

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



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacières (A40)

Jean-Philippe Marion – *APRR*
Adrien Roibet - *Quadric*
Jean-Bernard Datry - *Setec TPI*

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Présentation des ouvrages



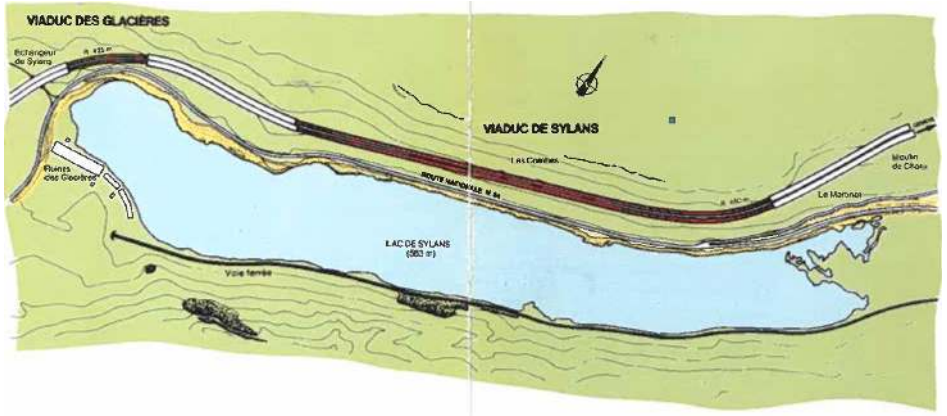


Caractéristiques générales :

- PK : 114.000
- Profil transversal : 2 x 2 voies + BAU
- Nombre de tabliers : 2
- Longueur totale :

- Sylans : 1268 m (55m + 19x60.6m + 59.8m)
- Glacières : 215 m (3x60m + 32m)

- Mise en service : 1988
- Entreprises : Bouygues

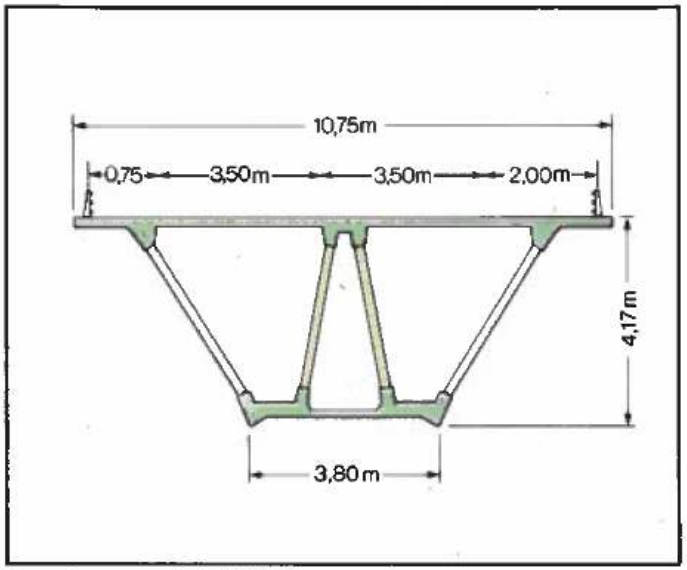


Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Présentation des ouvrages

Tabliers :

- largeur du hourdis supérieur : 10,75 m
- largeur utile entre dispositifs de sécurité : 9,75 m
- hauteur : 4,17 m
- longueur : 4,66 m soit deux "X" par voussoir courant
- section courante des diagonales : 0,20 m × 0,20 m



Coupe transversale du tablier



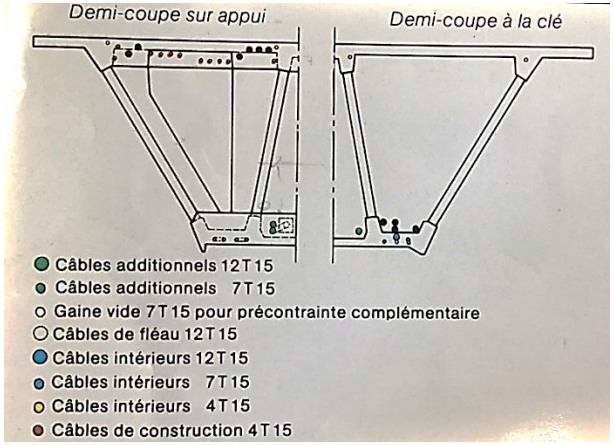
Structure à treillis spatial

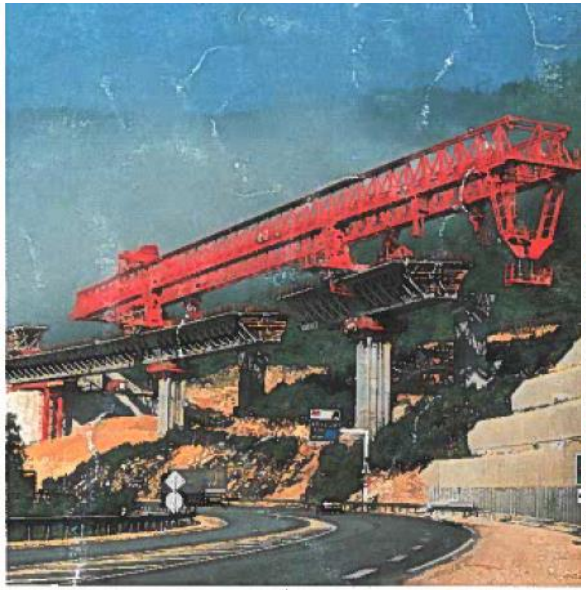


Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Présentation des ouvrages

Tabliers :

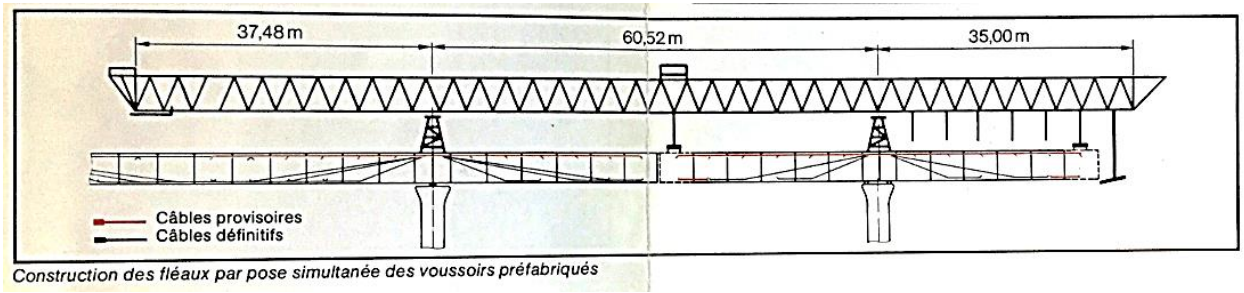




Tablier Sud du viaduc des GLACIÈRES



Pose d'un voussoir courant



Construction des fléaux par pose simultanée des voussoirs préfabriqués



Pose d'un voussoir

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Présentation des ouvrages



Caractéristiques de la précontrainte extérieure :

- Procédé : Freyssinet système K
- Unités : 12T15S classe 1770 MPa TBR

(dont ≈ 1/5ème des câbles en torons gainés graissés)

- Type de gaines extérieures : gaines Ø90 en PEHD
- Type d'assemblage : manchons électro-soudables
- Type d'injection : coulis de ciment





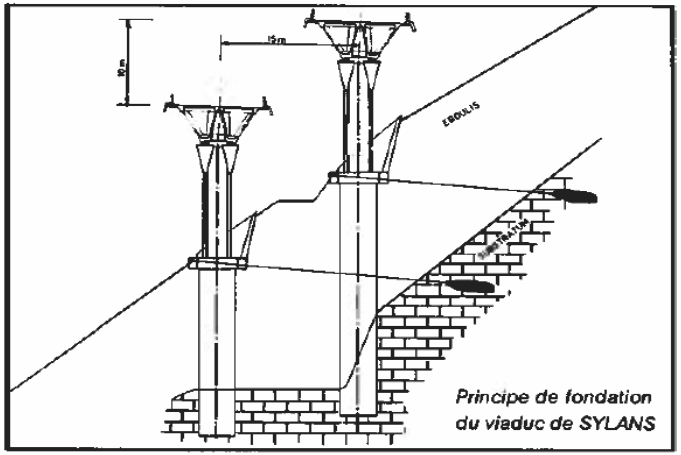
Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Présentation des ouvrages

