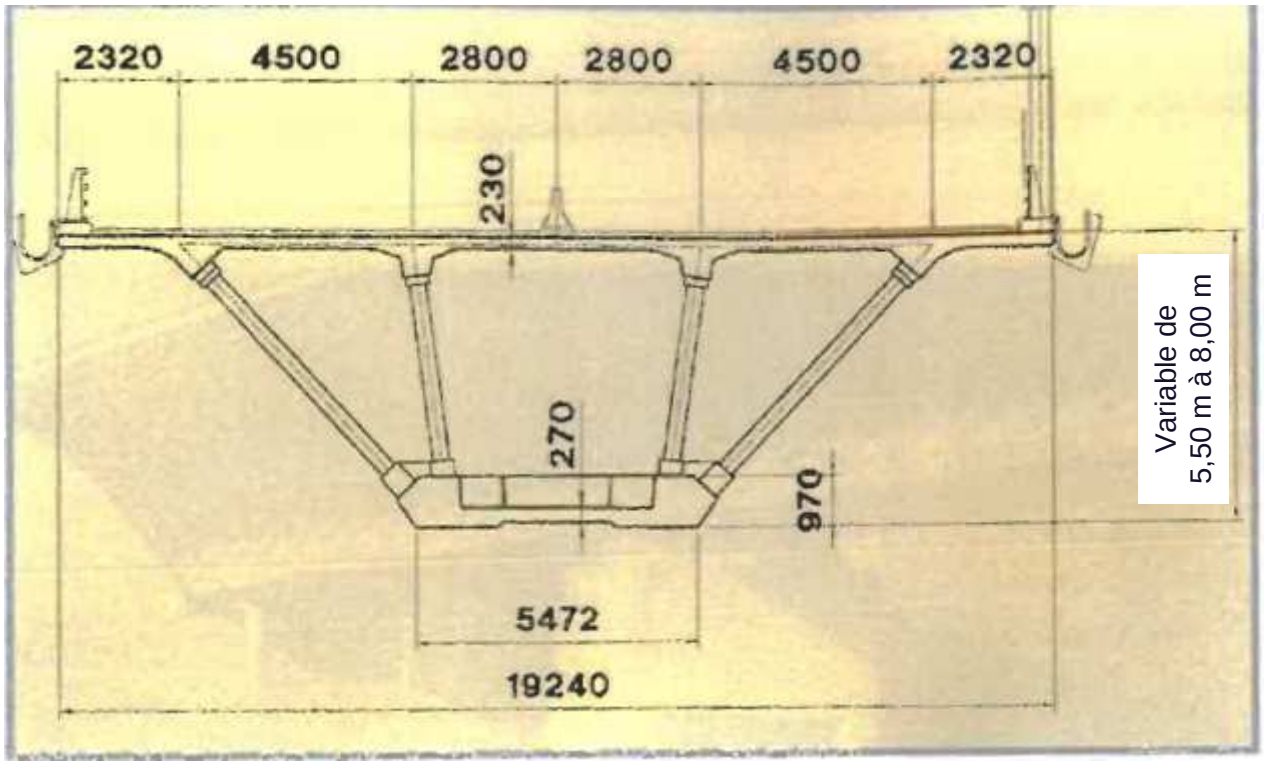
Viaducs construits par encorbellements successifs à voussoirs préfabriqués . Ames ajourées par bracon métallique.





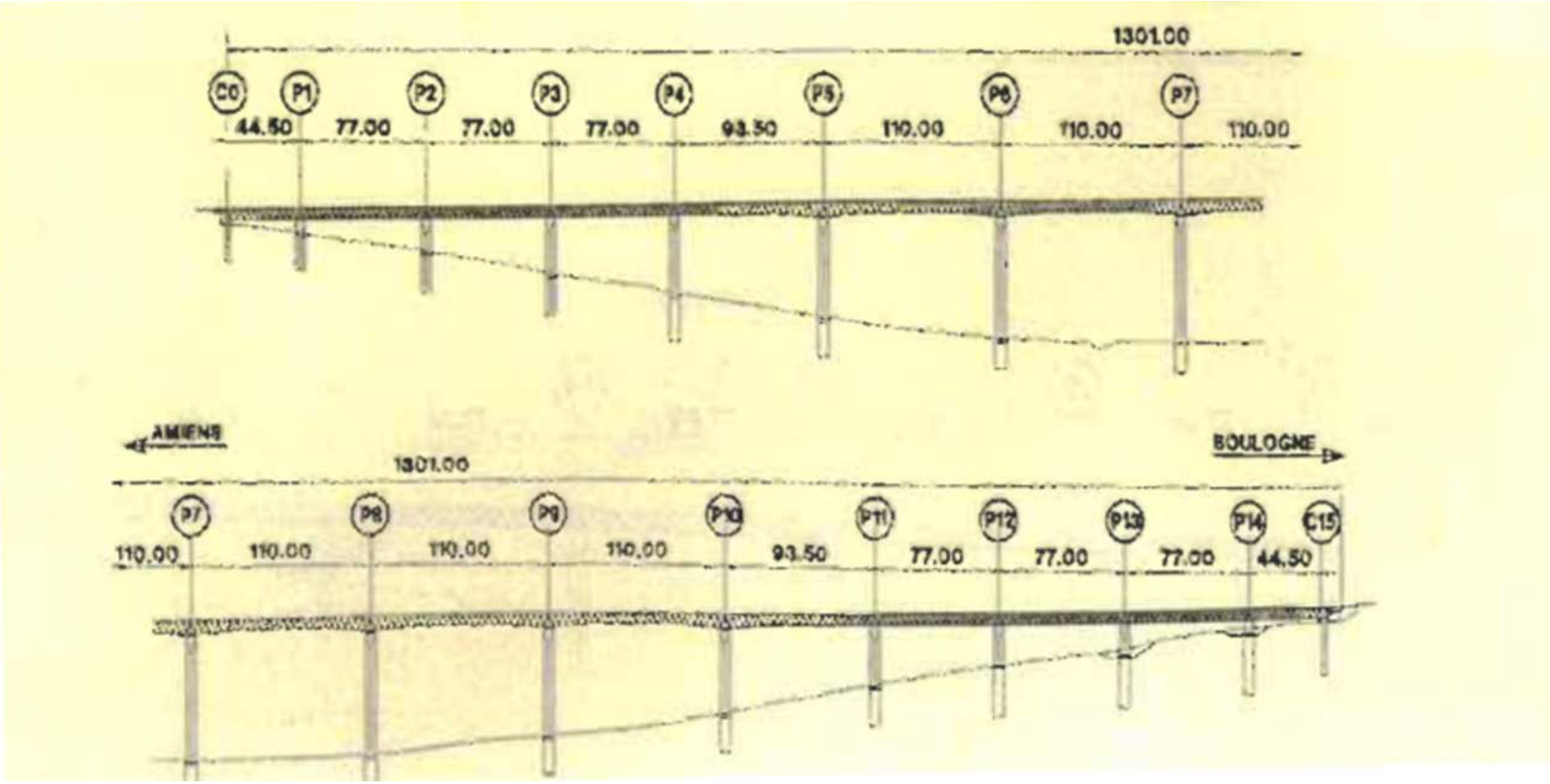
Caractéristiques

Inertie variable pour les travées de 110 m Echinghen, constante pour les autres viaducs _ 2 voies de circulation.



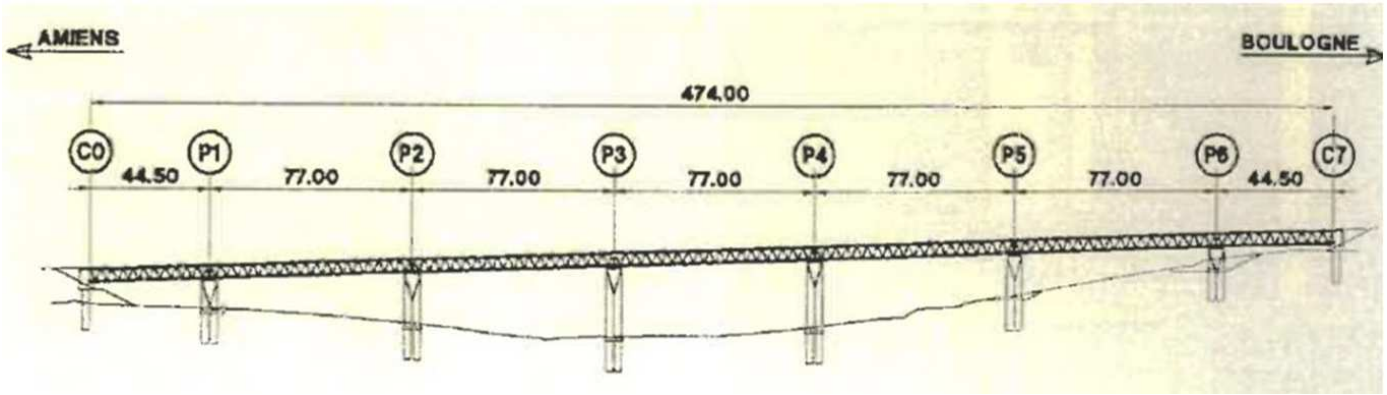
Caractéristiques

Le Viaduc d'Echinghen



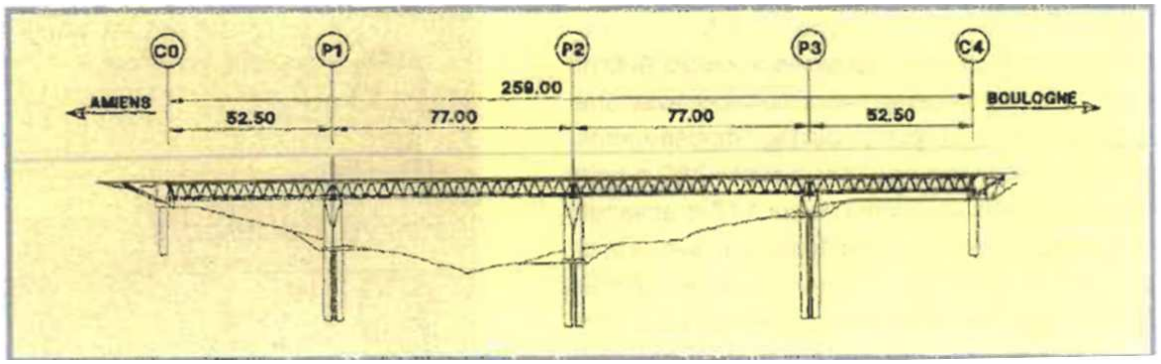
Caractéristiques

Les viaducs de Quehen et Herquelingue



Quehen : 474 m / 7 travées

Herquelingue 259 m / 4 travées



La précontrainte extérieure

Câbles unité 19T15 classe 1860 TBR

Torons clairs dans gaine PEHD

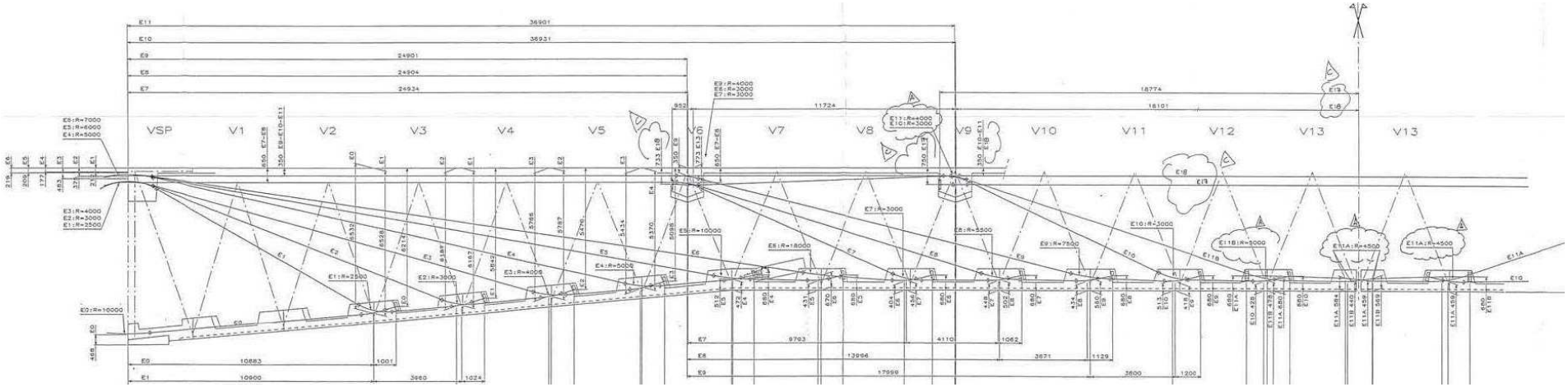
Injection coulis de ciment

Au total (3 viaducs) :

516 câbles et environ 30 km de câblage

Echinghen : 332 câbles _ 18 km
Travées de 110 m : déviation des câbles E7 à E11 dans bloc déviateurs hauts voussoirs V6 et V9





La Précontrainte extérieure Constats

Festonnage gaines
Déchirure gaine
Fissuration blocs déviateur hauts
Reprise des réparations sur gaines
Constat de corrosion

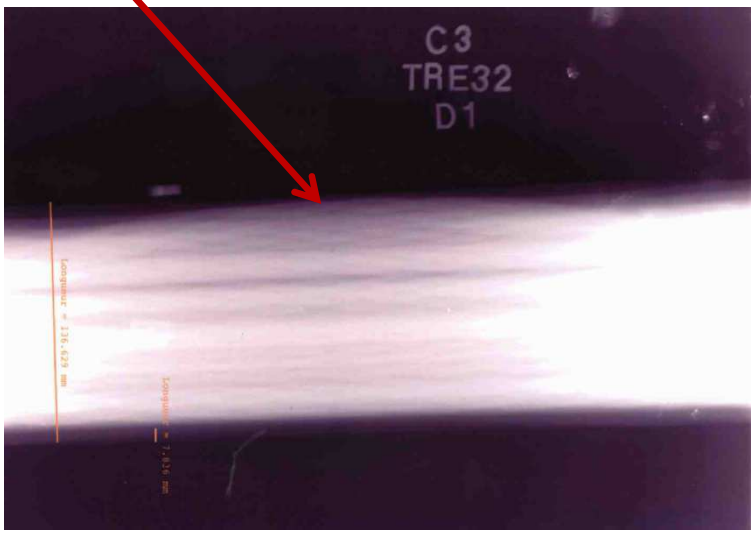
Précontrainte extérieure

Festonnage gaine





Rupture toron _ câble injecté coulis de ciment



Fev 2012 Constat déchirure gaine

Déchirure interne gaine PEHD par toron sans doigt d'enfilage _ expertise des différents matériaux.



