

IMGC

.L'INSTRUMENTATION AU SERVICE DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Journée Technique

MARDI 13 JUIN 2023

FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS

Diagnostic des ouvrages : pont sur le canal d'Arles à Bouc sur la RD268

Un cold-case enfin résolu !



François MARTIN

Diagnostic de l'ouvrage franchissant le canal sur la RD268

- Dans le cadre de la remise à niveau de l'ouvrage suite à un recalcul global datant de 2019, avec comme perspective une réhabilitation complète de la structure avec éventuellement renforcement et vérinage, le CD13 a passé un AO pour établissement d'un marché portant sur les 2 lots suivants :
  - Lot 1 : Caractérisation générale de l'ouvrage
  - Lot 2 : Pesée des réactions d'appui

Le LERM a été mandaté pour réaliser les investigations générales en lien avec le lot 1 , en février 2022

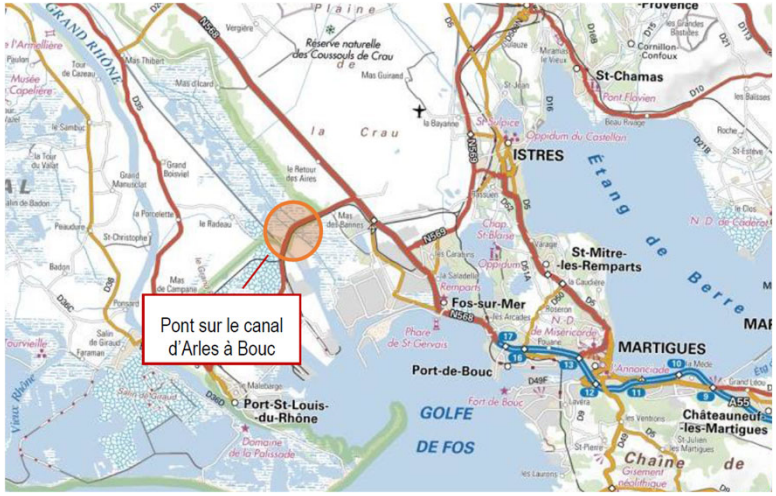
Sommaire

- Présentation générale de l'ouvrage : situation, mode constructif, historique…
- Programme technique détaillé
- Contraintes, timing
- Constats. Résultats
- Perspectives





Présentation de l'ouvrage





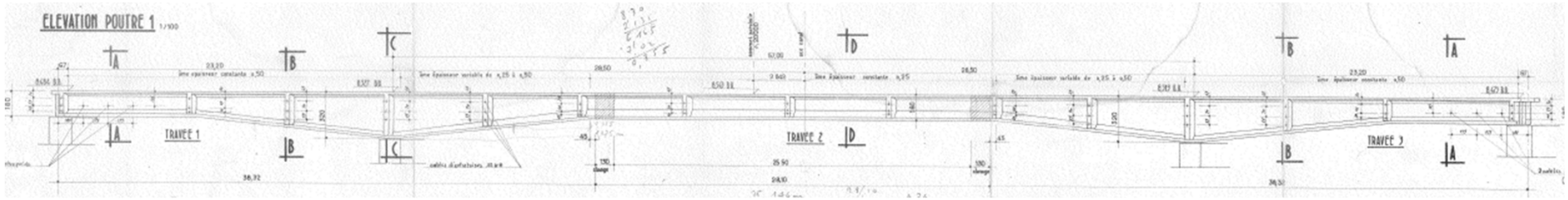
- Description :
  - Mise en service en 1970
  - Ouvrage comportant 3 travées d'inertie variable
  - Biais important
  - Structure constituée de 4 poutres en béton précontraint, régulièrement entretoisées, et supportant un hourdis également précontraint
  - Particularités :
    - Contre-poids précontraint coulé entre les poutres sur chaque travée de rive, très courte, côté culée
    - Mode constructif spécifique
    - Présence de zones de clavage sur les poutres de la travée centrale