Appuis :

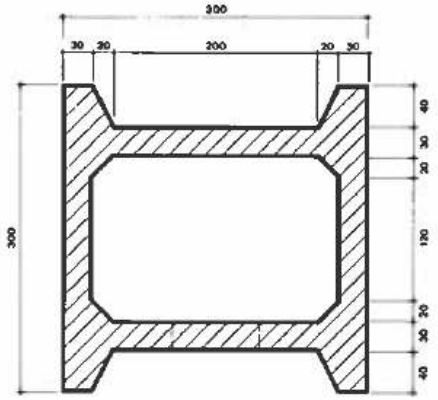
FONDATIONS

Tous les appuis du viaduc de SYLANS sont fondés sur des puits de 4 mètres de diamètre ancrés dans le substratum calcaire, profond de 6 à 35 mètres.
Ce dernier est inaccessible pour les fondations du viaduc des GLACIÈRES qui consistent en des puits hauts de 15 à 20 mètres, de diamètre 4 mètres, dont la base s'élargit en "pied d'éléphant" pour venir s'encastrer dans un paquet d'éboulis rocheux consolidés par injection.
Les puits sont creusés à travers le manteau d'éboulis à l'abri d'un blindage constitué d'anneaux en béton coulés en place.
En tête de puits, des soutènements définitifs dégagent une plate-forme semi-cylindrique de 6 mètres de rayon. La stabilité de ces coques est assurée par la mise en tension de deux tirants 12T13.



Principe de fondation du viaduc de SYLANS


Piles du viaduc de SYLANS




Coque de pile

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Présentation des ouvrages

Quelques chiffres :

COÛT PRÉVISIONNEL
Les travaux des viaducs de SYLANS et des GLACIÈRES d'un montant prévisionnel hors chaussée de 171 MF TTC aux conditions de juillet 1985, se décomposent en :

- installations de chantier, études, prix généraux : 17 %
- terrassements et fondations profondes : 29 %
- appuis : 6 %
- tabliers : 38 %
- superstructures : 10 %

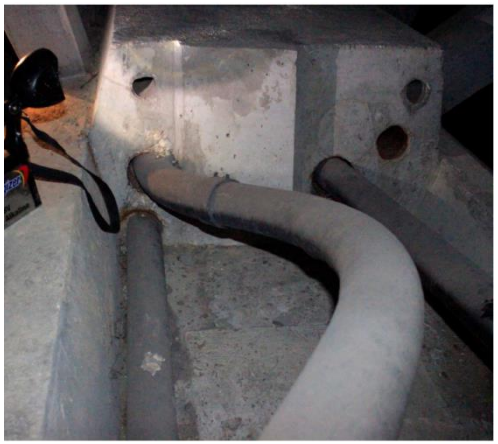
INTERVENANTS

Maître d'ouvrage :	SAPRR
Maître d'œuvre :	SCETAUROUTE (Rhône-Alpes)
Bureau d'études associé :	SETRA
Entreprise :	BOUYGUES
Sous-traitants	
Terrassements :	FAMY
Soutènements provisoires :	FONDATIONS TRAVAUX MINIERS
Armatures passives :	CEPABA
Tirants d'ancrage :	BACHY
Armatures actives :	STUP CIPEC

QUANTITÉS	VIADUC DES GLACIÈRES	VIADUC DE SYLANS	TOTAL
Béton			
Fondations	1 800 m^3	6 200 m^3	8 000 m^3
Appuis	900 m^3	3 080 m^3	3 980 m^3
Tabliers	2 200 m^3	15 200 m^3	17 400 m^3
Aciers passifs			
Fondations	105 t	360 t	465 t
Appuis	95 t	330 t	425 t
Tabliers	385 t	2 660 t	3 045 t
Aciers de précontrainte			
Précontrainte longitudinale	105 t	720 t	825 t
Précontrainte des diagonales	13 t	89 t	102 t
SURFACES BRUTES	4 588 m^2	27 217 m^2	31 805 m^2
SURFACES UTILES	4 161 m^2	24 685 m^2	28 846 m^2

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Rupture brutale d'un câble extérieur (novembre 2015)











Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Questions du Maître d'Ouvrage

- Peut-on laisser la circulation ?
  → à court terme : neutralisation d'une voie pendant une semaine
  → jusqu'au remplacement : surveillance quotidienne des autres câbles
  → recalcul avec modélisation d'un câble en moins

- Pourquoi le câble a cassé?
  → autopsie du câble + diagnostic

- Remplacement en urgence du câble
  → remplacement dans le mois qui a suivi

- Est-ce que d'autres câbles sont susceptibles d'avoir la même problématique?
  → mise au point d'une méthodologie + diagnostic

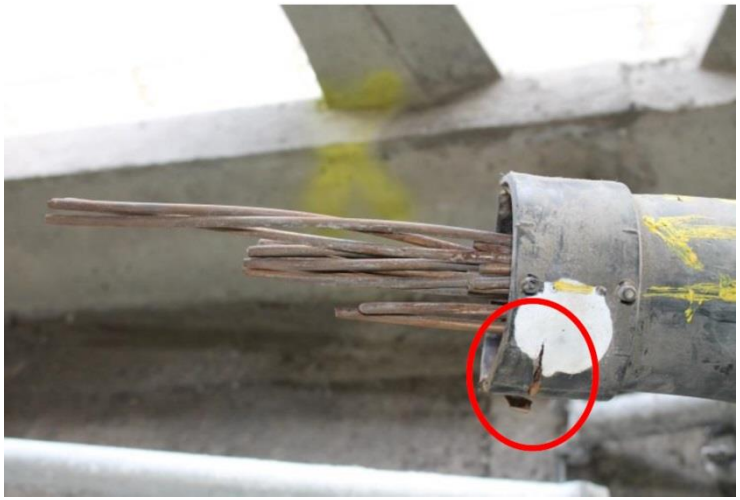
- Et les autres ouvrages avec de la précontrainte extérieure ?
  → surveillance des ouvrages avec précontrainte extérieure

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Autopsie du câble rompu

Observations sur site :

- 2 blessures au niveau du manchon ayant pu permettre les infiltrations d'eau + 1 rupture sur la gaine en tronçon haut, dont l'origine semble liée à la rupture du câble.
- Point d'entrée des infiltrations présumées : faiblesse au niveau de la soudure du manchon et/ou fissure préexistante au niveau du manchon ou de la gaine.





Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Autopsie du câble rompu

Observations sur site :

- Au-delà de la zone de coupure, coulis sain d'apparence avec un remplissage complet de la gaine. Traces de corrosion superficielles sur les torons probablement développée par capillarité le long des fils.
- Pas de désordres causés par la rupture si ce n'est l'éclatement du cachetage béton à l'ancrage



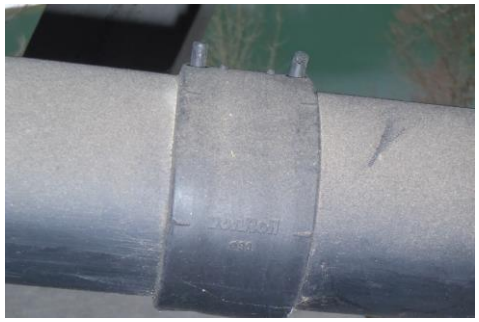


Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Inspection d'urgence et surveillance

- Inspection immédiate de l'ensemble des gaines de Sylans et Glaciaires.