Juillet 2012 : Constat Fissuration blocs déviateurs hauts









Reprise des réparations sur gaines

Reprise des réparations sur gaines

Evaluer l'origine de ces réparations et protéger sur le long terme









Reprise des réparations des gaines

Objectifs

Reprendre les raccords de gaines ayant fait l'objet de mise en place de protection par ruban adhésif.

Essais préalables

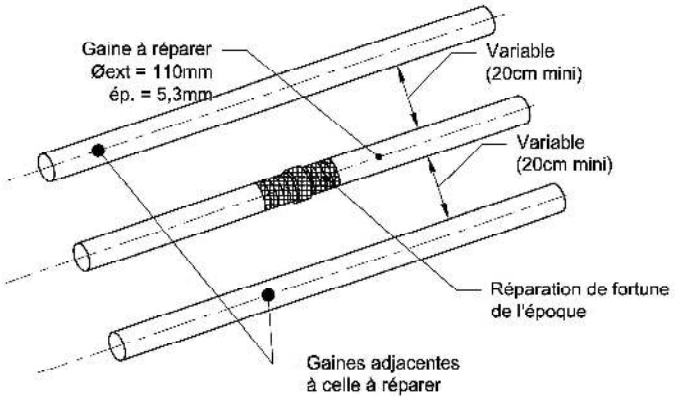
Ouverture gaines : constat du coulis et taux de chlorure

Les différents types de reprises :

- Type A : soudure gaine PEHD de diamètre supérieure
- Type B : coque inox pour les zones non accessibles pour soudure

Principe de reprise

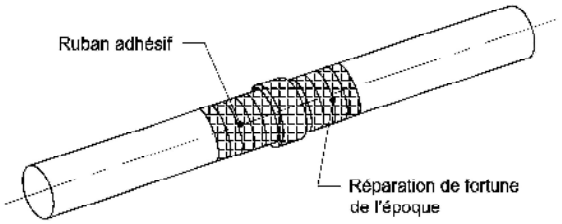
2 Solutions de réparation _ type A Gaine PEHD soudée



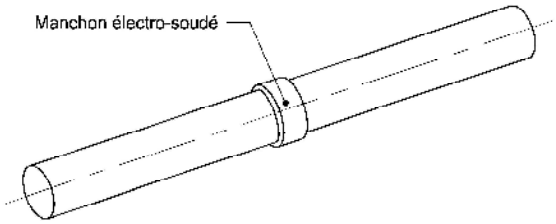
Configuration de réparation type A
Echelle : 1/25



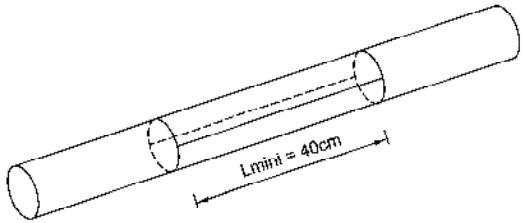




Etape 1: Dépose des rubans adhésifs
de la réparation de fortune



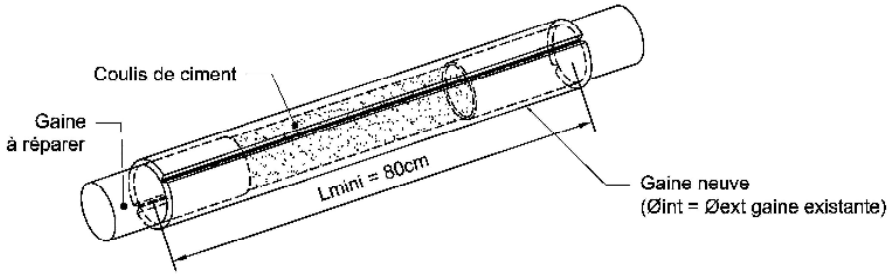
Etape 2: Dépose/Découpe du manchon
électro-soudé ou du manchon vissé



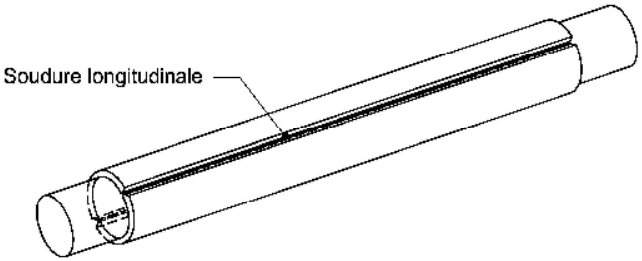
Etape 3:
- Découpe pour dépose gaine existante
- Prélèvement coulis de ciment (non systématique)

Principe de reprise

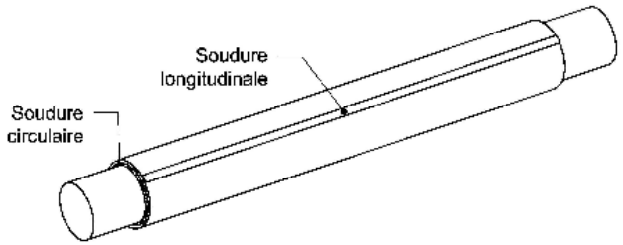
Type A Gaine PEHD soudée



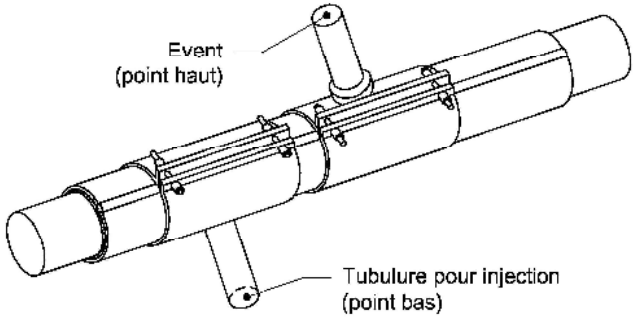
Etape 4: Mise en place de deux demie-coquilles
(tronçon de gaine neuve)



Etape 5 : Réalisation des deux soudures longitudinales
(soudures bout à bout par extrusion)



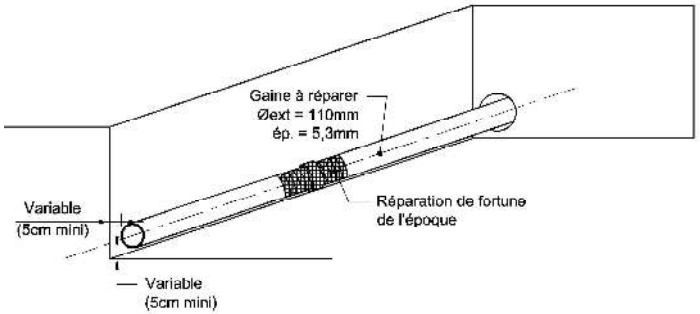
Etape 6 : Réalisation des deux soudures circulaires
(soudures d'angle par extrusion)



Etape 7 : Injection souple de type "cire pétrolière"

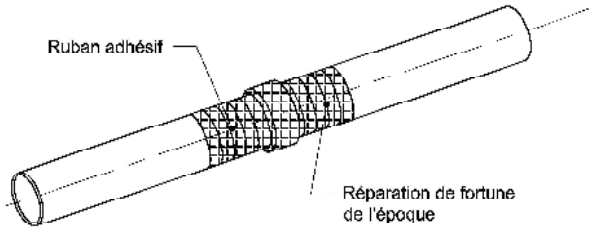
Principe de reprise

Type B Coque Inox

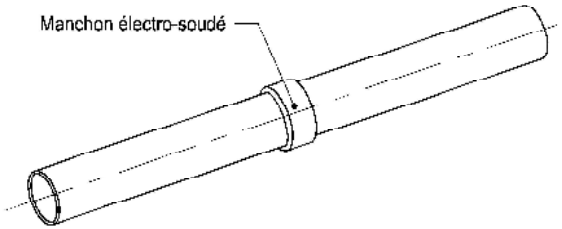


Configuration de réparation type B
Echelle : 1/25

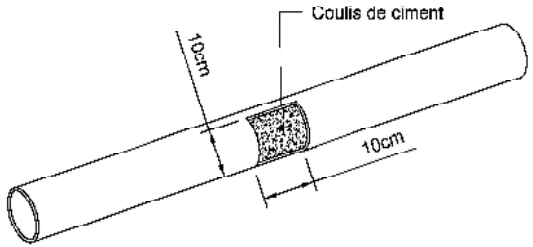




Etape 1: Dépose des rubans adhésifs de la réparation de fortune



Etape 2: Dépose/Découpe du manchon électro-soudé ou du manchon vissé

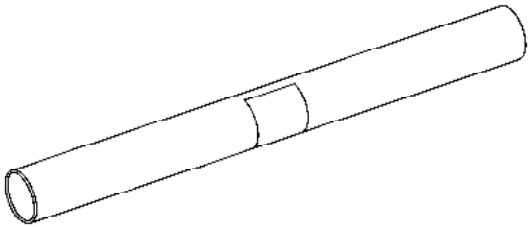


Etape 3:

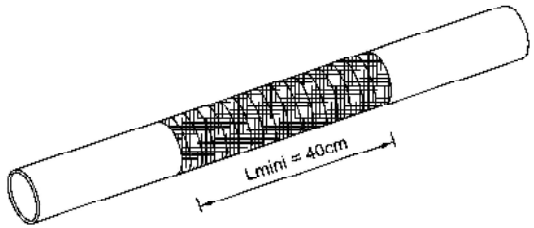
- Réalisation d'une fenêtre préalable pour prélèvement coulis de ciment (non systématique)
- Prélèvement coulis de ciment (non systématique)

Principe de reprise

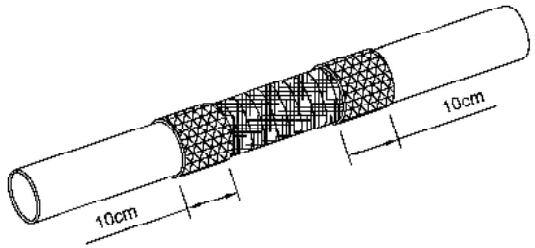
Type B Coque Inox



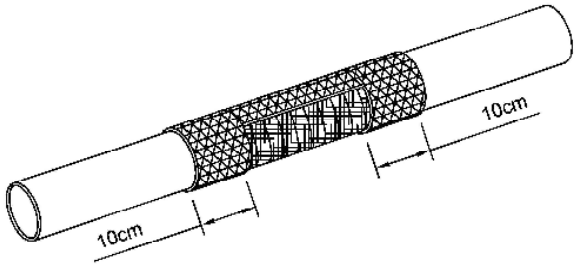
Etape 4: Fermeture fenêtre de prélèvement par soudures par extrusion



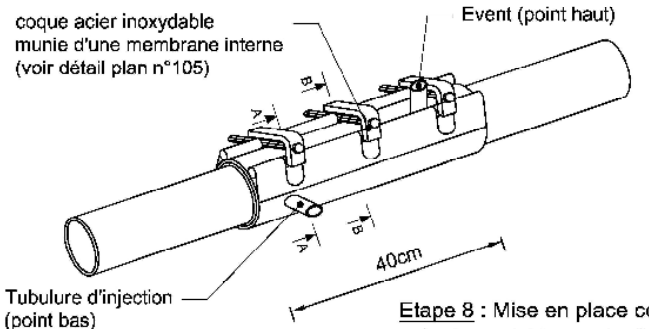
Etape 5 : Mise en oeuvre ruban autovulcanisant (2 couches)



Etape 6 : Mise en oeuvre bandes élastomère aux extrémités de la réparation



Etape 7 : Mise en ouvre bande élastomère longitudinale (qui sera au niveau de la fermeture de la coque)