Présentation de l’ouvrage



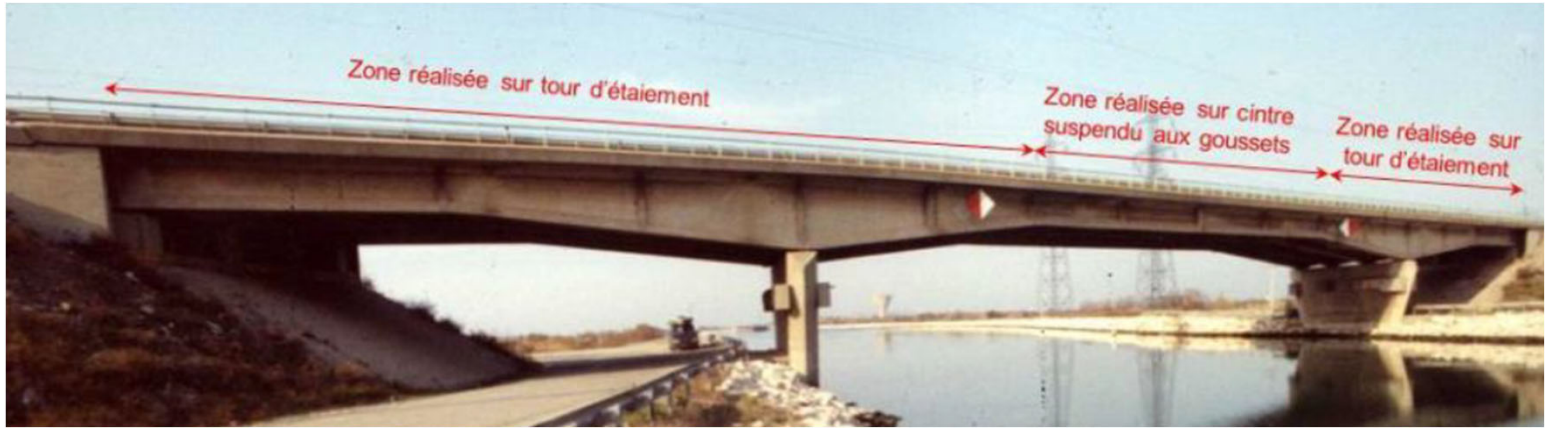






- Portée : 23,2 m – 70 m – 23,2 m.
- Longueur totale : 104,75 m, largeur : 14,7 m (3 voies de circulation)
- Biais de 70,2 gr environ
- 4 poutres
- 14 entretoises : 4 sur appuis et 10 intermédiaires
- Précontrainte trans. et longi. : câbles STUP 12Ø8

Mode constructif



- 1 / travées de rive et goussets TC réalisés sur tour d'étaiement puis mis en précontrainte
- 2/ TC bétonnée sur cintres suspendus avec création de zone de clavage
- 3/ mise en place d'une précontrainte de continuité

- Ouvrage conçu en 1969 selon les règlements en vigueur
  - Règlement du Béton Armé : Circulaire MEL n°68-119 du 11 décembre 1968 - fascicule 61, Titre VI (CCBA 68),
  - Règlement du Béton Précontraint : Circulaire n°44 du 12 août 1965 - Instruction provisoire relative à l'emploi du béton précontraint (IP1),
  - Charges : Circulaire n°65 du 19 aout 1960 - fascicule 61, Titre I à V - conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art (BC 30 tonnes + char de 100 tonnes)

Historique

- Constat de fissures sur les zones de clavage de la travée centrale → investigations à la suite
  - Campagne gammagraphique + ouvertures →globalement ok
  - Essais de chargement → RAS pour les flèches mais les fissures »respirent » sous la charge
- Recalcul en 1981 → dimensionnement globalement satisfaisant…avec les hypothèses considérées de l'époque
- Pontage des fissures
- Vérinage de l'ouvrage en 1983 afin d'augmenter le gabarit de navigation : consoles d'appui sur les piles