- Visites de contrôle régulières (mensuelles puis bimensuelles)








Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Inspection d'urgence et surveillance





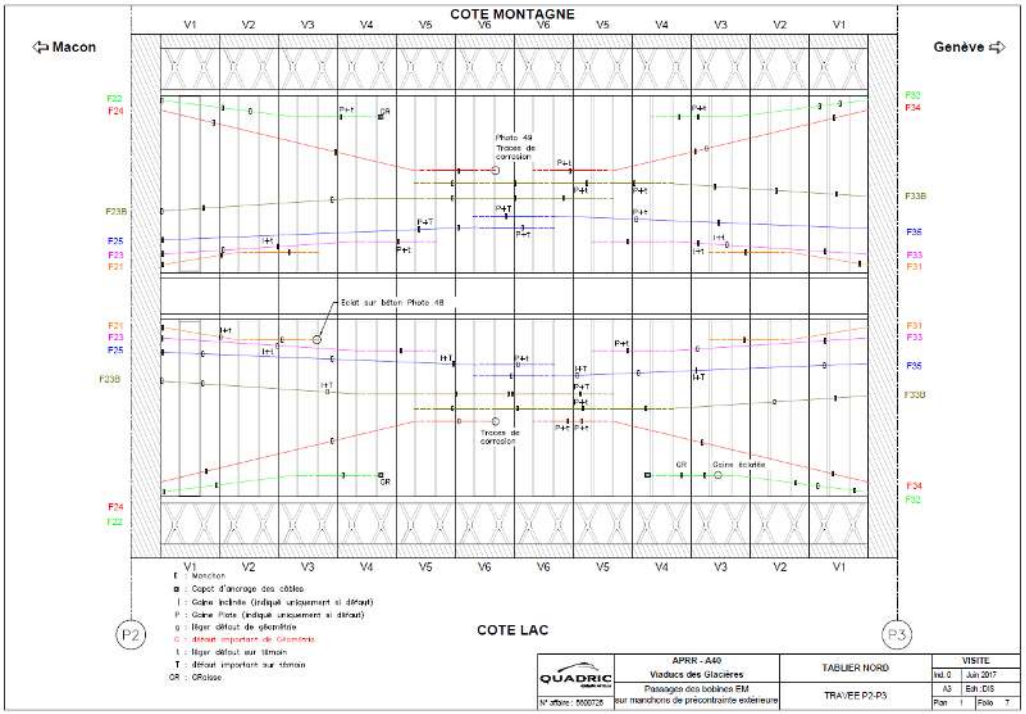




Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Inspection d'urgence et surveillance

- Dénombrement des unités de manchons présentes, recensement et classements des défauts rencontrés :
  - Défauts de témoins d'électro-soudures (témoins partiellement ou totalement absents)
  - Défauts de géométrie (désalignement, désaxement, boursouflure, etc.)
  - Déchirure de manchon
  - Rapiéçage de gaines
- Report des désordres pour suivi à long terme



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Analyse en laboratoire du câble rompu

Expertise fractographique des torons et des gaines (IFSTTAR) :

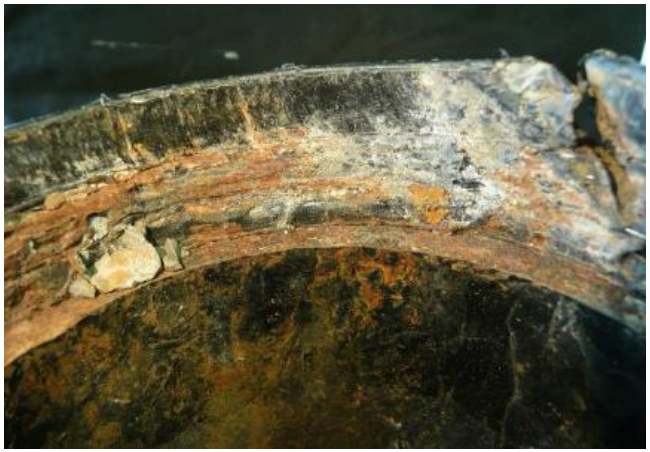


Figure 14 : Rupture ancienne sans striction avec une propagation longitudinale importante et un cisaillement final à environ 45°.





Figure 17 : Rupture ductile par surcharge (type cup and cone).



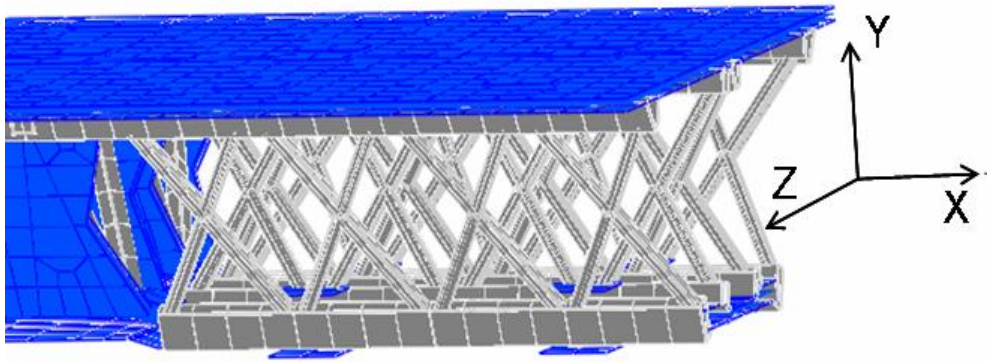
Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

Analyse de la robustesse menée par SETEC et QUADRIC afin d'évaluer la résistance du tablier en configuration dégradée (rupture d'un ou plusieurs câble(s))

Conclusions :

- Aucun problème majeur en cas de rupture d'un seul câble extérieur.
- Robustesse du tablier à la rupture importante (premiers effets critiques sur les effets d'efforts tranchants et de flexion locale du hourdis).



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

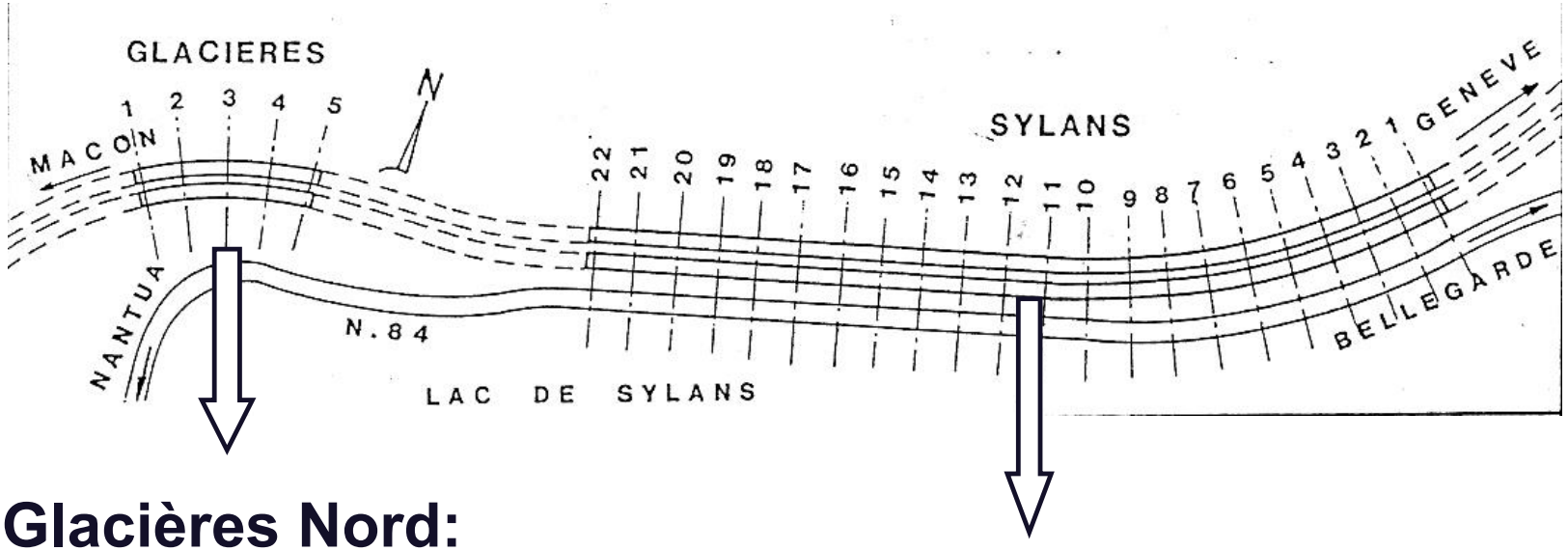
- Etude: N. De Rycker
- Direction: J.B. Datry
- Contrôle externe: J. Ryckaert