Etape 8 : Mise en place coque métallique en acier inoxydable munie d'une membrane élastomère interne et de tubulures pour injection (Voir détail plan n°105)

Etape 9 : Injection souple de type cire pétrolière

Ouverture des gaines



Cas réparation type A



Cas réparation type B

Ouverture des gaines

Réparation type A







Réparation type A







Réparation type A







Réparation type A





Réparation type B









CORROSION CABLES

Intervention avant rupture de cable

Octobre 2017 _ Constat corrosion

Sous rubans adhésifs avec manchon





1 T 2 fils rompus + 2 corrodés
1 T 1 fil rompue + 3 corrodés
Câble à traiter

1 T rompu – 1 T 4 fils rompus - 1 T 3 fils rompus – 4 T avec 10 fils rompus
Câble à remplacer





Constat corrosion - gaine fendue sous double manchons



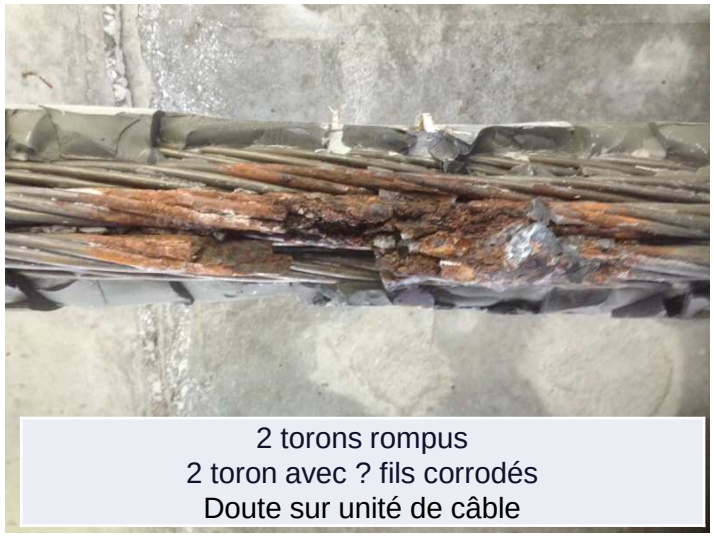




5 Torons rompus , 46 fils corrodés

Constat corrosion - gaine fendue sous manchon d'injection





2 torons rompus
2 toron avec ? fils corrodés
Doute sur unité de câble



Constat corrosion - gaine fendue sous manchon d'injection







Constat corrosion – fissuration transversale gaine PEHD

Fissuration gaine à l'entrée d'un bloc déviateur bas





1 toron rompu ;
1 toron avec 3 fils rompus ;
1 toron avec 2 fils rompus et 3 corrodés ;
1 toron avec 1 fil rompu et 3 fil corrodés ;
Torons avec fils corrodés

Investigation Ifsttar Nantes

Objectif : Etat précis du niveau de corrosion

Extrait Tableau de synthèse

Zone observée	Corrosion					Rupture	Total de torons et fils impactés par câble		Récapitulatif par câble *	Photographie annexe 2
	Superficielle	Piqûres	Déformation	Foisonnement	Perte section	Fil	Toron	Fil		
E 4-3-1 E-06 Ouest	-	-	-	-	-	7	3	17	2 torons rompus 1 toron avec 3 fils corrodés	28 et 29
	1	-	3	-	-					
	-	-	-	-	-	7				
E 5-6-10 E-10 Ouest	-	-	-	4	-	3	1	7	1 toron avec 3 fils rompus et 4 fils corrodés 1 toron avec au moins un fil corrodé	30 à 32
	-	-	1	-	-	-				
E 6-5-06 E-09 Ouest	1	-	1	-	1	-	3	6	3 torons avec 2 fils corrodés	33 et 34
	1	-	2	-	-	-				
	1	-	2	-	-	-				
	deux zones avec du coulis couleur rouille				-	-				
E 6-7-08 E-6 Ouest	-	-	2	-	2	-	5	15	1 toron avec 4 fils corrodés 3 torons avec 3 fils corrodés 1 torons avec 2 fils corrodés 1/3 du périmètre n'a pu être observé	35 à 37
	-	-	3	-	-	-				
	-	-	3	-	-	-				
	-	-	3	-	-	-				
	-	-	2	-	-	-				
E 6-7-9 E-10 Ouest	2	-	2	-	2	-	2	6	1 toron avec 4 fils corrodés 1 toron avec 2 fils corrodés	38 à 40
	-	-	-	-	-	-				
	-	-	2	-	-	-				
Q 1-2-01 E-09 Est	1	-	1	-	4	-	4	13	1 toron avec 5 fils corrodés 1 toron avec 4 fils corrodés 1 toron avec 3 fils corrodés 1 toron avec 1 fil corrodé	41 à 43
	1	-	-	-	-	-				
	-	-	-	-	-	-				
	-	3	-	-	-	-				
	2	-	-	-	-	-				
	-	-	-	-	-	-				
	-	-	4	-	-	-				
	-	-	-	-	-	-				
	-	1	-	-	-	-				
Q 3-4-02 E-07 Est	-	3	-	-	-	-	2	4	1 toron avec 3 fils corrodés 1 toron avec 1 fil corrodé	44 à 46
	-	1	-	-	-	-				
Q 3-4-02 E-07 Ouest	-	-	-	3	2	2	4	23	1 toron avec 2 fils rompus et 5 fils corrodés 2 torons avec 6 fils corrodés 1 toron avec 4 fils corrodés	47 et 48
	-	-	1	2	3	-				
	-	-	1	2	3	-				
	-	-	4	-	-	-				
* Les récupitulatifs n'intègrent pas les oxydations superficielles										

Bilan des câbles à remplacer

Seuil admissible de corrosion pour laisser le câble

Unités 19 T 15 : à examiner au cas par cas suivant l'étendue du nombre de torons impacté ; avec un seuil maximal retenu avec le Comité Technique de 7 fils rompus pour laisser le câble en place. Au-delà de ce seuil le câble est déposé.

13 câbles à déposer dont 2 sur le viaduc de Quehen (hors nouveau constat)

2 câbles à risque à la limite de la rupture → détente brutale mise en œuvre

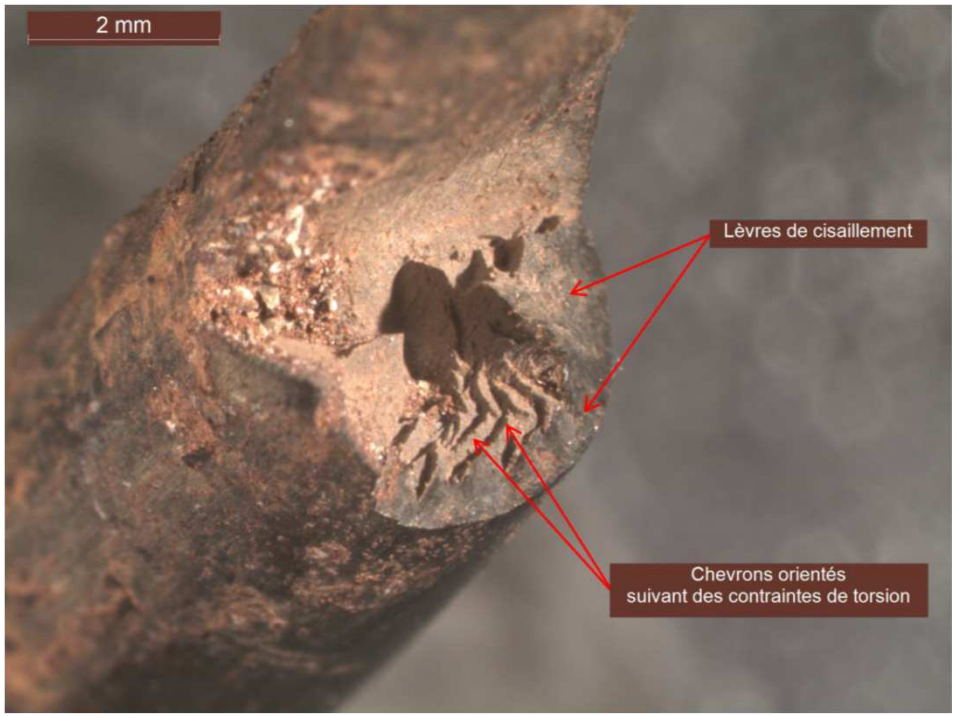
Bilan des câbles à remplacer- extrait

Objectif : Bilan câbles corrodés / actions à engager

N° de repérage	Câble n°	Fléau sur pile N°	Zone corrodée sur voussoir n°	Total de torons et fils impactés par câble		Récapitulatif par câble *	Blocs déviateur haut traversés (VSP, V6, V9)	Câble sécurisé	Actions
				Toron	Fil				
1	E06 OUEST	P4	E 4-3-1	3	17	2 torons rompus 1 toron avec 3 fils corrodés	VSP	NON	Câble à déposer
2	E01 OUEST	P4	E 4-5-1	9	47	1 toron avec 1 fils rompu et 6 fils corrodés ; 5 torons avec 6 fils corrodés ; 1 torons avec 5 fils corrodés ; 2 torons avec 3 fils corrodés ; **Le nombre de fils corrodés est important, mais avec une seule rupture et de nombreuses zones de piqûres, le risque de rupture à court terme est donc à relativiser.**	VSP	OUI	Câble à déposer
A	E10 OUEST	P5	E 5-6-10	3	12	1 toron avec 4 fils rompus et 3 corrodés ; 1 toron avec 4 fils corrodés ; 1 toron avec 1 fil corrodé	VSP + 2 V6 + 2 V9	NON	Câble conservé (à surveiller)
B	E09 OUEST	P6	E 6-5-6	3	6	3 torons avec 2 fils corrodés	VSP + 2 blocs V6	NON	Câble conservé
3	E06 OUEST	P6	E 6-7-8	5	15	1 toron avec 4 fils corrodés 3 torons avec 3 fils corrodés 1 torons avec 2 fils corrodés 1/3 du périmètre n'a pu être observé	VSP	NON	Câble à déposer
C	E10 OUEST	P6	E 6-7-9	2	6	1 toron avec 4 fils corrodés 1 toron avec 2 fils corrodés	VSP + 2 V6 + 2 V9	NON	Câble conservé
4	E2 EST	P7	E 7-6-3	5	22	1 toron rompu ; 1 toron avec 3 fils rompus ; 1 toron avec 2 fils rompus et 3 corrodés ; 1 toron avec 1 fil rompus et 3 fil corrodés ; Toron avec fils corrodés	VSP	OUI	Câble à déposer
5	E9 EST	P7	E 7-6-8	5	23	1 toron avec 3 fils rompus et 4 fils corrodés ; 1 toron avec fils rompus et fils corrodés ; 1 toron avec 1 fil rompu et 3 fils corrodés ; 1 toron avec 4 fils corrodés ; 1 toron avec 2 fils corrodés	VSP + 2 blocs V6	OUI	Câble à déposer

Investigation Ifsttar Nantes

Objectif : cinétique de rupture



Ces ruptures résultent d'un processus de corrosion sous contrainte (corrosion localisée type caverneuse et assistée par des contraintes mécaniques composées). L'augmentation du nombre de fils rompus entraine une surcharge des autres fils intacts, qui les rendent d'autant plus sensibles au phénomène.

Tension résiduelle des câbles

Cohérence entre modélisation et vérification in situ. Investigation par méthode vibratoire Cerema Bordeaux.

Modélisation : l'effet du fluage est très sensible sur ce type de structure avec un nombre important de câbles pour assurer la reprise de l'effort tranchant en fibre inférieure.

Les câbles ont été tendus à 0,8 Frg, en prenant en compte le fluage à 20 ans, la tension résiduelle des câbles se situe dans une fourchette de 0,60 Frg à 0,65 Frg .

Mesure des tensions résiduelles par méthode vibratoire suivant méthode LPC 35

Evaluation faite hors zone neutralisée sur câble intègre.

Détermination du poids linéique du câble et des longueurs libres

Détermination fréquence et tension résiduelle en résultant

Tension résiduelle des câbles

Cohérence entre modélisation et vérification in situ. Bilan comparatif avec les valeurs de recalcul.

		Tension en kN				
		P2 Est		P2 Ouest		
		Mesure Nord	Mesure Sud	Mesure Nord	Mesure Sud	Moyenne
8 T15S	E1'	1229	1361	-	1317	1302
19 T15S	E1	3171	3487	-	3559	3406
	E2	3132	3149	3153	3141	3144
	E3	3176	3279	3305	3197	3239
	E4	3285	3234	3361	3286	3292
	E5	3329	3300	3339	3424	3348
	E6	3351	3323	3324	3393	3348
	E7	3516	3455	3468	3508	3487
	Moyenne					3323

		Tension en kN
		P5-P6 Ouest
19 T15S	E4	3379
	E5	3247
	E6	3403
	E7	3339
	E9	3284
	E10	3276
	E11	3218
	Moyenne	3307

		Résultats en % fprg				
		P2 Est		P2 Ouest		
		Mesure Nord	Mesure Sud	Mesure Nord	Mesure Sud	Moyenne
8 T15S	E1'	0.55	0.61	-	0.59	0.58
19 T15S	E1	0.60	0.66	-	0.67	0.64
	E2	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
	E3	0.60	0.62	0.62	0.60	0.61
	E4	0.62	0.61	0.63	0.62	0.62
	E5	0.63	0.62	0.63	0.65	0.63
	E6	0.63	0.63	0.63	0.64	0.63
	E7	0.66	0.65	0.65	0.66	0.66
	Moyenne					0.63

		Résultats en % fprg
		P5-P6 Ouest
19 T15S	E4	0.64
	E5	0.61
	E6	0.64
	E7	0.63
	E9	0.62
	E10	0.62
	E11	0.61
	Moyenne	0.62

Les valeurs mesurées sont globalement à l'intérieur ou très proches de la fourchette attendue et estimée en première approche par Egis entre 60 et 65 % de Fprg.