Compte tenu de ces constats, l'ouvrage présente quelques caractéristiques spécifiques favorisant la fragilité des zones de clavage : époque de construction, zones de discontinuités, (biais important), type de précontrainte

- Travaux sur les remblais adjacents en 1985 suite à constats de tassement
- IDP 1988 : décollement des pontages, idem en 2001
- IDP 2007 : notation 3U, fissures > 0,3mm
- IDP 2018 : 3US, non-conformité des garde-corps
- 2019 : recalcul générant alors des besoins d'investigations complémentaires

Programme des investigations

- Caractérisation de la précontrainte :
  - Relevé des câbles de précontrainte
  - Implantation, ouverture et fermeture de fenêtres
  - Mesure de tension à l'arbalète
  - Examen des cachetages d'ancrages
  - Prélèvement de coulis et analyse chimique
- Caractérisation complémentaire :
  - Détermination des épaisseurs de chaussée
  - Présence amiante / HAP
  - Relevé géométrique de l'ouvrage
- Caractérisation physico-chimique des bétons et des aciers :
  - Prélèvement et analyses en laboratoire
  - Relevé de ferraillage avec mesure d'enrobage
  - Contrôle de la continuité du ferraillage passif en hourdis et au clavage
  - Contrôle du degré et de la vitesse de corrosion des armatures passives
  - Essai de traction directe

Assez classique dans le cadre d'un ouvrage précontraint nécessitant un recalcul éventuellement complété d'un renforcement

- Instrumentation des zones de clavages
  - Mesure du gradient thermique et des moments de décompression sous circulation
  - Détermination des moments de décompression par courburemétrie sous chargement maîtrisé

A noter, toutefois ici, une attention particulière sur la problématique des zones de clavage

Contraintes. Timing

- Ouvrage fortement circulé : liaison routière entre GPMM / sites industriels de Fos sur Mer et Port St Louis
- Ouvrage franchissant :
  - le canal d'Arles à Bouc (en réalité Port St-Louis ou Fos sur Mer)
  - 2 voies (en rives gauche et droite) desservant des sites industriels

Par conséquent,

1 / horaires de balisage relativement restreints ;

2 / 3 à 4 mois pour obtention d'une coupure totale pour essai de chargement (de nuit) avec déviation de 40km pour les usagers

et 3 / présence d'hirondelles rustiques…suite à un constat des écologues

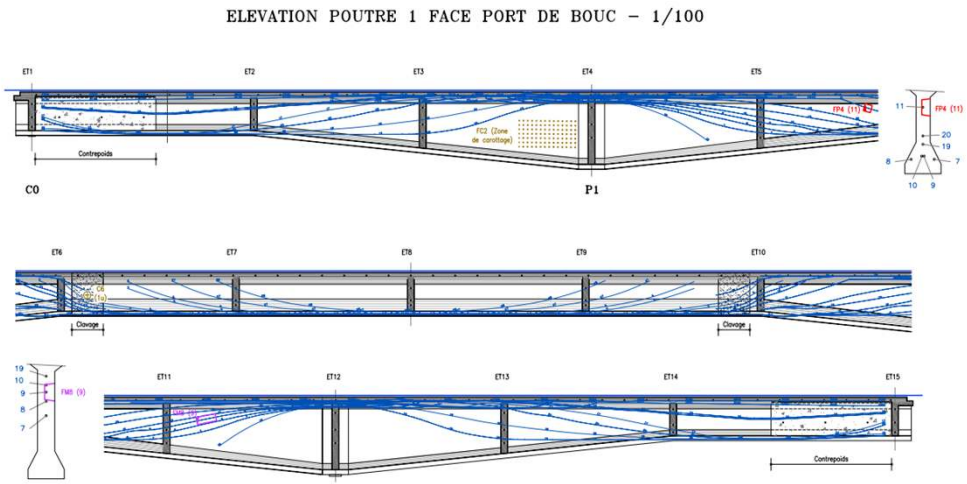
- Notification du marché : février 2022
- Planning initial : démarrage en mai 2022 pour 4 semaines
- **Planning final : au final, démarrage en octobre 2022**