} Setec TPI

- Comité suivi APRR:
  - J.P. Marion, APRR
  - J. Lawnicki, Quadric
  - C. Servant, Eiffage TP
- Objectif:
  Influence endommagement des X sur la stabilité des tabliers
- Préalable:
  Recalcul flexion longitudinale / Efforts dans les diagonales

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

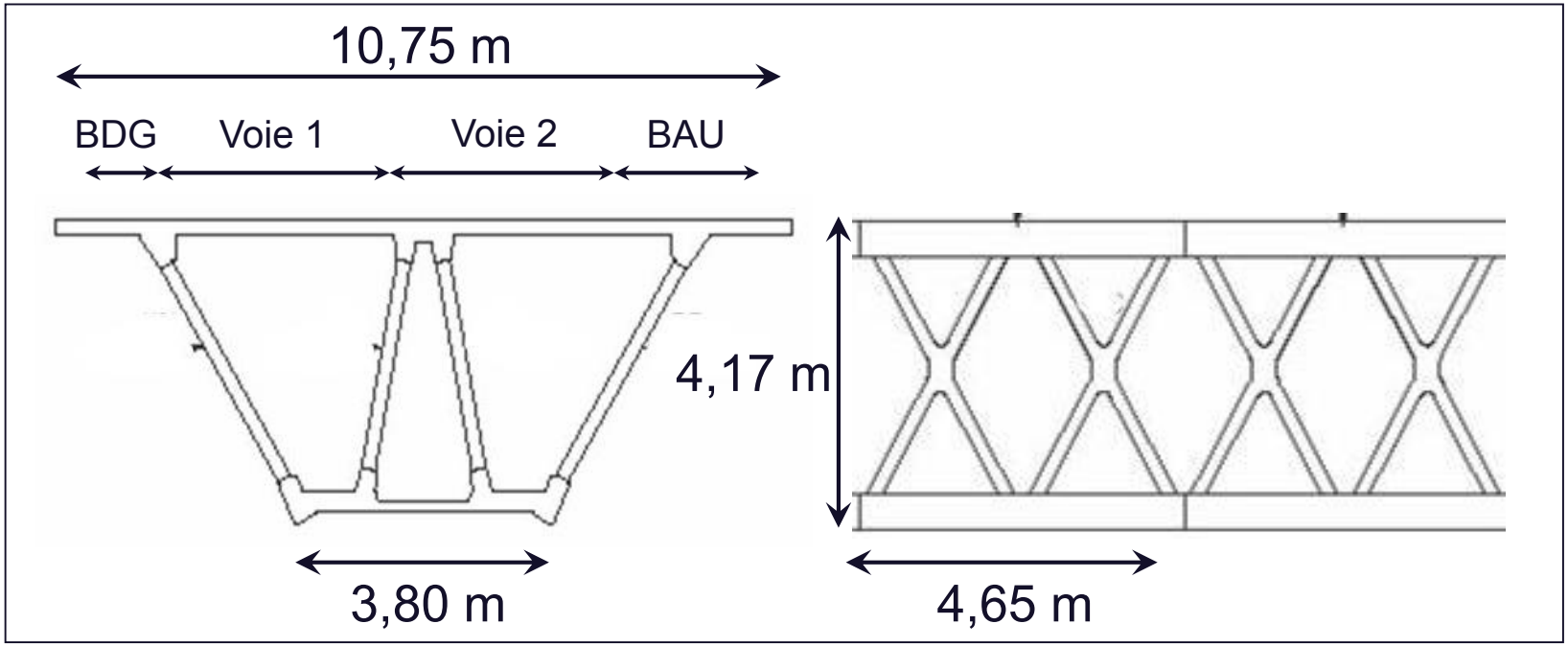


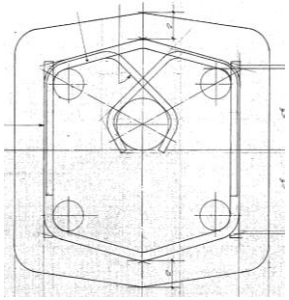
Glacières Nord:
(3x 60,4m) + 30,2m
Rayon en plan: 437m

Sylans Nord P8-P15:
(7x 60,4m)
Rectiligne

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire



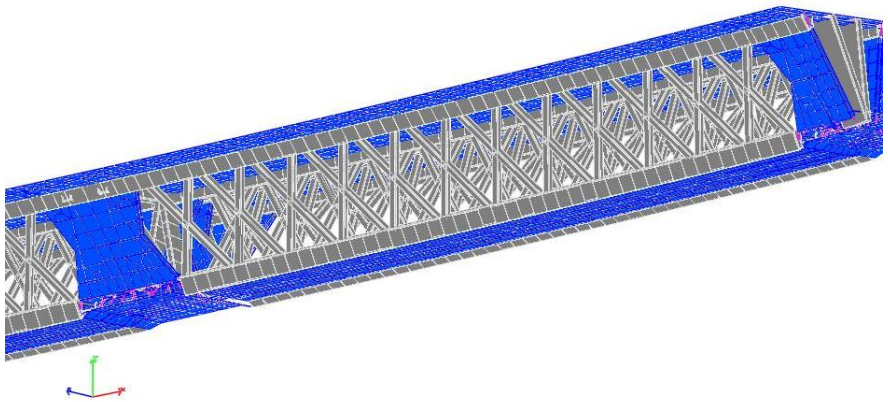


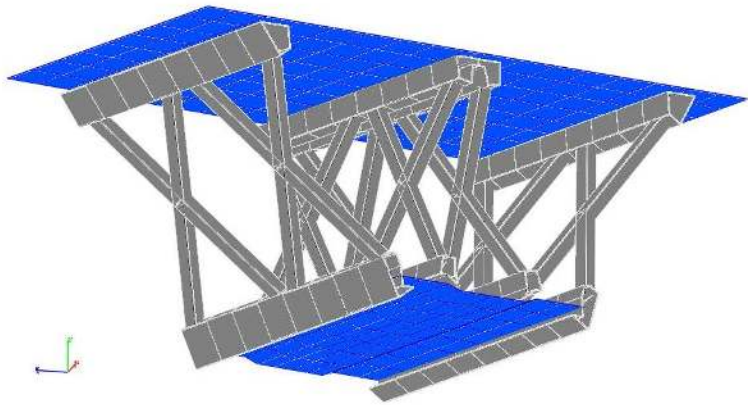
- Section 20 x 20 cm
- Ferraillage HA12 à HA20
- Précontrainte 5 ou 10 Ø7

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

- Modèles Éléments finis Pythagore :
- Modélisation 3D - poutres/coques
- Précontrainte dans les modèles
- Fluage, retrait
- Pertes, relaxation précontrainte
- Phasage
- Effort tranchant