Actions d'urgence prises

- Investigation câbles → risque de rupture brutale avéré
- Interdiction de circuler dans zone critique : 450 m concernée
- Information préfecture et GCA
- Mise en place d'un Comité Technique
- Réduction circulation sur voies rapides uniquement hors poids lourds → Eviter de surcharger les câbles
- Modélisation structure pour vérifier comportement en fonction perte de câbles → fixer un phasage de réparation
- Prise en compte de la tension résiduelle : calculs + méthode vibratoire

MODELISATION OUVRAGE

Egis

Setec TPI _ JB.Datry

Strains pour Freyssinet

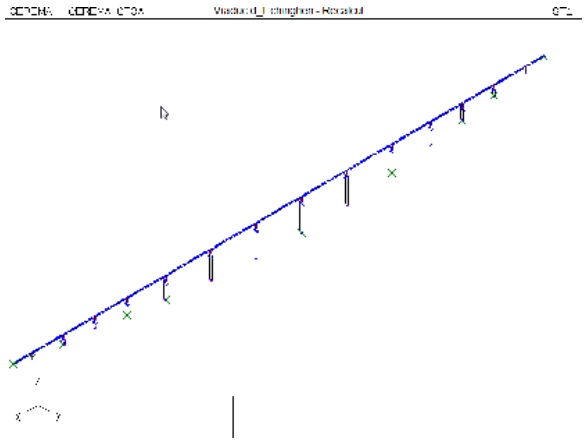
Modélisation Egis sous ST1

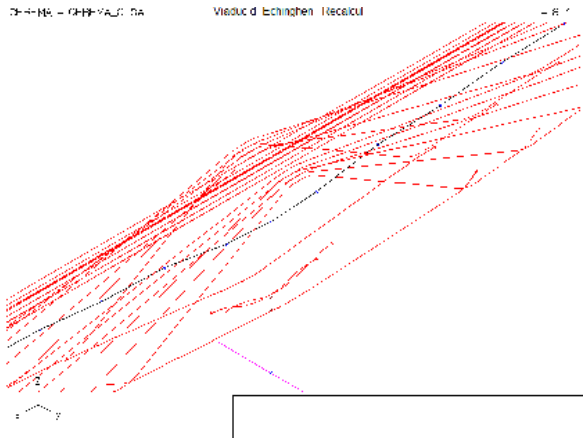
Fixer les contraintes d'exploitation pour limiter le risque de rupture brutale

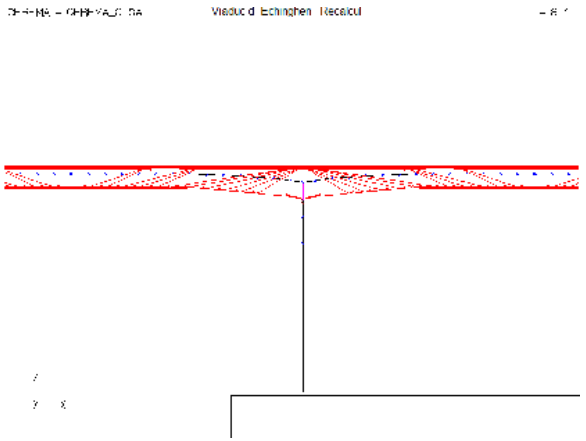
Prise en compte fissuration blocs déviateurs hauts dans le phasage de dépose des câbles

Modélisation : Flexion globale, ST1

- Modèle global incluant :
  - Toute la précontrainte ;
  - Le phasage de construction.
- Etude de la **perte des câbles endommagés**

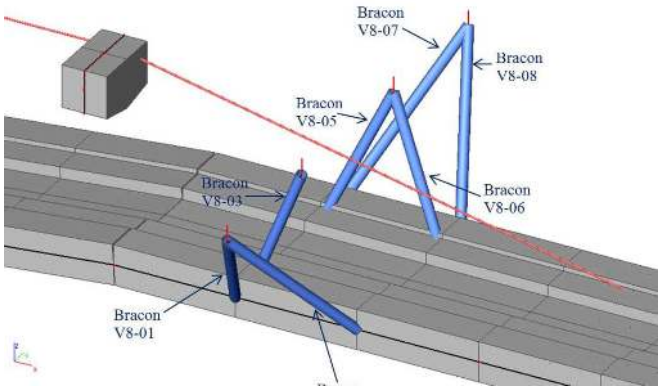


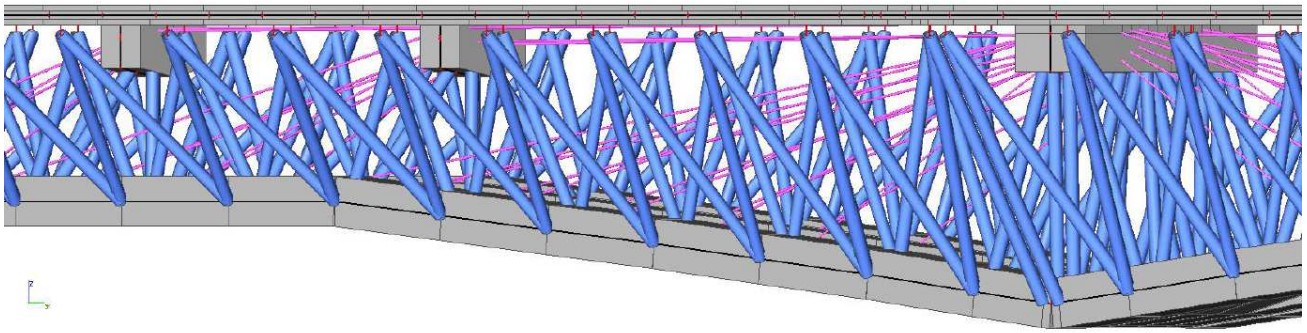




Modélisation : Comportement local, SCIA

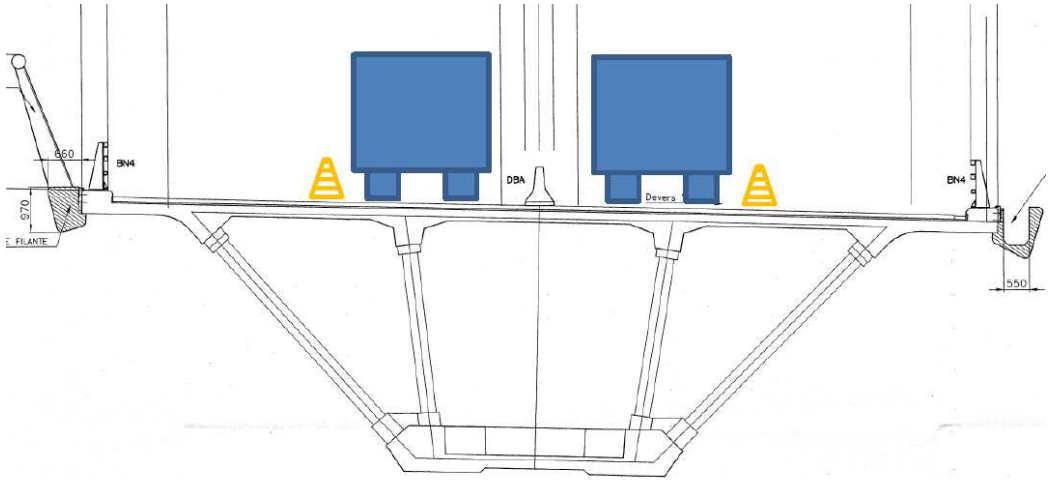
- Etude de l'effet de la **perte d'1 ou 2 bracons métalliques**, concomitante avec la perte d'un câble :
  - Sur les **bracons restants**
  - Sur les **déviateurs hauts**





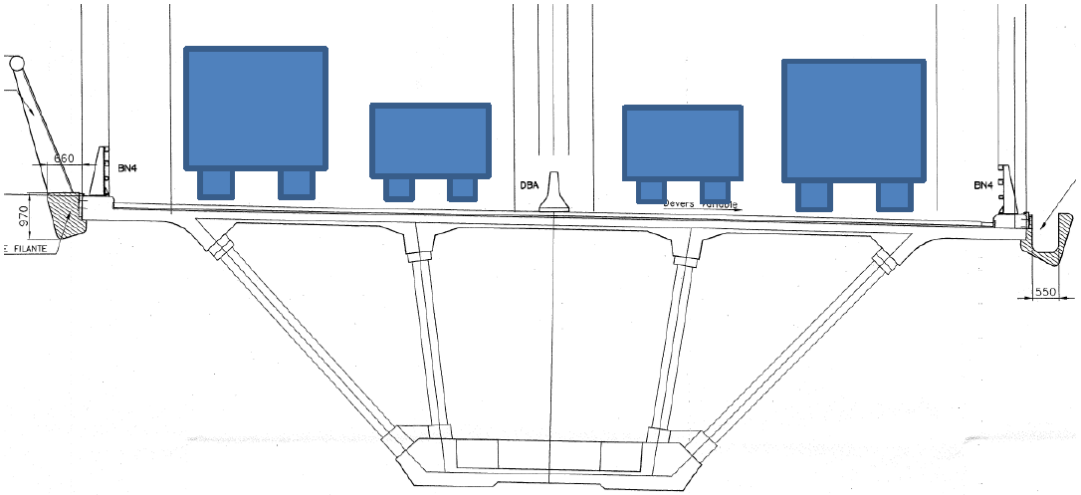
Modélisation : Conclusions

- Sous circulation restreinte : **2 x 1 voie**, avec PL
  - Flexion globale et effort tranchant vérifiés avec la **perte possible de 3 câbles extérieurs sur un même fléau** (rupture accidentelle ou dépose programmée)



Modélisation : Conclusions

- Sous circulation non-restreinte : **2 x 2 voies**, avec PL
  - **Effort tranchant non-vérifié** (au niveau des joints de voussoirs) dés la perte de 2 câbles extérieurs sur un même fléau



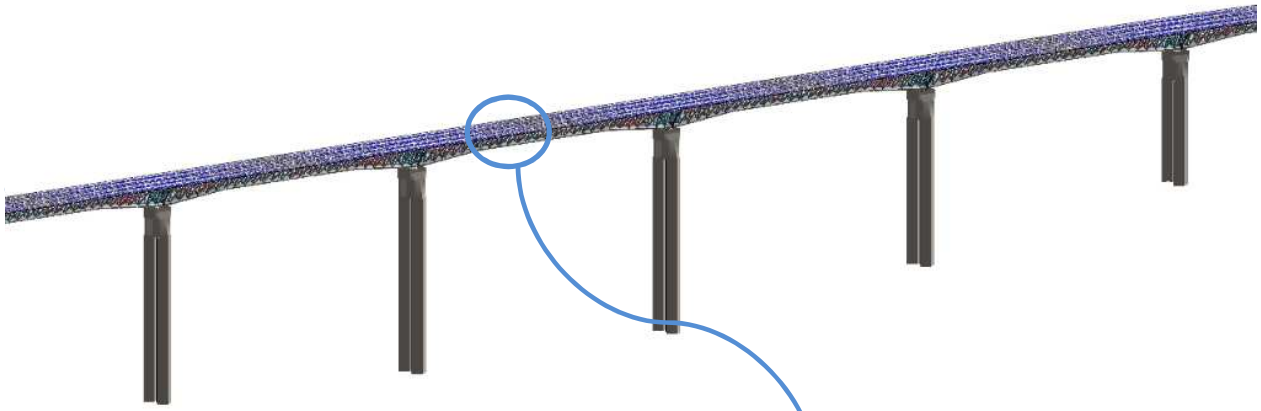
Modélisation Setec sous Pythagore

Modèle tridimensionnel
Validation des conclusions du modèle sous ST1
Niveau de contraintes affiné au droit des joints :

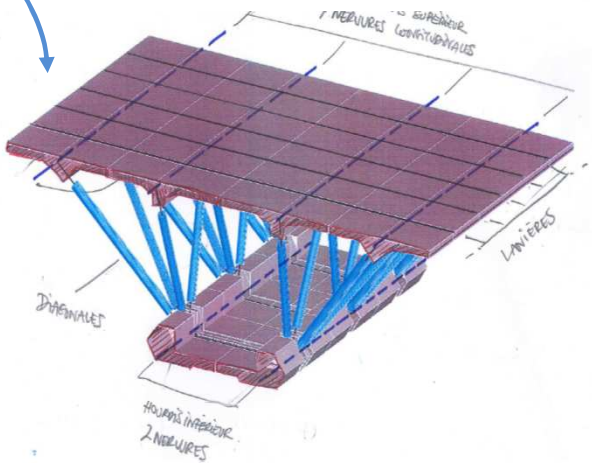
- ✓ Vérification au tranchant
- ✓ Interface avec bloc déviateur haut
- ✓ Modélisation et scenarii étudiés