Constats et résultats

Le diagnostic général s'est donc appuyé sur des phases distinctes d'essais et d'expérimentations

- Diagnostic classique :
  - Mesures à l'arbalète
  - Caractérisation générale
    - Béton armé
    - Chaussée
    - Géométrie / levé topo
- Instrumentation et comportement mécanique de l'ouvrage :
  - Mesures de courbures et de gradient sous circulation
  - Epreuves de chargement

Constats et résultats : diag. classique

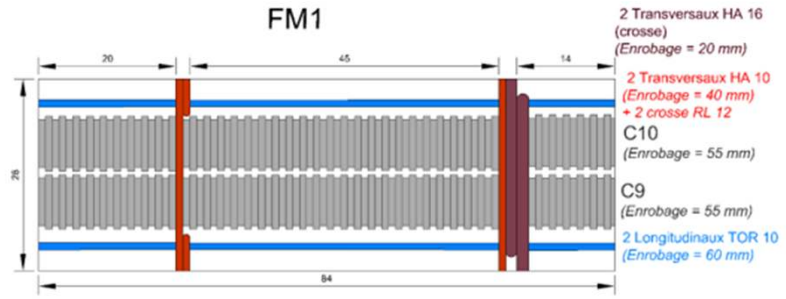


- F mécaniques : 8 sur poutres (dont 4 à L/2) + 3 sur entretoises + 3 sur hourdis
- (F pathologiques : 4 sur poutres)

		Nombre total	Nombre de fils testé	% de fils testé dans le cadre de l'étude
Poutres (Précontrainte longitudinale)	Câbles de précontrainte	30	28	7,77 %
	Fils de précontrainte	360		
Entretoises (Précontrainte transversale)	Câbles de précontrainte	33	6	1,51 %
	Fils de précontrainte	396		
Hourdis (Précontrainte transversale)	Câbles de précontrainte	113	6	0,44 %
	Fils de précontrainte	1 356		

Poutre PT2 –Mi-travée/ en sous face de poutre / Fenêtre FM1

Câble testé (câble 9 et 10)



Toron testés	*Tension moyenne du fil (kN/fil)*	*Contrainte (MPa)*
2 fils sur câble 9	33,1	659
2 fils sur câble 10	28,4	565

Constats et résultats : diag. classique



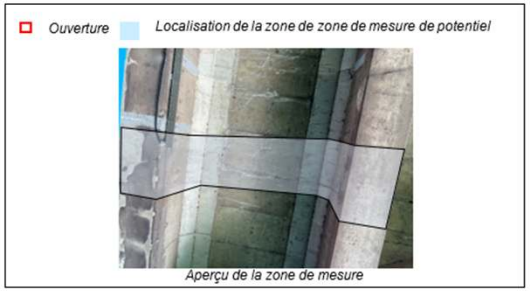


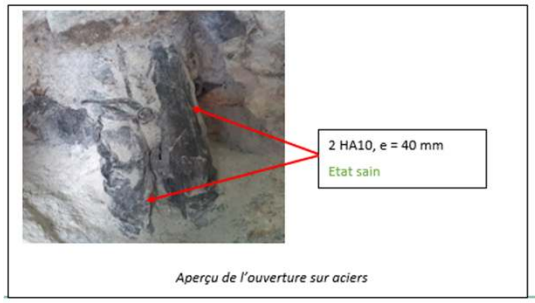
- Contrainte moyenne théorique : **920 MPa** (71 % de la contrainte initiale à l'ancrage
- En moyenne, la tension mesurée sur la précontrainte longitudinale est de 35,5 kN par fil, soit **707 MPa**
- Déficit de l'ordre de 23 % par rapport à la valeur calculée
- La valeur de 707 MPa est à mettre en regard avec la contrainte initiale (130 hbar ou 1300 MPa)