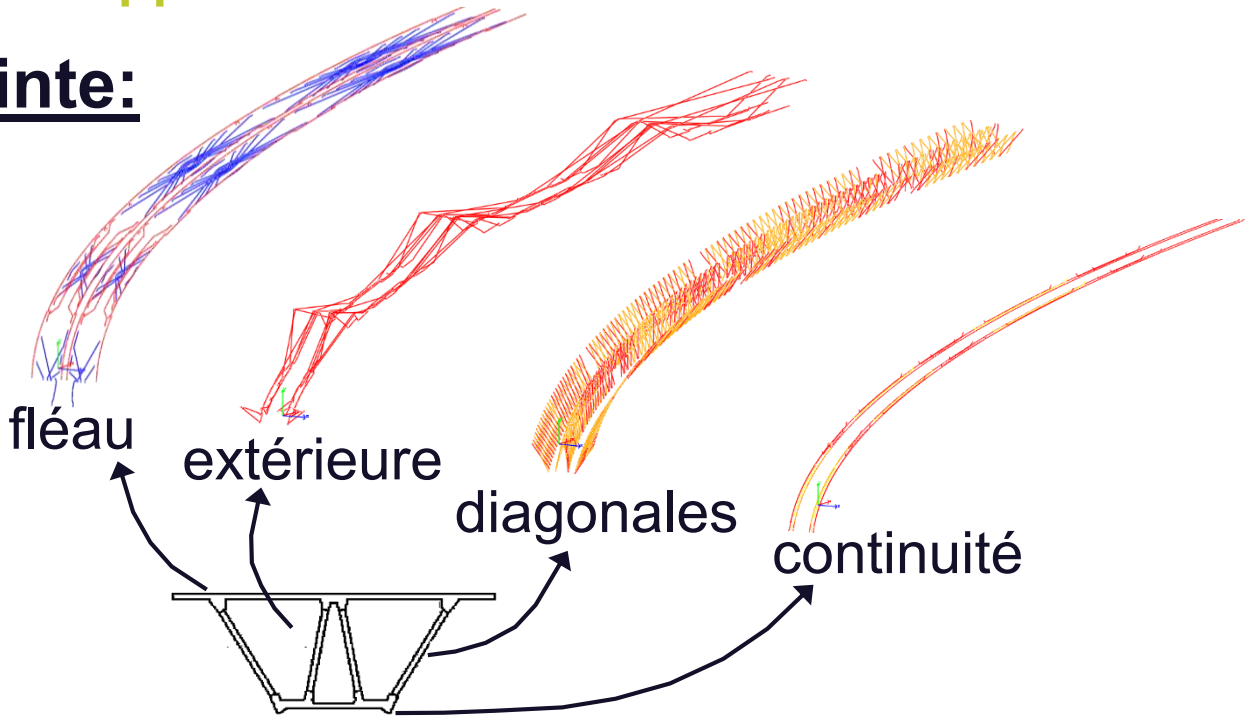




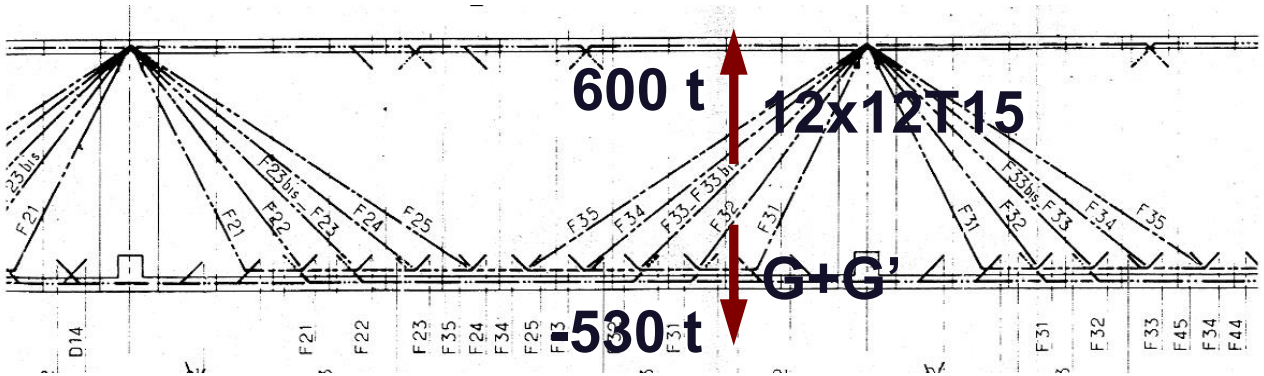
Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

Précontrainte:



Câbles extérieurs
→ relevage effort tranchant



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

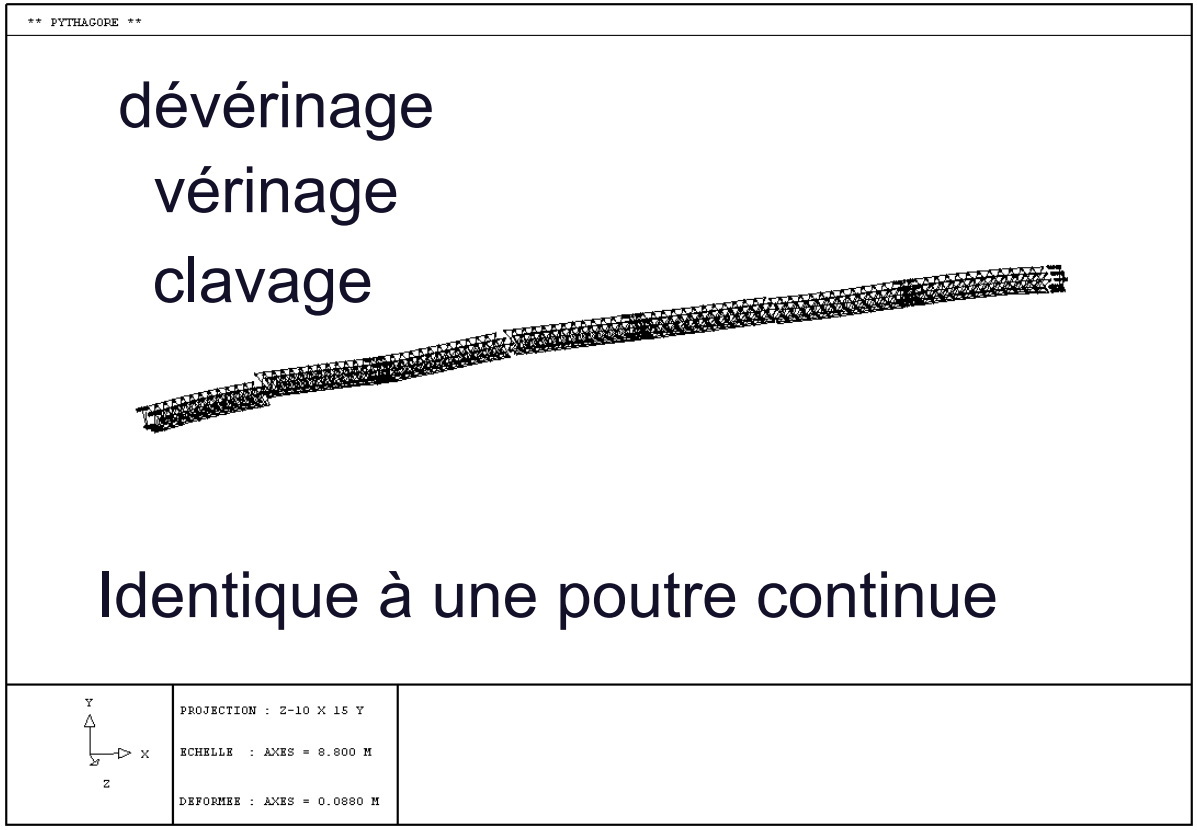
Hypothèses du recalcul:

- Géométrie basée sur plans d'exécution
- Caractéristiques mesurées du béton
  (hourdis B45, diagonales B60)
- Coefficients de transmission précontrainte mesurés sur chantier
- Charges permanentes : avec phasage (influence fluage/relaxation)
- Charges routières: A(l) et Bc
- Gradients température
  (10° hauteur du tablier + 5° hourdis sup)
- Tassements des appuis
  (différentiels 1cm entre appuis)