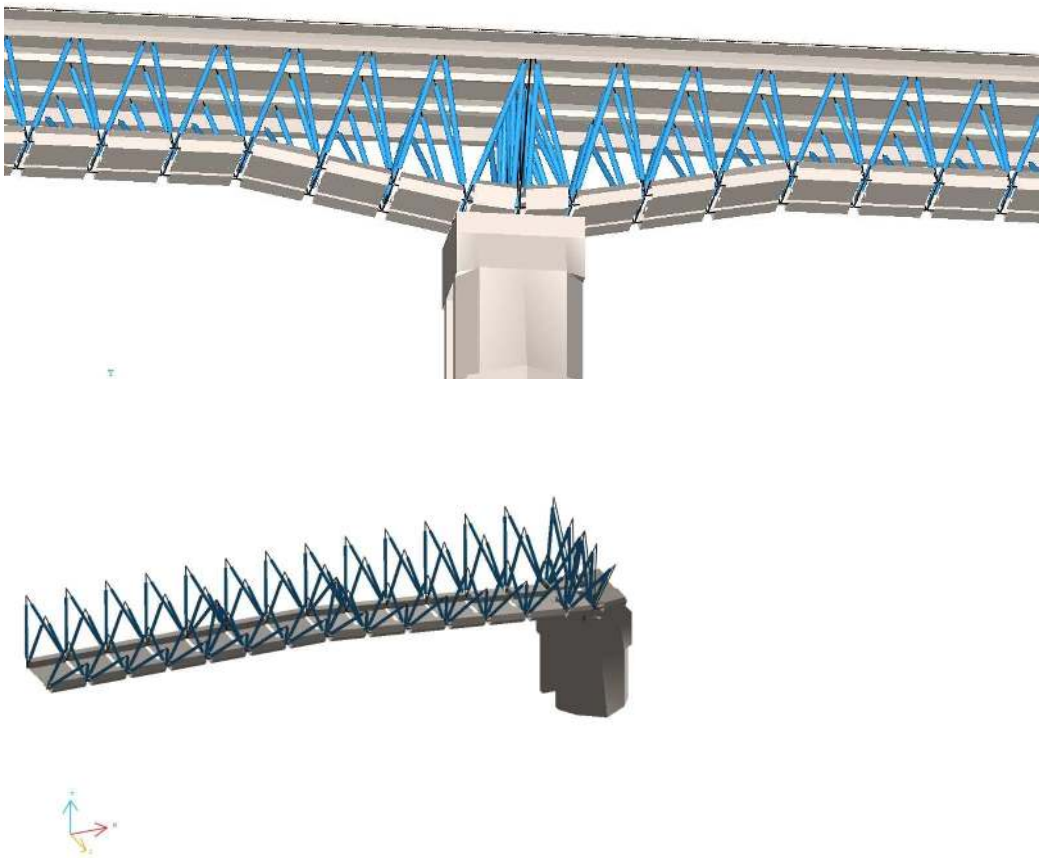
LES AMES TREILLIS

- Le câblage de continuité est extérieur au béton.
- La distorsion des panneaux d'âme sous les effets de l'effort tranchant en treillis implique un renforcement des câbles chapeaux, relevés sur appui.
- la déformation d'un panneau de treillis provoque des moments locaux aux extrémités des diagonales et des flexions supplémentaires des hourdis supérieurs et inférieurs, qui sont les points faibles du viaduc.
- Le relevage des câbles a donc une importance particulière dans ce type de conception.
- Les études paramétriques conduites par Setec tpi pour APRR les viaducs de Sylans et des Glacières, à diagonales de béton, montrent que ces structures présentent cependant une certaine redondance, du fait des plans multiples d'âmes.
- un contre-calcul de l'ouvrage a été réalisé.



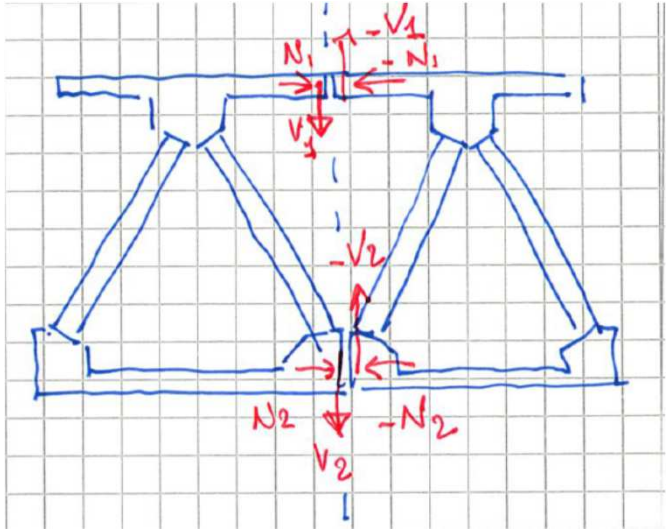
Hourdis supérieur et inférieur sont modélisés par grillages de poutres





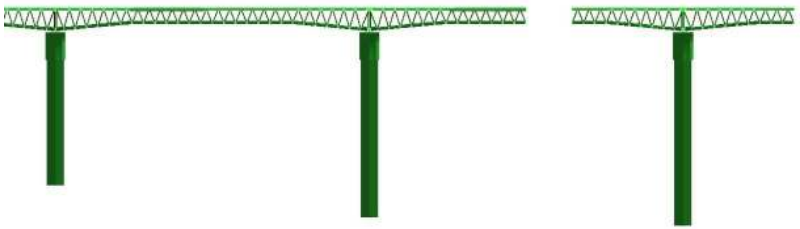
Résistance à l'effort tranchant

- L'effort tranchant général V peut être décomposé en V1, passant dans le hourdis supérieur et V2, passant dans le hourdis inférieur.
- Les diagonales convergent sur le joint de voussoir.
- V1 est faible devant V2.



La précontrainte







1392 câbles de précontrainte

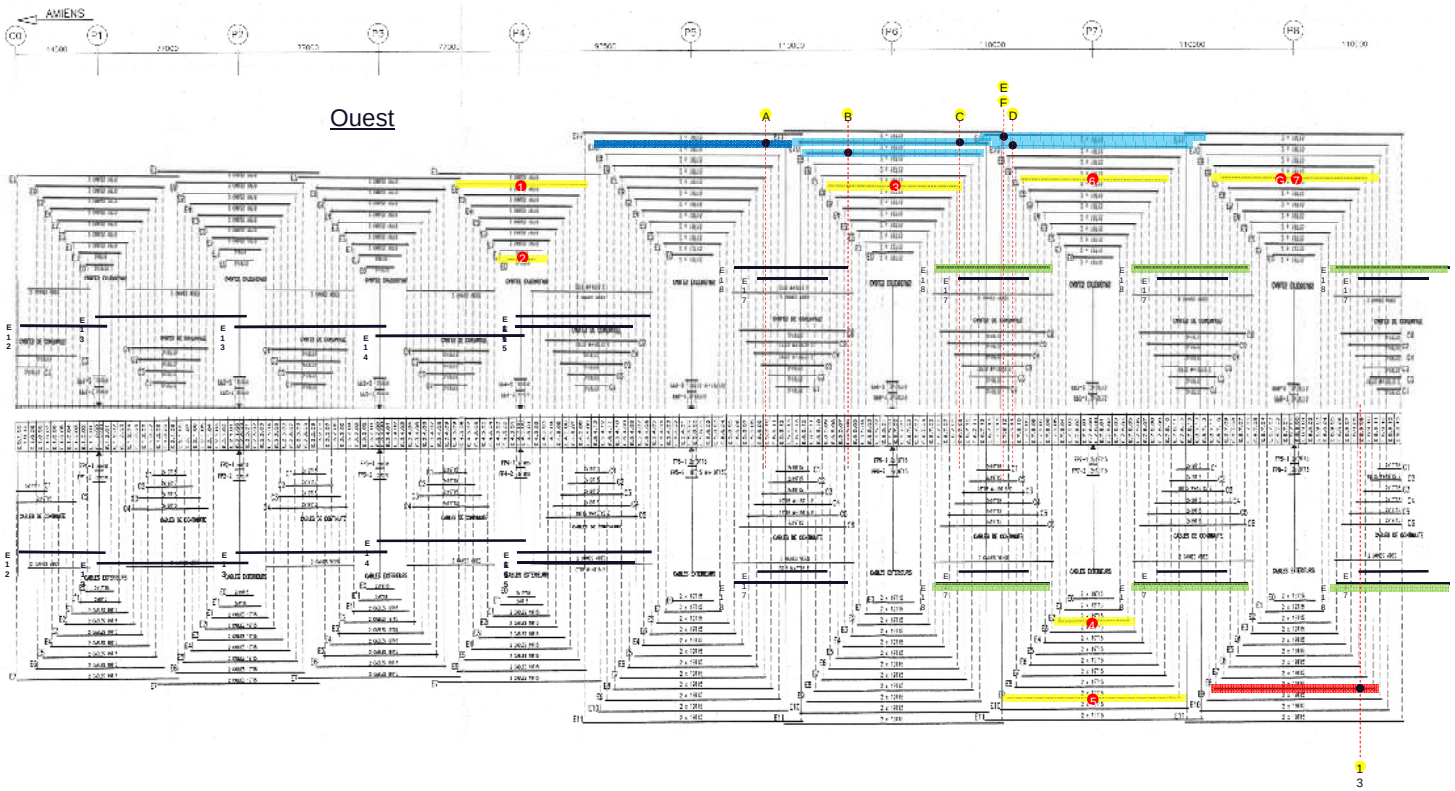
Câbles de fléau

Câbles de continuité

Câbles Extérieurs

Câbles de clouage temporaire

Schéma de câblage

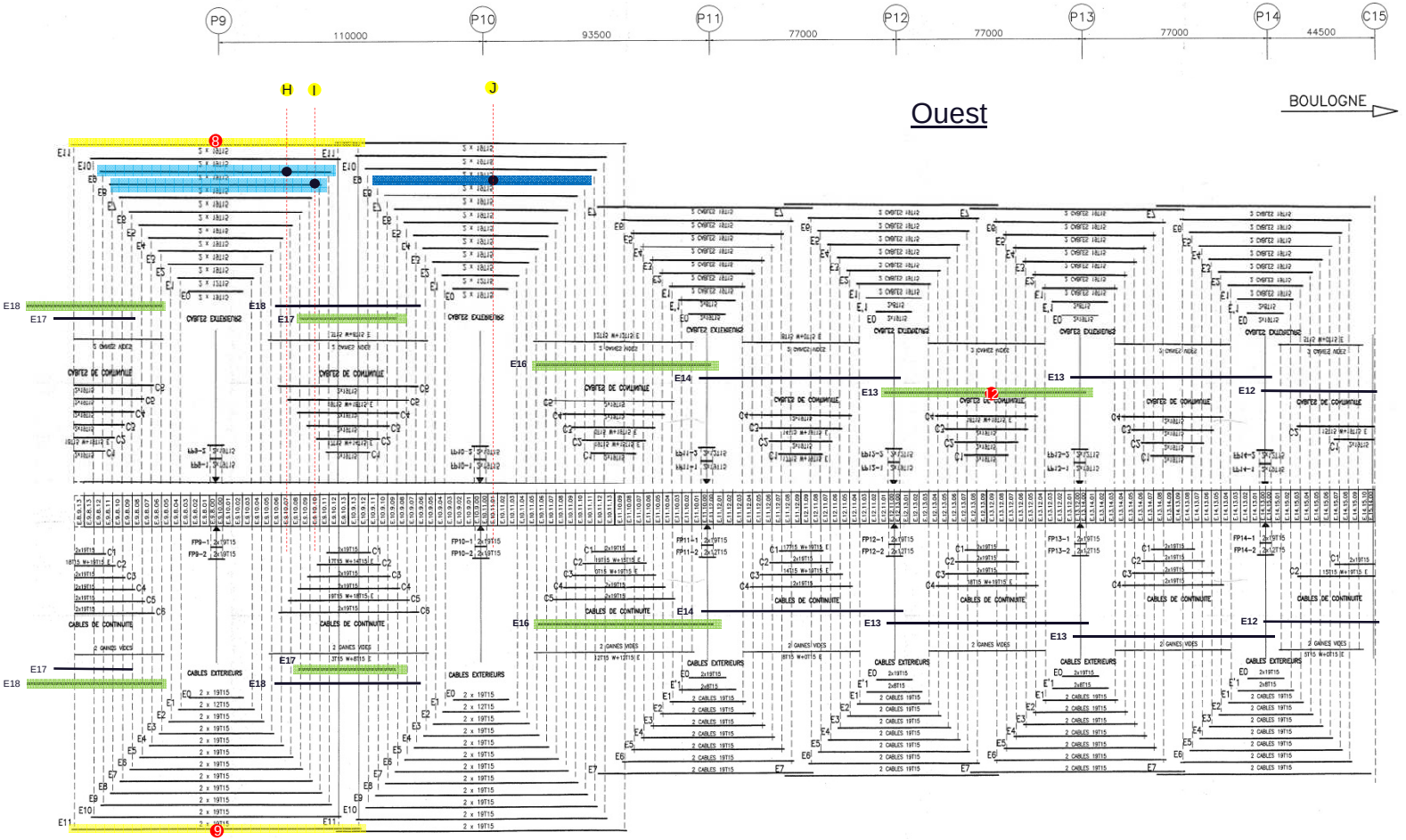


Câble à déposer (non sécurisé)
Câble faiblement corrodé
Câble droit déposé / non reposé
Câble déposé / à reposer
Câble à surveiller
Zone de constat