Déficit très net de précontrainte à mettre certainement en relation avec le problème de fiabilité des ancrages 12Ø8

Constats et résultats : diag. classique

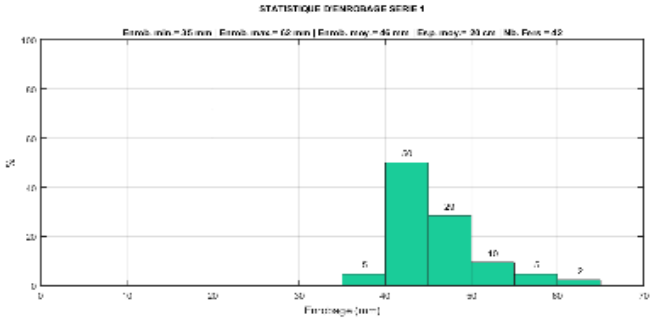
- Propriétés mécaniques globalement satisfaisantes. Idem pour les paramètres de formulation
- Mesure de la cohésion superficielle des bétons → résultats homogènes et > 2,8 MPa
- Epaisseur de chaussée homogène sur l'ouvrage
- Pas ou de peu de déformation des AA
- Bon état de conservation des matériaux en œuvre
- Globalement peu ou pas de désordres
- Activité de corrosion très faible
- Phénomène de carbonatation notable et au maximum de 30 mm sur poutre
- Pollution en chlorures et en sulfates quasi inexistante
- Enrobage globalement correct, le plus souvent > 40mm











Constats et résultats

Le diagnostic général s'est donc appuyé sur des phases distinctes d'essais et d'expérimentations

- Diagnostic classique :
  - Mesures à l'arbalète
  - Caractérisation générale
    - Béton armé
    - Chaussée
    - Géométrie / levé topo
- Instrumentation et comportement mécanique de l'ouvrage :
  - Mesures de courbures et de gradient sous circulation
  - Epreuves de chargement

Instrumentation et comportement mécanique de l'ouvrage

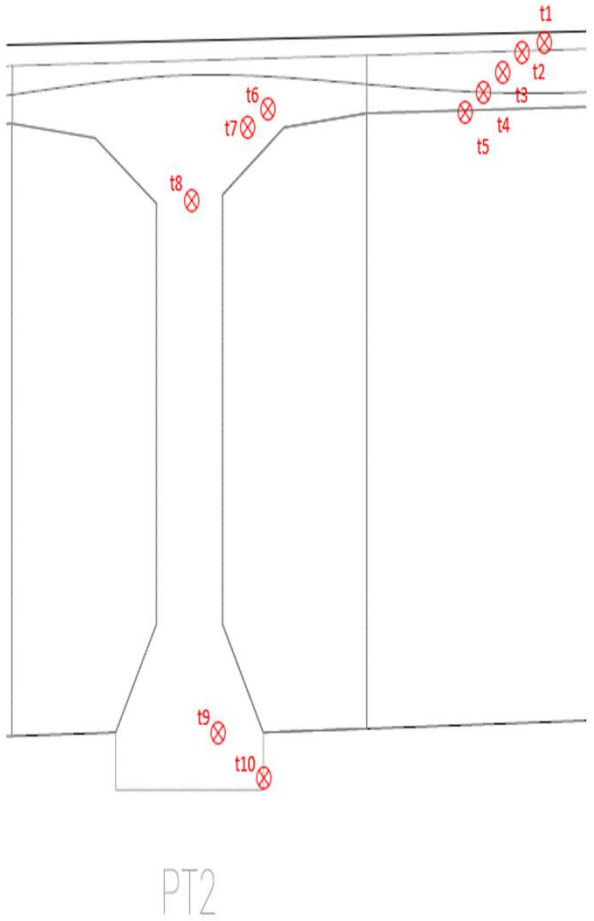
- <u>Mesure du gradient thermique :</u>
  - initialement prévues sur la période mai/juin afin de théoriquement bénéficier des amplitudes maximales de mesures
  - au final, réalisées à l'automne 2022
  - mesures sur 40 jours en continu : 6/10 au 17/11 sur la poutre P2