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

Phasage construction

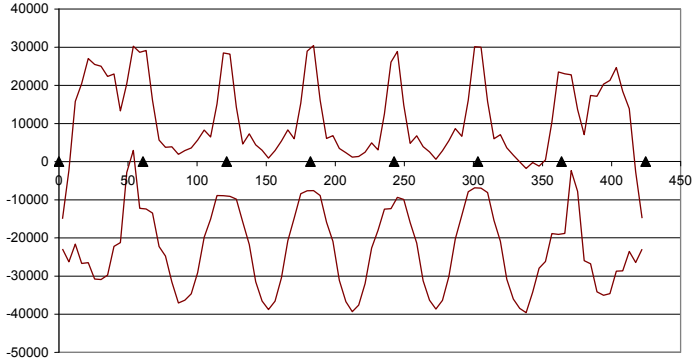


Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

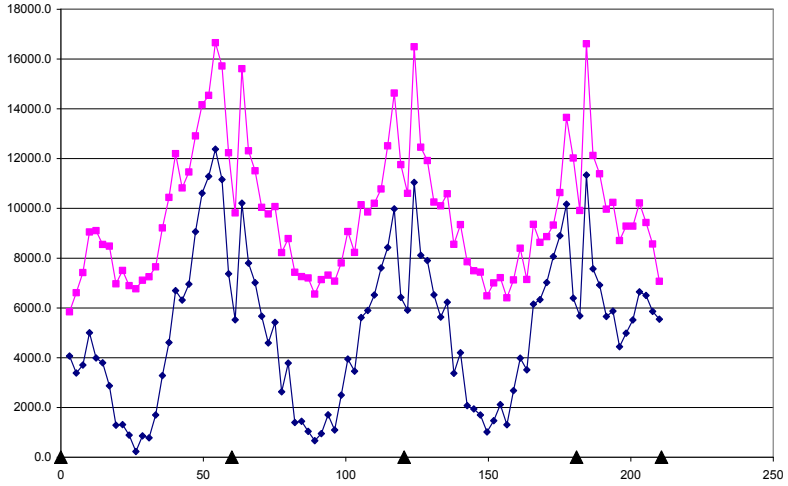
Diagnostic – Approche calculatoire

Résultats recalcul :

- Torseurs d'efforts le long des tabliers



- Contraintes dans les hourdis



- Efforts dans les diagonales (plans intérieurs et extérieurs)

	Glacières		Sylans	
	mini	maxi	mini	Maxi
CP	0,2 t	78 t	4 t	81 t
ELS	-10 t	84 t	-9 t	87 t
ELU	-41 t	107 t	-41 t	106 t

(y compris précontrainte des X)

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

Analyse des résultats:

- Faibles redistributions par fluage (mode de construction)
- Règles fixées par le SETRA à l'exécution :
  - Pas de diagonales tendues sous charges permanentes
  - Pas ou très peu de traction dans les hourdis,
  - Traction des diagonales limitée à ft28 (ELS),
  - Compression des diagonales limitée à 0,54 fc28 (ELS),
- Travées de rives les plus sollicitées
- Faibles différences Sylans/Glacières: les variations liées à la courbure sont compensées par les variations de précontrainte des X
- Comparaisons avec calculs d'exécution Bouygues:
  → bonne concordance des ordres de grandeurs et du comportement des ouvrages

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

Endommagement des diagonales

Méthodologie études d'endommagement:

- Rupture d'une ou plusieurs diagonales
  → suppression totale du béton
- Conservation de l'effort de précontrainte
  (déformation trop faible pour détendre le câble)

- Combinaison ELS la plus défavorable
- Analyse du report d'efforts sur diagonales adjacentes
- Analyse de l'influence sur les nervures des hourdis
- Analyse de l'influence sur les câbles extérieurs



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

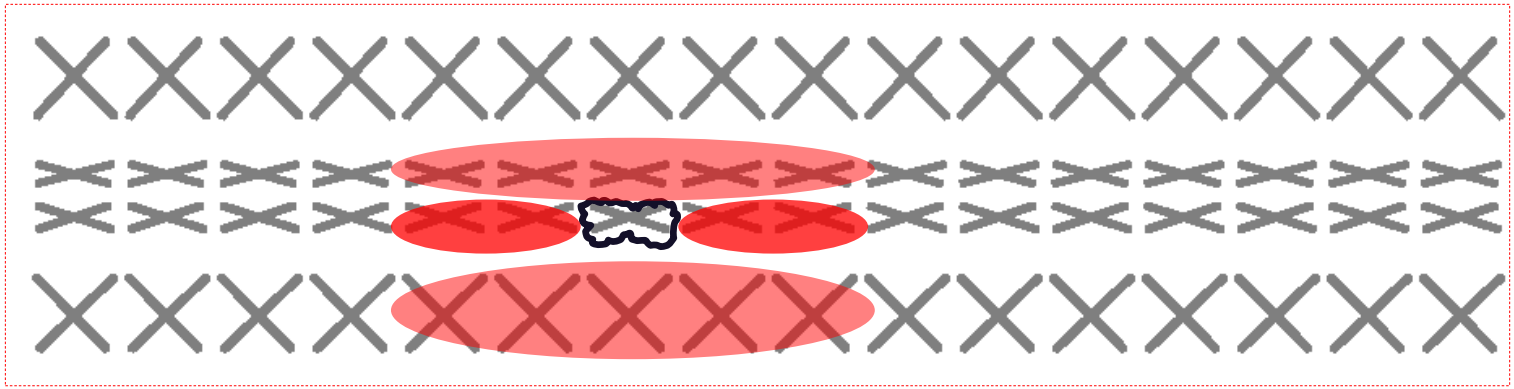
Diagnostic – Approche calculatoire

Reports sur diagonales adjacentes (1/2)

- Différents scénarii de rupture :
  - diagonales ayant subi des dégradations
  - diagonales les plus sollicitées
  - une diagonale / un X entier / 2 X entiers

- Reports observés:

- majoritairement longitudinalement sur 1 voussoir
- latéralement sur plan directement adjacent
- très faiblement au-delà

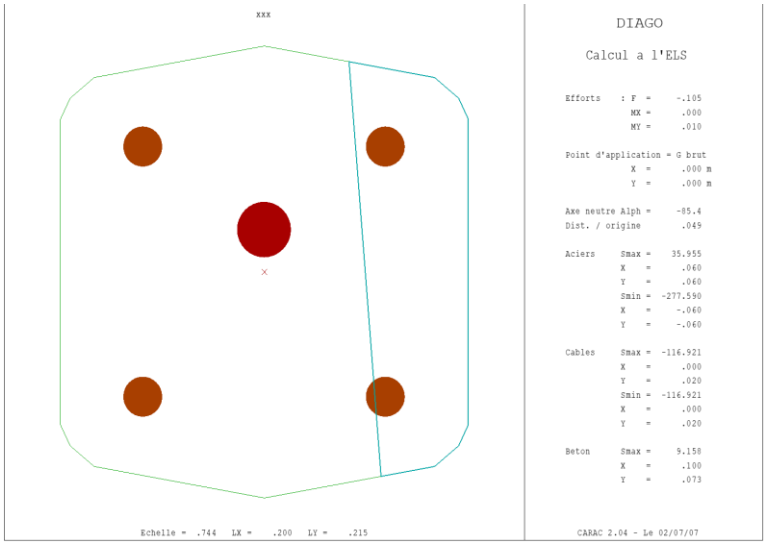


Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

Reports sur diagonales adjacentes (2/2)

- Amplitude des reports limités:



	Avant rupture		Après rupture
N_{min}	-5 t	→	-11 t
N_{max}	+79 t	→	+105 t

($+M_{flex}$ ~ 1t.m)

$$\begin{cases} \sigma_b < 0.54\ f_{c28} \\ \sigma_s < 2/3\ f_e \end{cases}$$

→ Pas de risque de rupture en chaîne des diagonales par reports successifs

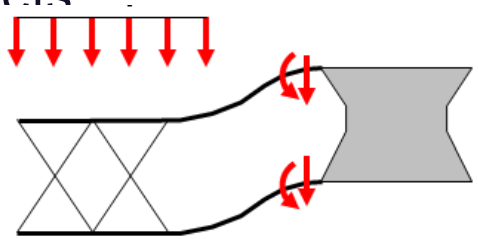
Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

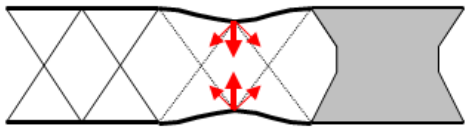
Influence sur les nervures (1/3)

- Les efforts dans les hourdis augmentent au droit des ruptures de diagonales, par 2 effets:

Passage de l'effort tranchant au droit des X rompus



Flexion locale due aux câbles d'X dégradés



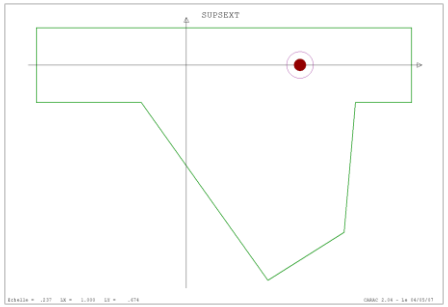
- L'effet local est prédominant en raison du fort équilibrage de l'effort tranchant
  → peu de différence Glacières / Sylans
  → charges permanentes majoritaires (influence limitée du trafic routier)

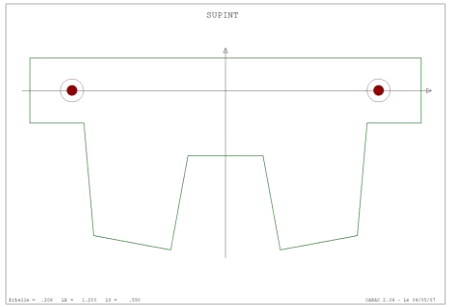
Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

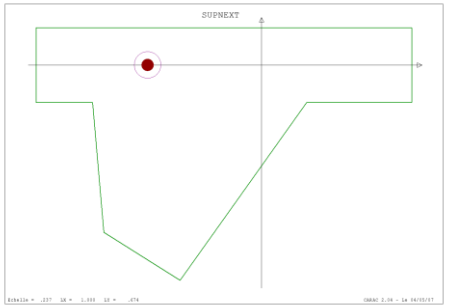
Diagnostic – Approche calculatoire

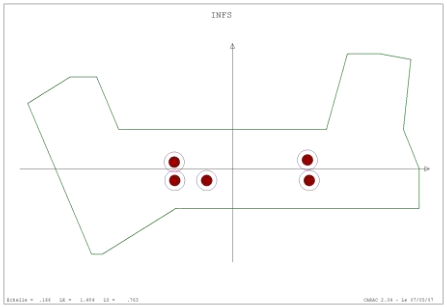
Influence sur les nervures (2/3)

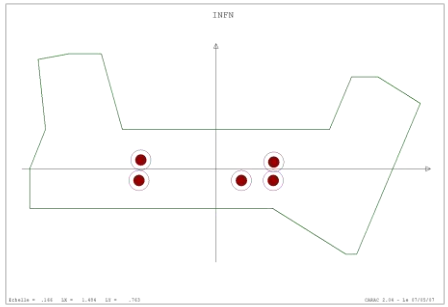
- Ruptures d'X progressives sur voussoirs 1 et 2 près de l'appui
- Récupération des efforts dans les nervures
- Calcul local béton armé sur ces nervures











Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

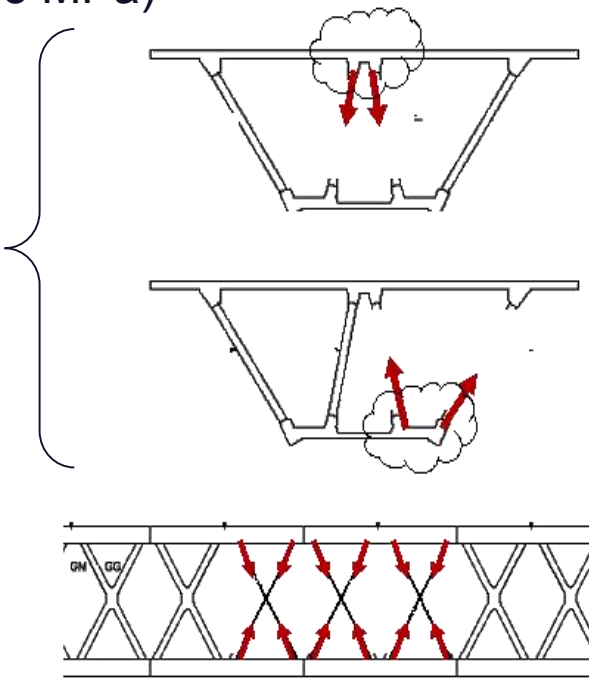
Influence sur les nervures (3/3)

- La rupture d'un plan de 2 X est admissible pour les nervures (σ_b^{max} ~ 30 à 35 MPa pour f_{c28}=45 MPa)

- Cas de ruines :

  Rupture de 2 plans d'X adjacents
  → rupture nervure ou concourent les plans

  Rupture de 3 X longitudinalement
  → nervure libre trop longue



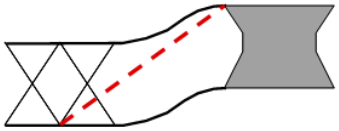
- **Cas de ruines valables avec ou sans trafic routier**

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

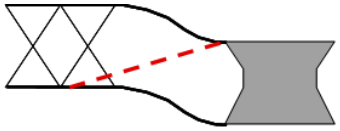
Diagnostic – Approche calculatoire

Influence sur les câbles extérieurs:

- Indispensables à la réduction de l'effort tranchant à passer dans les diagonales
- Déformations lors de la rupture d'X



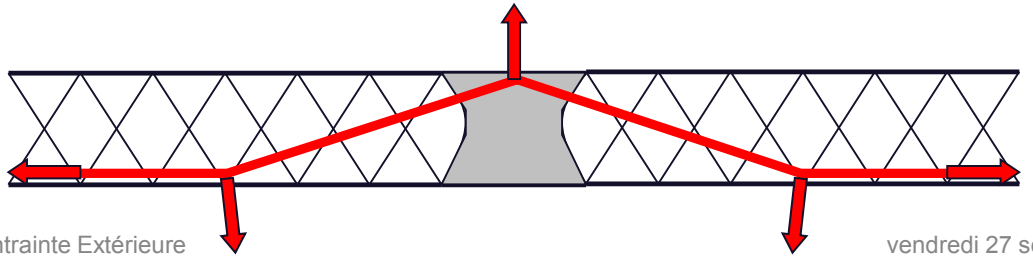
Surtension câble extérieur



Détension câble extérieur

→ Surtensions / Détensions limitées à 5%

- **La rupture brutale d'une paire de câbles (non concomitante à des ruptures d'X) reste admissible pour les X**



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Approche calculatoire

Conclusions (1/2)

- Le recalcul avec caractéristiques mesurées ne montre pas de différences majeures avec les calculs d'exécution
- Les câbles extérieurs sont un élément majeur de la sécurité des tabliers
- Lors de la rupture totale de 2 X, reports sur les diagonales adjacentes insuffisants pour créer rupture en chaîne des X
- La perte de stabilité des tabliers est conditionnée par les effets locaux sur les nervures des hourdis
- Les modes de ruines apparaissent à la rupture de 3X longitudinalement, ou deux plans adjacents de 2X

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

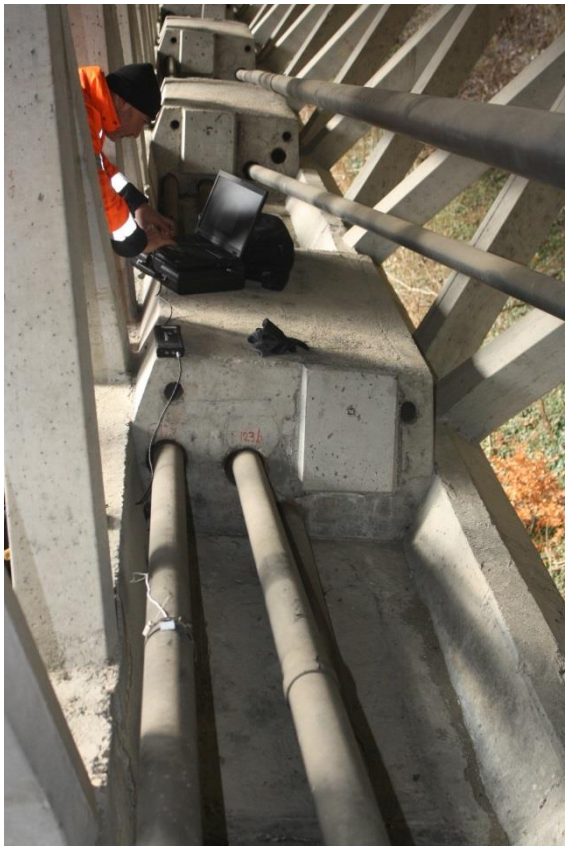
Diagnostic – Approche calculatoire

Conclusions (2/2)