Mise à jour au 21/06/2019 (indice D)

- Mise à jour des câbles déposés et à reposer
- Rajout d'un câble à déposer (non sécurisé) E8 Est sur P8

Schéma de câblage



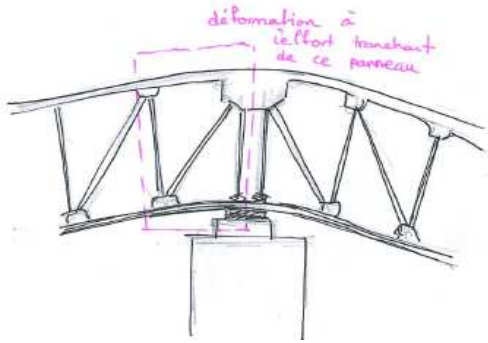
Modélisation EF

- **Phasage de Construction**
- **Recalcul de l'Ouvrage - Sollicitation en Service**
- **Scénarios de ruine → 18 scénarii**
- **Vérification du bloc déviateur haut**

Validation du modèle EF + vérification de de précontrainte résiduelle avec les mesures sur site + relever les points de vigilance pour la prochaine étape

Points de vigilance:
- Diagonale en acier
- Ancrages des diagonales





Scénarii de pertes des câbles

18 Scenarii étudiés

- **Dépose maitrisée:**
  - Voie lente neutralisée
  - Exploitation normale
- **Rupture accidentelle:**
  - Voie lente neutralisée
  - Exploitation normale

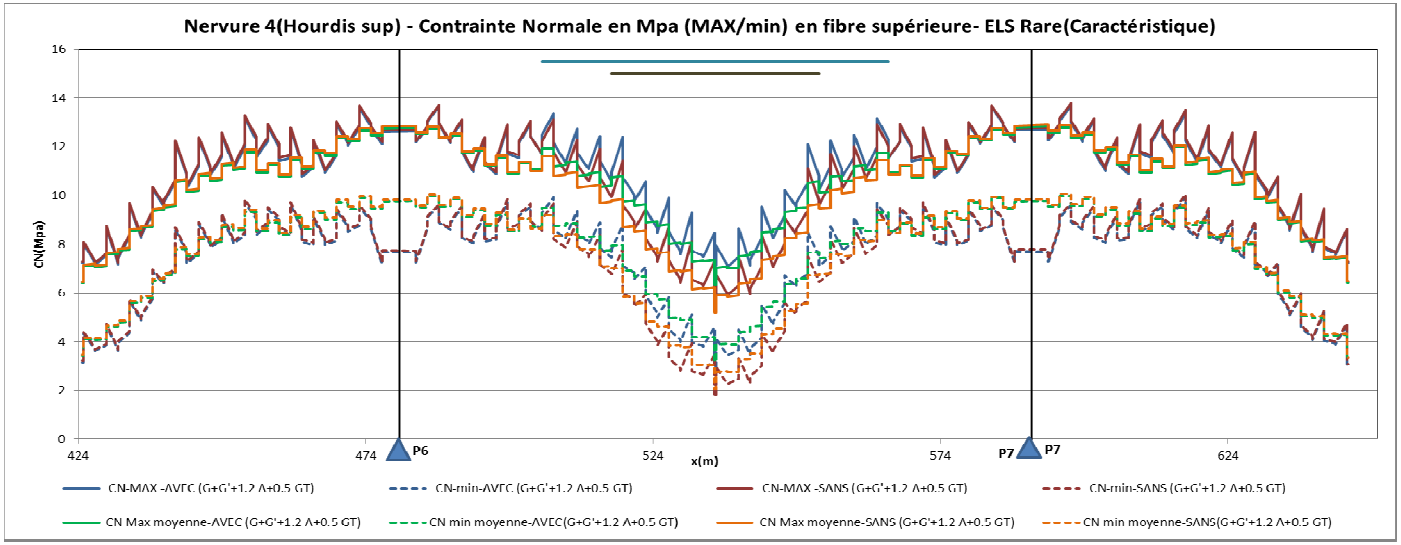
Les critères de vérification:

- Joints entre les voussoirs doivent rester comprimés
- Diagonales en acier
- Ancrage des diagonales

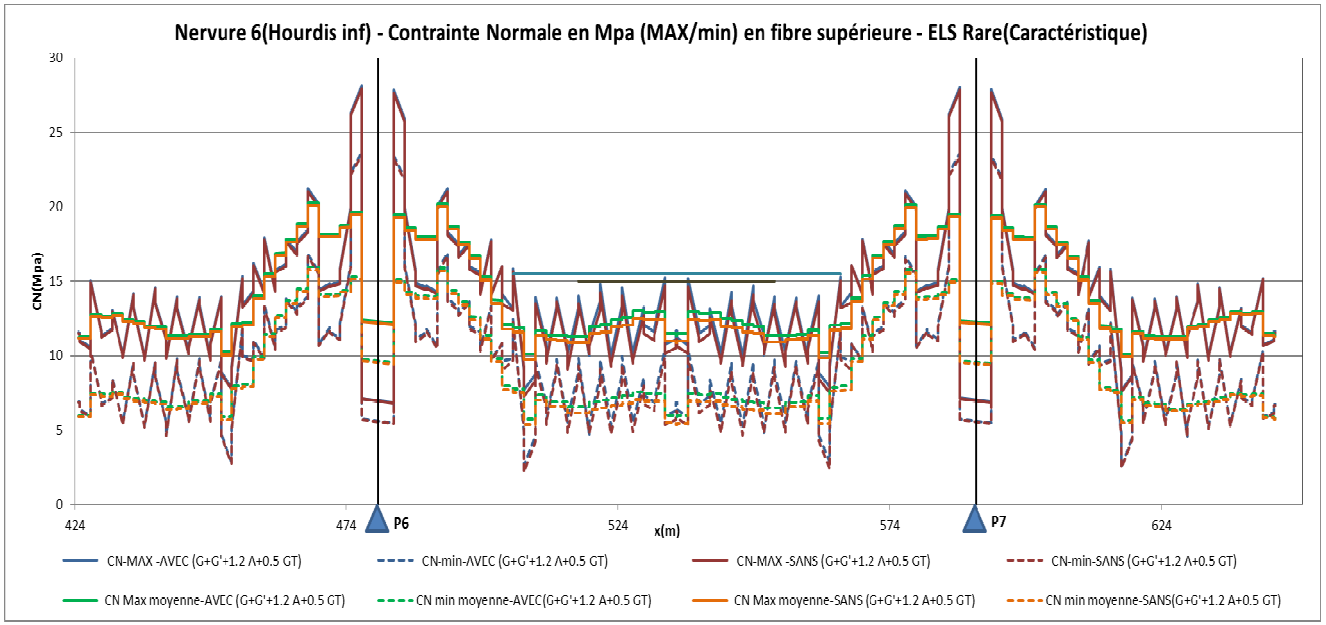
18 Scenarii étudiés

N° scénario	Câble supprimé	Dépose maitrisée	Rupture Accidentelle	Câbles E17-E18 préalablement déposés	Voie lente neutralisée	Exploitation normale
1	E17-E18 entre P6 et P7	x		-		x
2	E9 Est sur P7	x		oui, entre P6 et P7	x	
3	E9 Est, E7 Ouest sur P7	x		oui, entre P6 et P7	x	
4	E9 Est, E7 Ouest, E2 Est sur P7	x		oui, entre P6 et P7	x	
5	E9 Est, E7 Ouest, E2 Est sur P7, E11 Est sur P9, E8 Est sur P10, E6 Ouest sur P4	x		oui, entre P5 et P10	x	
6	E9 Est sur P7		x	oui, entre P6 et P7	x	
7	E2 Est sur P7		x	oui, entre P6 et P7	x	
8	E11 Ouest sur P7		x	oui, entre P6 et P7	x	
9	E9 Est sur P7		x	oui, entre P6 et P7		x
10	E2 Est sur P7		x	oui, entre P6 et P7		x
11	E11 Ouest sur P7		x	oui, entre P6 et P7		x
12	E9 Est, E7 Ouest, E2 Est sur P7, E11 Est sur P9, E8 Est sur P10, E6 Ouest sur P4	x		non	x	
13	E17-E18 entre P6 et P7 en construction	x		-	-	-
14	E17-E18 entre P5 et P11	x		-		x
15	E11 Ouest et Est sur P9	x		oui, entre P5 et P10 + E16 entre P10 et P11	x	
16	E6 Ouest sur P6	x		oui, entre P5 et P10	x	
17	E5 Est sur P7		x	non		x
18	Influence de E17-E18 seuls	x		-	-	-