- <u>Mesure de la courbure en 2 étapes :</u>
  - sous circulation, pendant 40j en continu :
    - instrumentation des zones de clavage des poutres de rive : 4 courburemètres
  - pendant une épreuve de chargement, dans les 2 sens de circulation :
    - instrumentation des zones de clavage des poutres de rive : 4 courburemètres
    - instrumentation à partir de la chaussée des poutres de rive : 2 courburemètres à L/2

Mesure du gradient thermique

- Instrumentation d'une section de poutre :
  - sélection de la poutre P2
  - pose de 10 sondes température
  - objectif : réaliser un profil de températures dans la hauteur de l'ouvrage (poutre et hourdis) : **dT** en °C
  - mesures sur 40 j avec scrutation de 10 min

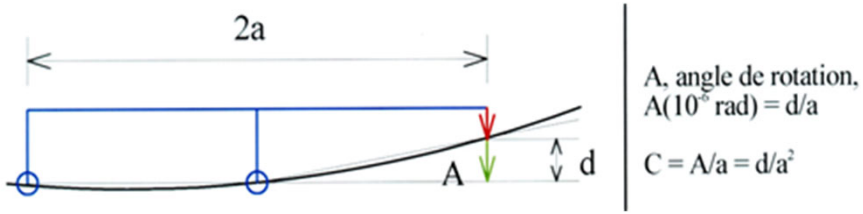


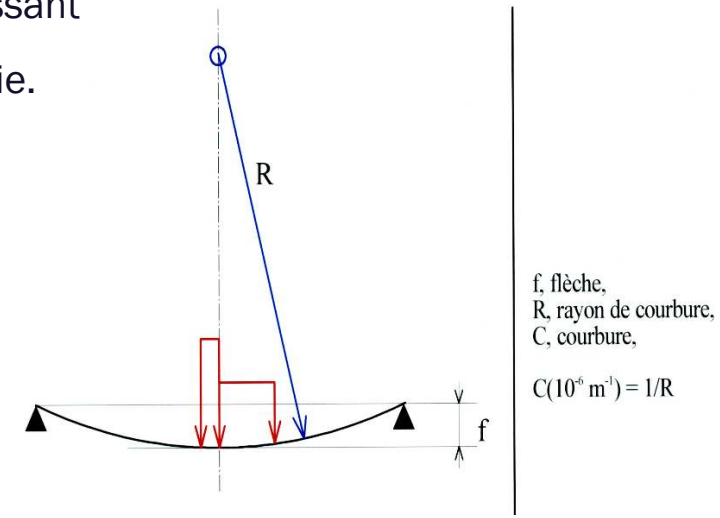


Mesure de la courburemétrie

- Sous l'effet d'une charge, une section de béton prend une courbure. La courbure C reflète les contraintes subies par la section et est donc directement reliée au moment fléchissant
- C = 1 / rayon de courbure (R), est proportionnelle à la sollicitation subie.

S'exprime en (10^{-6}) m^{-1}





- Mesurée à l'aide d'un courburemètre équipé d'un capteur de déplacement micrométrique

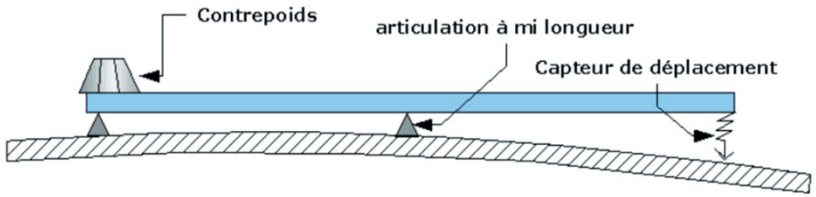


Schéma de prinicpe du courburemètre (CEREMA)