- Les cas de ruines sont valables avec ou sans trafic routier → Celui-ci peut être maintenu dans la limite des cas de dégradations dégagés
- Les cas étudiés sont largement enveloppe des dégradations réelles (rupture totale)
- La localisation des efforts autorise plusieurs dégradations distantes d'au moins 2 voussoirs
- Réparations restent nécessaires pour assurer la pérennité des tabliers
- Plan de surveillance des diagonales et des câbles extérieurs à maintenir

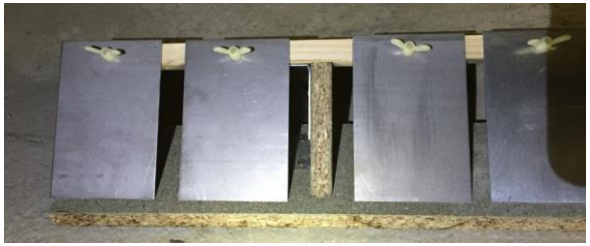
Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

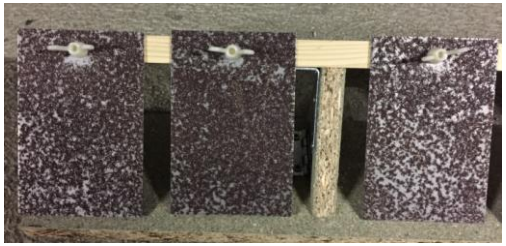
Diagnostic – Mesures complémentaires in situ



- Pose de plaquettes de test de corrosivité dans le caisson pour caractériser l'agressivité de l'atmosphère => air très corrosif (air humide en l'absence de confinement et phénomène de brouillard salin).

- Auscultation par mesures vibratoires de certains câbles de la zone de rupture => pas de pertes de tension ou de baisses d'inertie constatées synonymes d'une rupture de torons.





Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Recherche de moyens de CND

Poursuite du diagnostic des manchons d'assemblage par CND (QUADRIC/CEREMA Lyon/Bordeaux et IFT Stuttgart/ROTEC) :

- Caméras thermiques => non satisfaisantes
- Sondes CP => peu adaptées
- Gammagraphie => procédé lourd
- Essais en laboratoire et in situ de bobines électromagnétiques à électro-aimants (CEREMA) et à aimants permanents (ROTEC) . Passage de la bobine sur les zones les plus « suspectes » dans un premier temps.

Bobine CEREMA



Bobine ROTEC



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Recherche de moyens de CND

Diagnostic par bobines EM :

- Ouverture de fenêtres sur quelques zones parmi les plus « suspectes »

Fenêtre F1 (anomalie détectée) :





Fenêtre F3 (défaut de témoins) :





Fenêtre F6 (avant ancrage bas) :





Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Mise en œuvre des CND

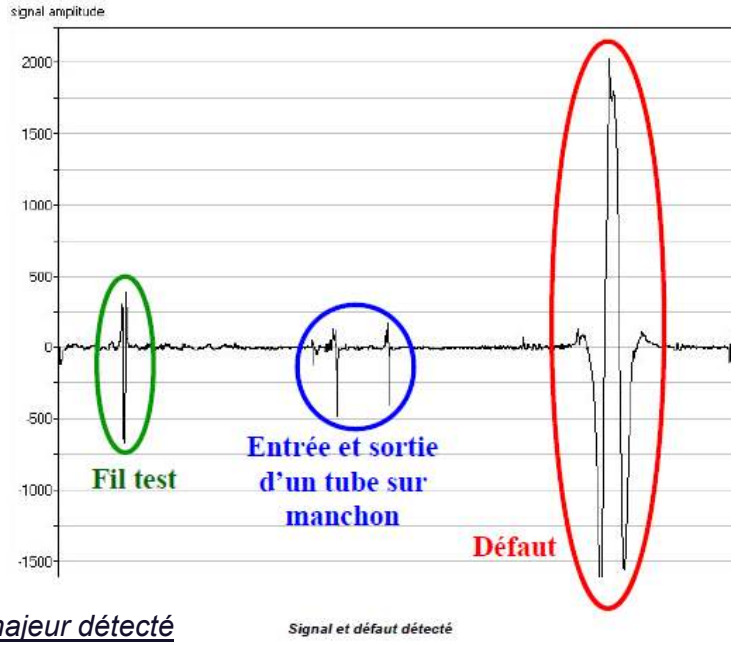
Diagnostic par bobines EM :

- Mise au point d'une bobine ROTEC plus adaptée au contexte de Sylans/Glaciaires. Optimisation du processus.
- Auscultation magnétique généralisée sur la précontrainte extérieure :

≈ 2/3 du linéaire de câbles (hors bossages/déviateurs/VSP) pouvant être auscultés

- Campagne en cours depuis août 2018 : environ 80% d'avancement à ce jour





Défaut majeur détecté

Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Diagnostic – Mise en œuvre des CND

Diagnostic par bobines EM :



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Réparations – Remplacement d'un câble pathologique

- Sciage du câble en tension (sous coupure de l'A40) piloté à distance avec mesures de protection (échafaudage tubulaire, pneus, sangles, etc.)







Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Réparations – Remplacement d'un câble pathologique

- Sciage du câble en tension (sous coupure de l'A40) piloté à distance avec mesures de protection (échafaudage tubulaire, pneus, sangles, etc.)



Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

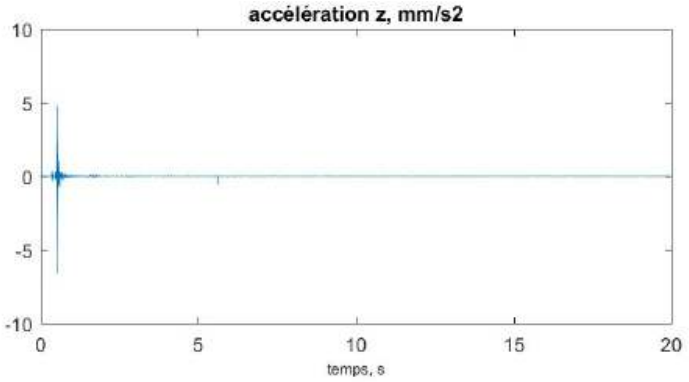
Réparations – Remplacement d'un câble pathologique

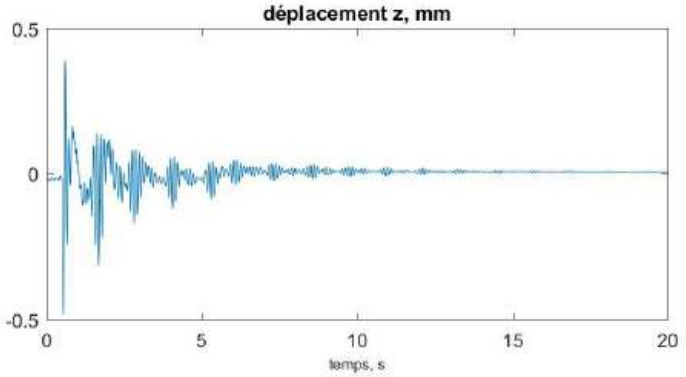
- Instrumentation de la découpe :

- Enregistrement vidéo de la découpe sous plusieurs angles

- Mesures acoustiques par sonomètre : niveau sonore jugé acceptable

- Mesures des vibrations de la travée par accéléromètres : accélération émise par la rupture très significative par rapport au passage d'un PL (facteur 10)





Diagnostics et réparations des Viaducs de Sylans Glacière (A40)

Réparations – Remplacement d'un câble pathologique

Caractéristiques du nouveau câble :

- 9T15S en monotorons gainés graissés (contre 12 sur l'existant en raison de l'encombrement dans la gaine).
- Classe 1860 MPa au lieu de 1770 MPa
- Sur-tendus à 0,95 $f_{p0,1k}$
- Injection au coulis de ciment

Réparations définitives des fenêtres de diagnostic par demi-coquilles PEHD soudées :