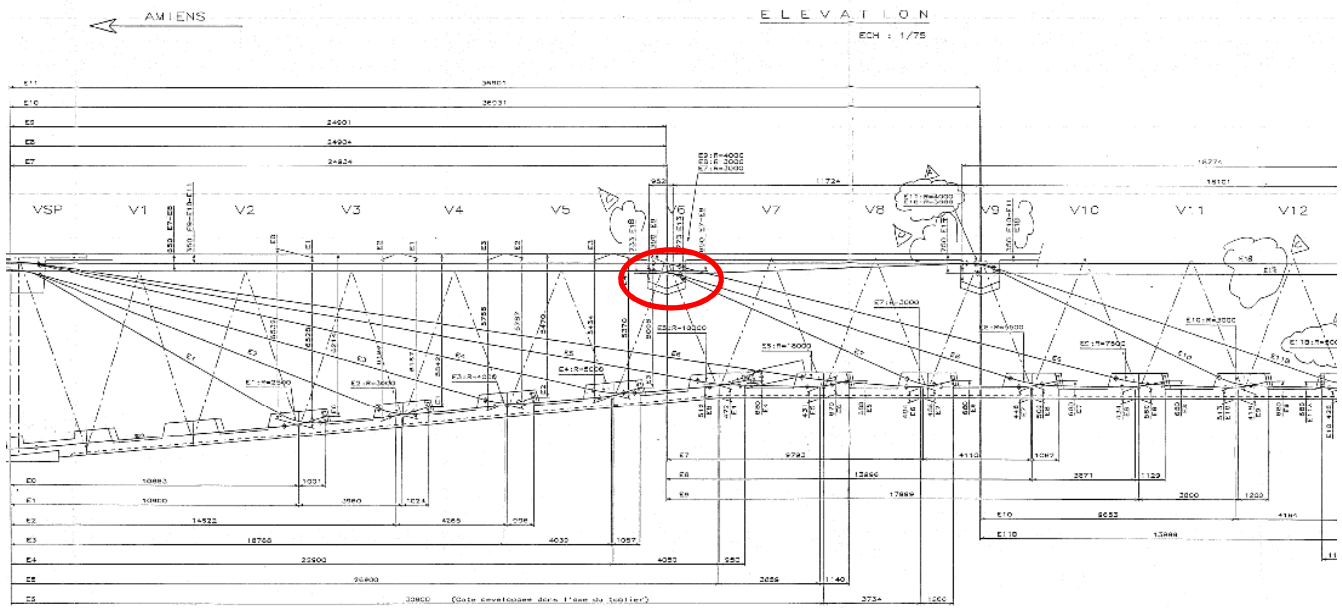
Contraintes du scenario 1



Contraintes du scenario 1



Interface avec bloc déviateur haut

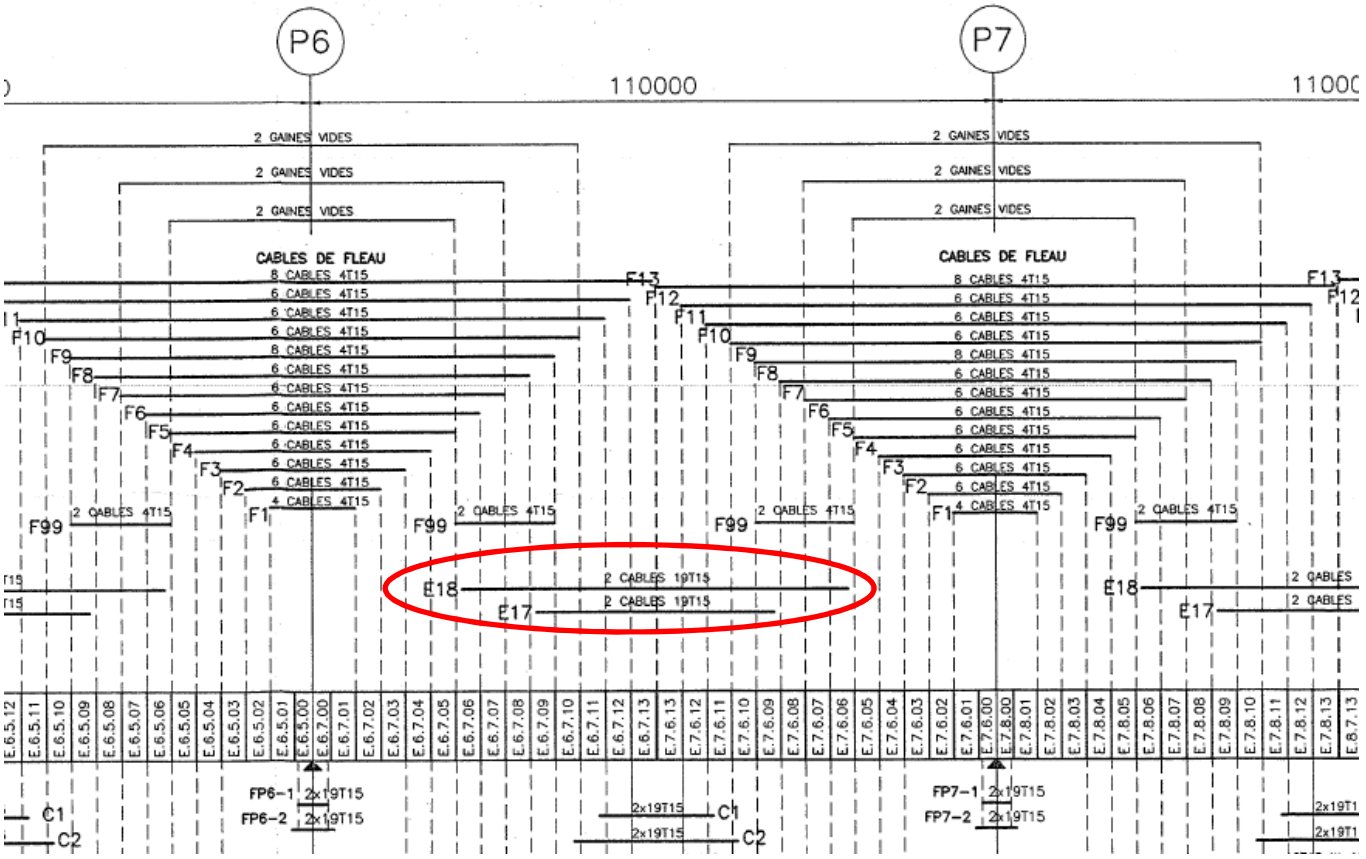






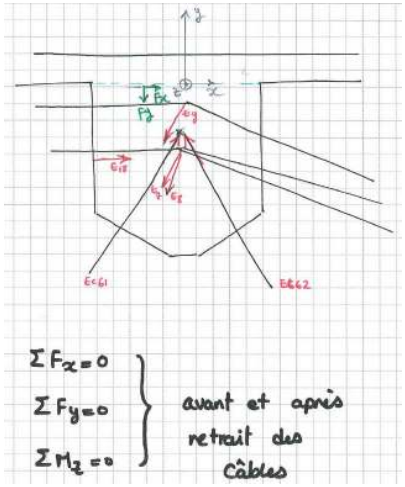
Dépose préalable câbles droits E17 E18

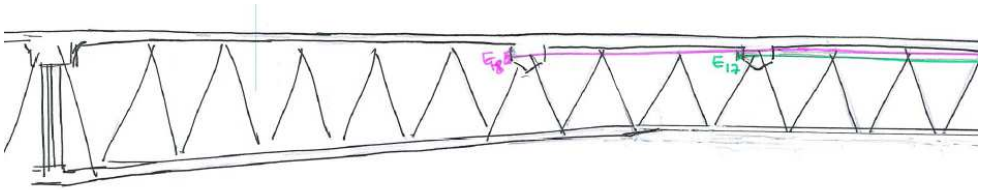
Scénario complémentaire: dépose des câbles 17 et 18



Equilibre du bloc haut V6 sans câble E18

- Dépose définitive de ce câble





Conclusion sur les câbles E17 / E18

- Les câbles E17 et E18: ces câbles ont été mis en place pour équilibrer une phase de pose des voussoirs préfabriqués. Sous l'effet du poids lanceur sur le fléau en console, il est nécessaire d'équilibrer le soulèvement de la travée adjacente) et ils ont été laissés en place dans l'ouvrage en service

- Cette hypothèse est confirmée par l'étude du scénario n°13: en l'absence de ces câbles, des tractions apparaissent dans le hourdis supérieur lorsque le lanceur est positionné en bout de fléau, et que le fardier est positionné à l'extrémité du lanceur.

Ces câbles sont des 19T15 tendus à 0,5 frg dans les travées 5, 6 et 7 , puis des 12T15 tendus à 0,8 frg dans les travées 8 et 9.

Dépose maitrisée des câbles

Les scénarii 2, 3, 4, 5, et 12 étudient les effets de les déposes successives des câbles corrodés en vue de leur remplacement.

Il s'agit d'une dépose maitrisée, c'est-à-dire sans effet dynamique. La méthode de dépose de ces câbles a fait l'objet d'une étude spécifique.

- La dépose d'un câble isolé ne pose pas de problème
- les scénarii étudiés n'ont pas révélé de défaillance particulière.
- La stabilité est assurée tant que la compression reste dans la section des nervures et des hourdis, et que la contrainte maximale du béton reste inférieure à la contrainte admissible.
- La décompression des joints de voussoirs étant le paramètre important lors du retrait des câbles, une instrumentation est mise en place pour suivre l'évolution éventuelle des joints de voussoirs dans les sections critiques du hourdis inférieur.

Rupture accidentelle des câbles

- La rupture accidentelle d'un câble corrodé reste admissible lorsque la voie lente est neutralisée (scénarii 6, 7, 8).

- En service normal (scénarii 9,10 et 11), pour les diagonales des voussoirs V4 et V5, dont la section d'acier est déjà plastifiée à l'encastrement, il n'y a pas d'aggravation notoire du fonctionnement.

- **Le point sensible reste la liaison béton-diagonale.** Cette liaison est vérifiée, en ce cas, à l'ELU accidentel, dans l'hypothèse d'une plastification des sections.

Conclusion sur la modélisation

- Validation de l'état structurel de l'ouvrage avec la dépose de tous les câbles corrodés avant repose, avec exploitation réduite à 1 voie dans chaque sens,
- Prise en compte de la fissuration des blocs hauts avec dépose préalable des câbles droits ancrés sur ces blocs,
- Effort tranchant limite voussoirs V6V7 avec dépose des 3 câbles corrodés sur fléau P7 _ suivi par capteur au micron à la dépose des câbles,
- Dépose brutale câble E11 : en sus de l'instrumentation, mise en place des barres de clouage de voussoirs

Comité Technique

Comité Technique

Composition et finalité

Composition : représentants du Ministère et Autorité de tutelle, les BE assurant les recalculs, Experts du Cerema et de l'Ifsttar, les représentants de Sanef avec leur AMO.

Viaducs du Boulonnais :

- IGOA : P.Peyrac
- GCA : A.Houel assisté de D.Germain
- Expertise : B.Godart
- BE : F.Menuel Egis / JB.Datry Setec / X.Cespedes Strains
- AMO Sanef : L.Labourie
- Sanef : V.Fanguet / J.Castres Saint Martin / Y.Jeanjean

Finalité :

- Informer
- Partager les décisions
- Acter les points critiques
- REX sur sujets identiques

Sécurisation des câbles

Urgence impérieuse

Sécurisation câbles

Mettre en place un environnement permettant la reprise des travaux

Marché passé de gré à gré avec Egis pour assurer la MOE ,

Procédure d'urgence impérieuse :

- Consultation directe avec délai limité à 2 semaines,
- Questions et Auditions des candidats → 3 jours
- Saisine extraordinaire Commission de Marché

Mise en place d'un ensemble d'échafaudage avec mailles fines enserrant les câbles pour éviter le fouettement en cas de rupture,

Blocage « amortisseur » des têtes d'ancrage pour éviter leur projection en cas de rupture.

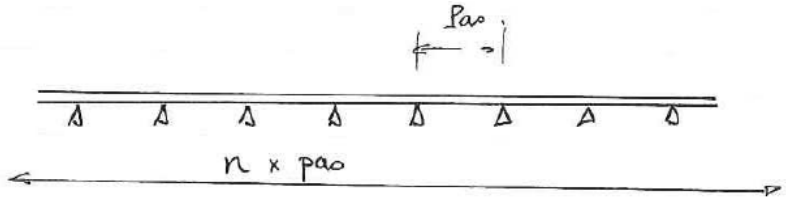
Sécurisation : câbles

- Sous l'effet de la rupture du câble et du « rebond » de l'onde de détente à l'ancrage, **le câble est soumis à un effort de compression** au maximum équivalent à la force de précontrainte

- **Le câble risque de flamber** et d'endommager les éléments structuraux adjacents (autres câbles de précontrainte extérieure, bracons métalliques)

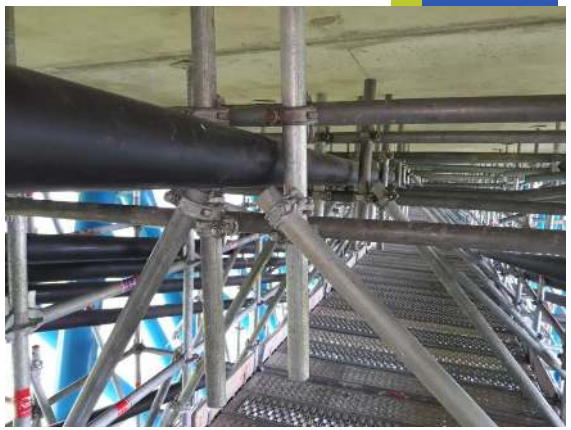


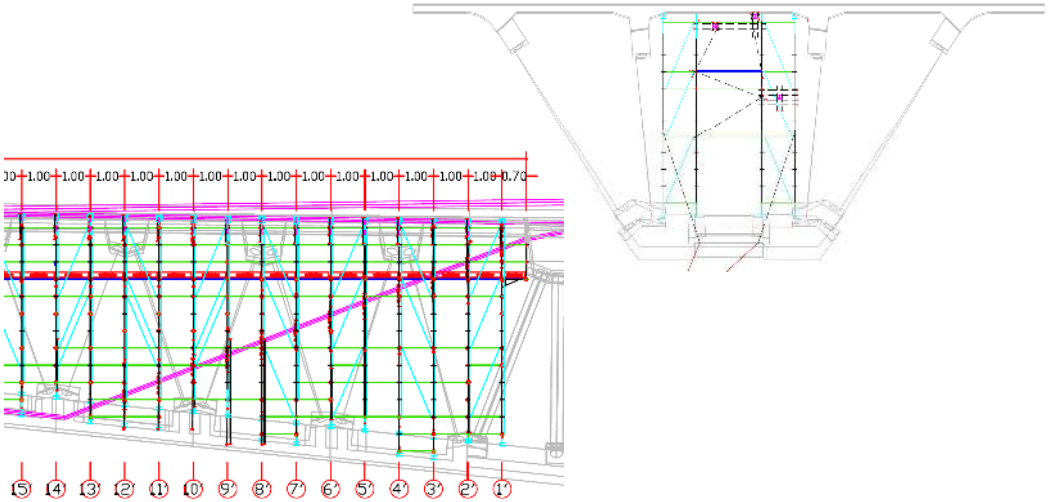
- Le flambement du câble peut-être évité par un **maintien/ appui à intervalle régulier**.



Sécurisation : câbles

- Intervalle de maintien nécessaire calculé : 1m
- Solution retenue : **échafaudages**







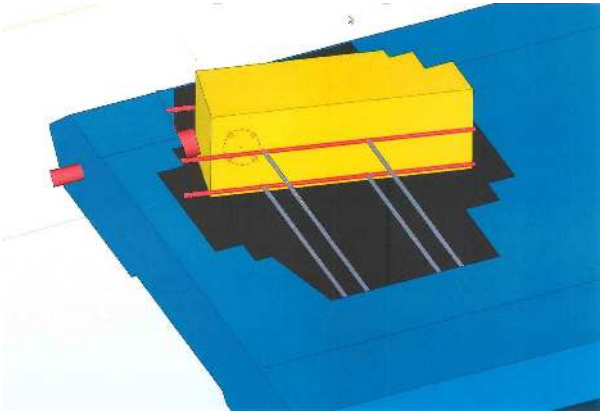
Sécurisation : butées d'ancrages

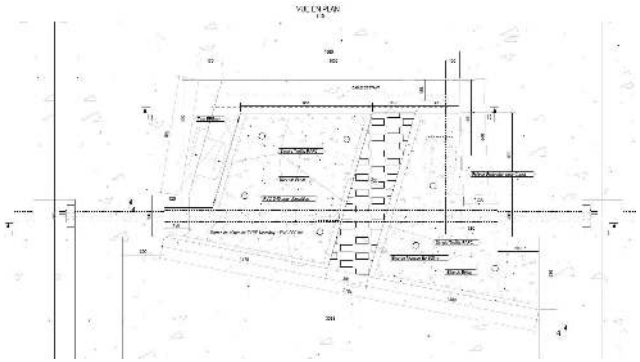
- 2 fonctions :
  - Limiter le recul d'ancrage, et **empêcher les dégâts sur des éléments structuraux** (autres câbles de précontrainte extérieure, bracons métalliques) ;
  - **Amortir** l'énergie libérer par la rupture du câble.