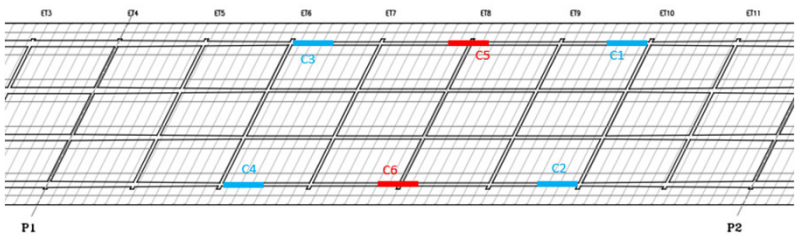
- La courbure s'exprime alors à partir de la valeur fournie par le capteur de déplacement : cette méthode est très « sensible », les déplacements mesurés peuvent être de plusieurs centaines de µm. C'est une mesure locale
- Enfin, lors d'un essai de chargement progressif, la mesure de courbure cherche à détecter une modification nette dans le comportement en flexion de la structure / section étudiée → écart entre la courbure et les moments résultants de la sollicitation

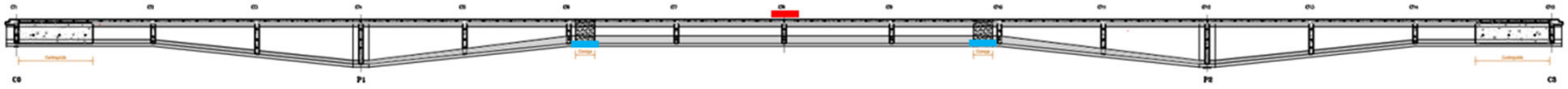
Mesure de la courbure

- Instrumentation des zones de clavage des 2 poutres de rive :
  - pose de 4 courburemètres de 2,2 m enjambant la zone de clavage (1,3 m)
  - courburemètre et capteurs protégés par une protection anti-volatile !
  - mesures sur 40j espacées de 10min