Sécurisation : butées d'ancrages

- Ancrages en partie basse
  - 2 matériaux :
    - Béton coulé en place ;
    - Mousse haute densité amortissante
  - Déplacements limités par des barres de précontrainte



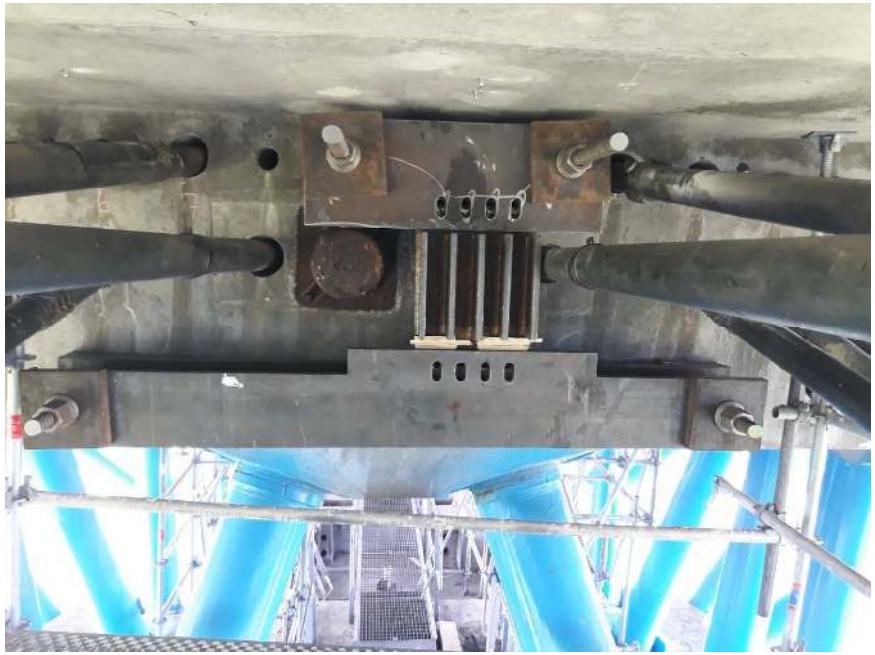






Sécurisation : butées d'ancrages

- Ancrages en partie haute
  - 1 matériau :
    - Acier (préfabrication).
  - Maintenu par des barres de brelage
  - Recul d'ancrage 100% bridé



Dépose des câbles

Détente « brutale »
Détente contrôlée
Constats

Dépose des câbles

Détente brutale

Les câbles les plus corrodés considérés comme à la limite de rupture ont été déposés par découpe brutale :

- Maillage structure tubulaire pour éviter le fouettement
- Butée amortisseur pour éviter le jaillissement de la tête d'ancrage

Dépose des câbles

Détente brutale du câble E11 Est du fléau P9



Les butées n’ont pas eu d’effet amortisseur.
Le câble a rompu au droit de la zone corrodée.



Dépose des câbles

Détente brutale _ vidéos câble E11 Est P9 (110 m)

13.1 Boulonnais E11 Est - Fin de coupe.mp4

13.2 Boulonnais E11 Est - Point de corrosion.mp4

Dépose câbles

Détente contrôlée

Voir présentation Feyssinet à suivre

Dépose câbles

Constat de flambement de gaine + mousse expansive



La plupart des câbles ont pu être déposés sans grande difficulté.
Certains présentent des désordres sensibles relatifs à leur mise en œuvre.



Dépose câbles

Constat déchirure gaines





Repose des câbles

Câble 15 T 15S TGG dans gaine PEHD PN10

Manchon Gaz

Essai étanchéité 3 bars à l’air

Injection 3 bars avec montée en pression à 5 bars

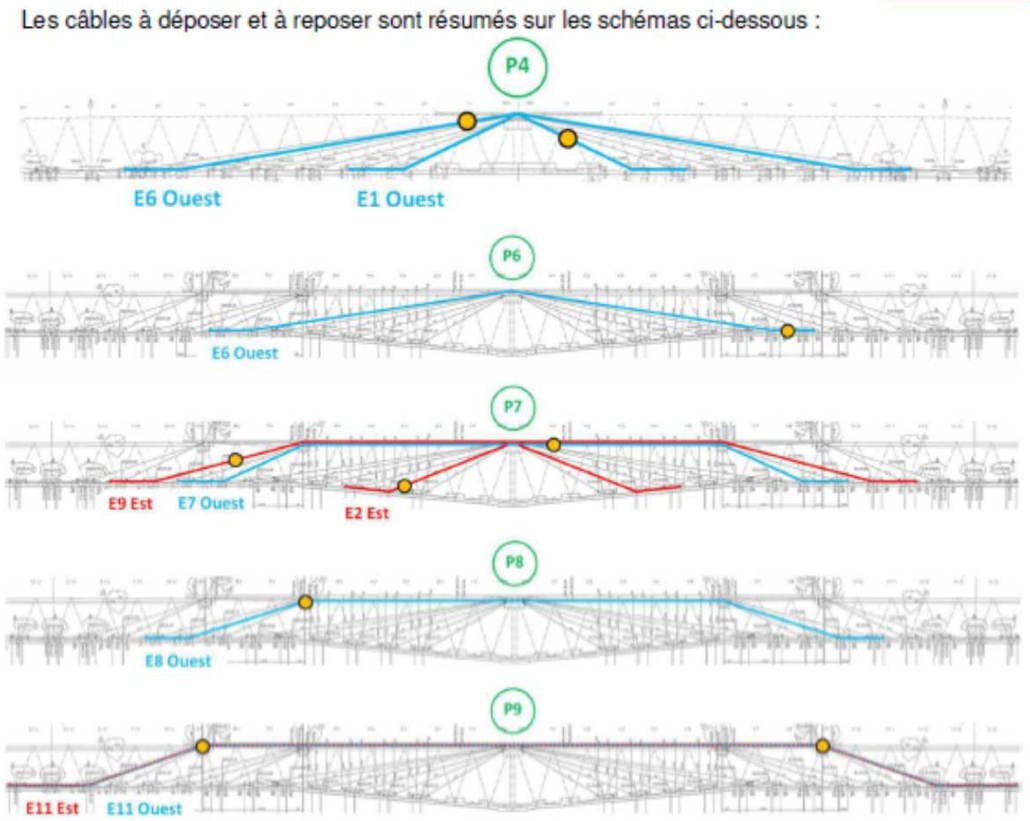
Marché de repose des câbles

10 câbles à reposer sur Echinghen:
- E6 Ouest et E1 ouest sur P4
- E6 Ouest sur P4
- E9 Est E7 Ouest et E2 est sur P7
- E8 Est et Ouest sur P8
- E11 Est et Ouest sur P9

1 câble à reposer sur Quehen:
- E7 Ouest sur P3

Les câbles droits E18/E17/E16 sous le hourdis supérieur à mi travée ne sont pas reposés (réserve de compression)

1 voie lente neutralisée dans chaque sens pendant toute la durée de travaux de repose



Marché de repose des câbles

- Les câbles de 19T15 tendus à 0,8 frg en 1998 n'ont plus que 1100 MPa en moyenne en 2019 (0,65 frg) du fait des pertes par retrait – fluage pendant 21 ans

- Ils sont remplacés par des 15T15S en TGG

- Espace disponible dans l'ancrage = 125mm

  Diamètre ext. maximum de gaine = 110mm

  Cela limite les possibilités -> Test d'enfilage requis



Technologie	Nb torons	VSL	Freyssinet	BBR
TGG injectés au coulis ciment	13-15	125 x 6.0	110 x 5.3	125 x 5.3
	16-19	140 x 6.7	125 x 6.0	125 x 5.3
Torons clairs injectés à la cire	13-15	110 x 5.3	90 x 6.6	110 x 5.3
	16-19	110 x 5.3	110 x 8.1	110 x 5.3

Marché de repose des câbles

Prescriptions du marché pour garantir un haut niveau de qualité sur les nouveaux câbles de précontrainte extérieure:

1. Système de Précontrainte extérieure couvert par un ATE et par l'ASQPE (toron, procédé, coulis, mise en œuvre).
2. Gaines PEHD couvertes par la norme EN 12201 avec marquage NF.
3. Essais contradictoires sur les gaines:
    1. Pourcentage de noir de carbone,
    2. Taux de cristallinité,
    3. Temps d'induction à l'oxydation,
    4. Allongement à rupture.
4. Manchons de type gaz pour raccorder les tronçons de gaines PEHD.
5. Essai d'étanchéité à l'air obligatoire sous pression à 3 bar avant injection
6. Injection suivant CCTG avec montée à 5 bars pendant 1minutes en fin d'injection
7. Torons mis en place par tractage (éviter l'endommagement des gaines individuelles des torons)

Marché de repose des câbles

Travaux de repose en cours (ETIC) – début de la période travaux notifié au 15/07/2019.



Support continu de gaine



Préfabrication du faisceau complet



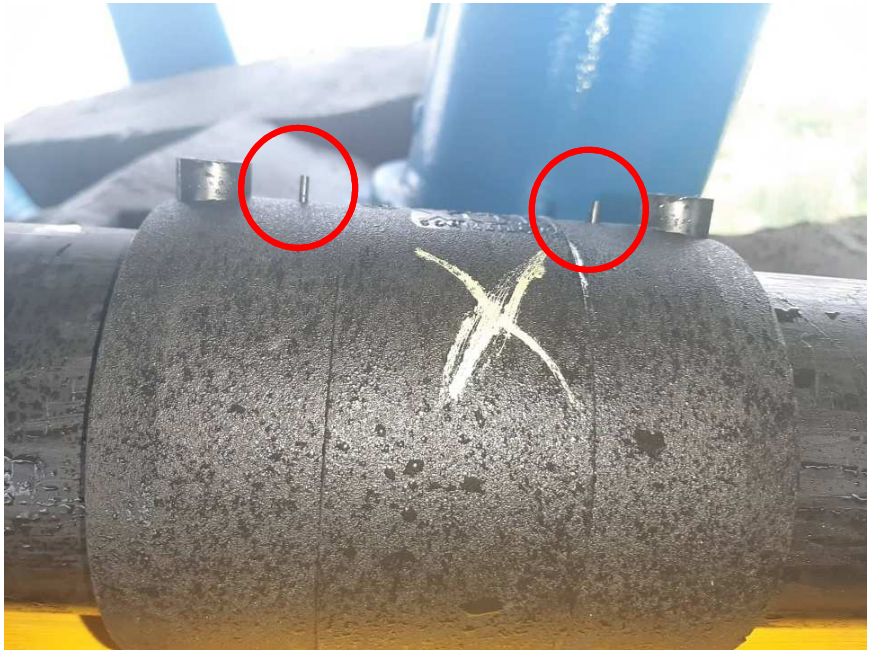
Tractage au tirfor hydraulique

Marché de repose des câbles

- Non alignement des tubes déviateurs -> difficulté d'enfilage des gaines
- Manchons électro-soudable de type gaz utilisés pour tous les raccord de gaines



Non alignement des tubes déviateurs



Manchon gaz avec sortie des témoins de soudures

Actions à venir sur câbles

- Vérification de tous les raccords et ouverture éventuelle :
  - Réparation type A ou B si câble très faiblement corrodé
  - Dépose et remplacement de nouveaux câbles si corrosion
- Auscultation aléatoire des zones d'ancrage par procédé Uscan des câbles courts comportant de la mousse expansive
- Contrôle des manchons accessibles (parties inclinées des câbles) par Bobine électromagnétique.

Conclusion

Constats et enseignements

Les désordres ne sont pas relatifs au procédé de précontrainte.

Pas de désordre au niveau des têtes d'ancrage.

Défauts sur des points singuliers à la mise en œuvre.

Flambement de gaines à la mise en tension.

Rupture de toron non tracée

Certaines dispositions présentent des risques élevées pour la structure et la sécurité.

Axe d'amélioration

Fiche de suivi avec traçabilité par câble de tout incident à la mise en œuvre :

- Qualité des gaines (NF) et des manchon (type gaz) + contrôle extérieur
- Bon supportage des gaines pour éviter leur flambement,
- Suivi des raccords exécutés (témoins de soudure),
- Type de câble : préférer TGG ou TGC double protection mais unité moindre,
- Enfilage : si toron par toron, tracer la perte de doigt d'enfilage,
- Essai d'étanchéité - avant (préférable) - ou après enfilage câbles :
  - Traiter le défaut éventuel de manière pérenne et non par action d'urgence
  - Proscrire tout emploi de mousse expansive.
  - Peut requérir dépose de la gaine / câble en cas de déchirure interne,
  - Fixer la pression (3 bars usuel) et tracer la perte de pression sur une durée suffisante
- Noter les ruptures de toron et les actions engagées
- Injection : sous 3 bars avec montée en pression 5 bars et tenue 3 mn,
- Protection des ancrages (cachetage ou capots protégés antico)
- **Suivi et levée de point d'arrêt impératif …**

MERCI POUR VOTRE ATTENTION