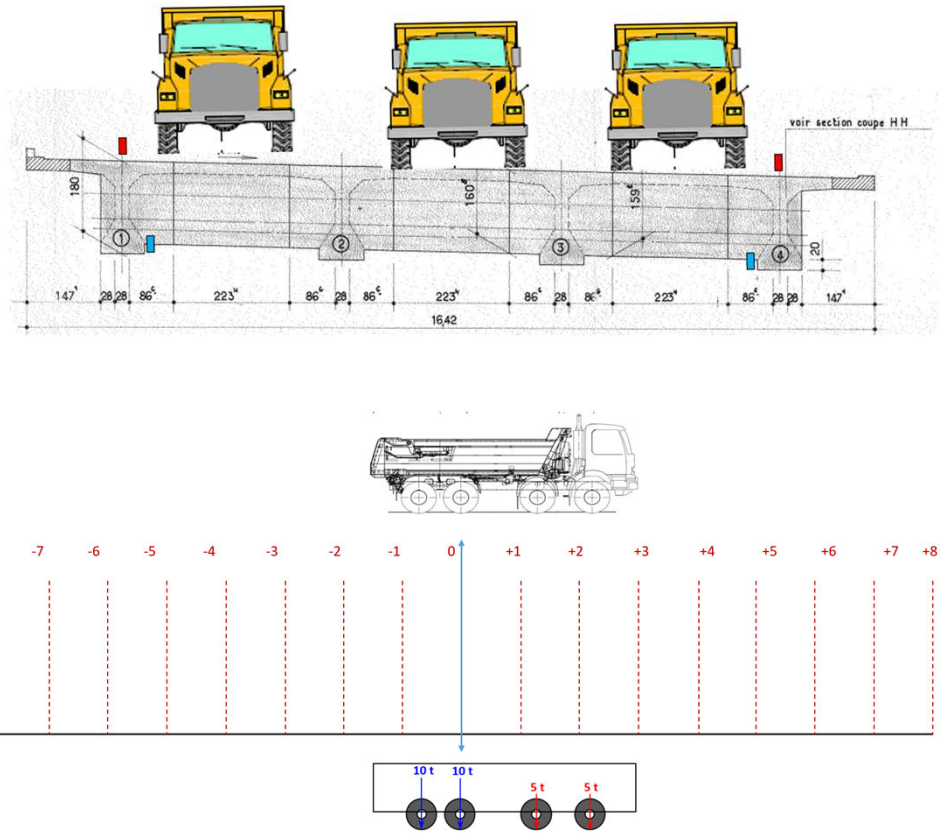






Mesure de la courbure

- sous chargement maîtrisé
- 3 camions 8x4 de 30t
- 17 positions x 2 sens : FSM → PSL puis PSL → FSM
- surveillance sur la base :
  - des 4 courburemètres sur poutre
  - des 2 couburemètres sur chaussée, à L/2
  - enregistrement toutes les 2 secondes

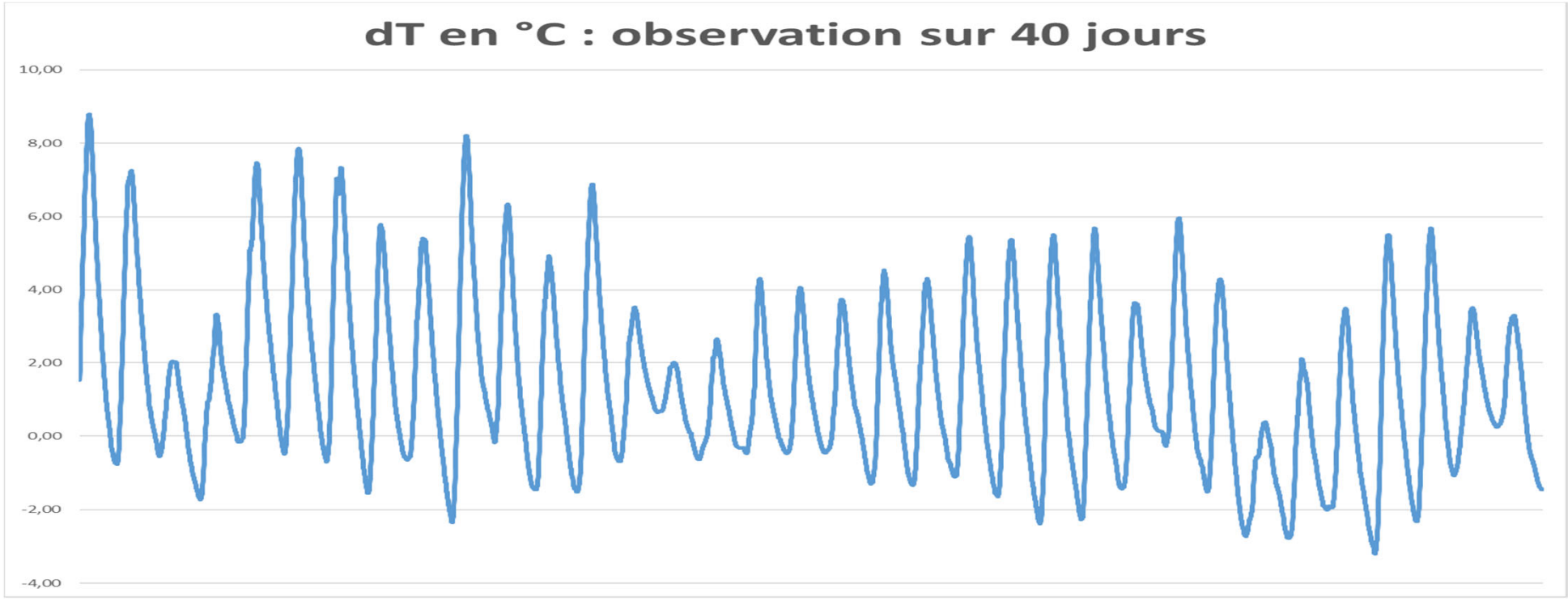






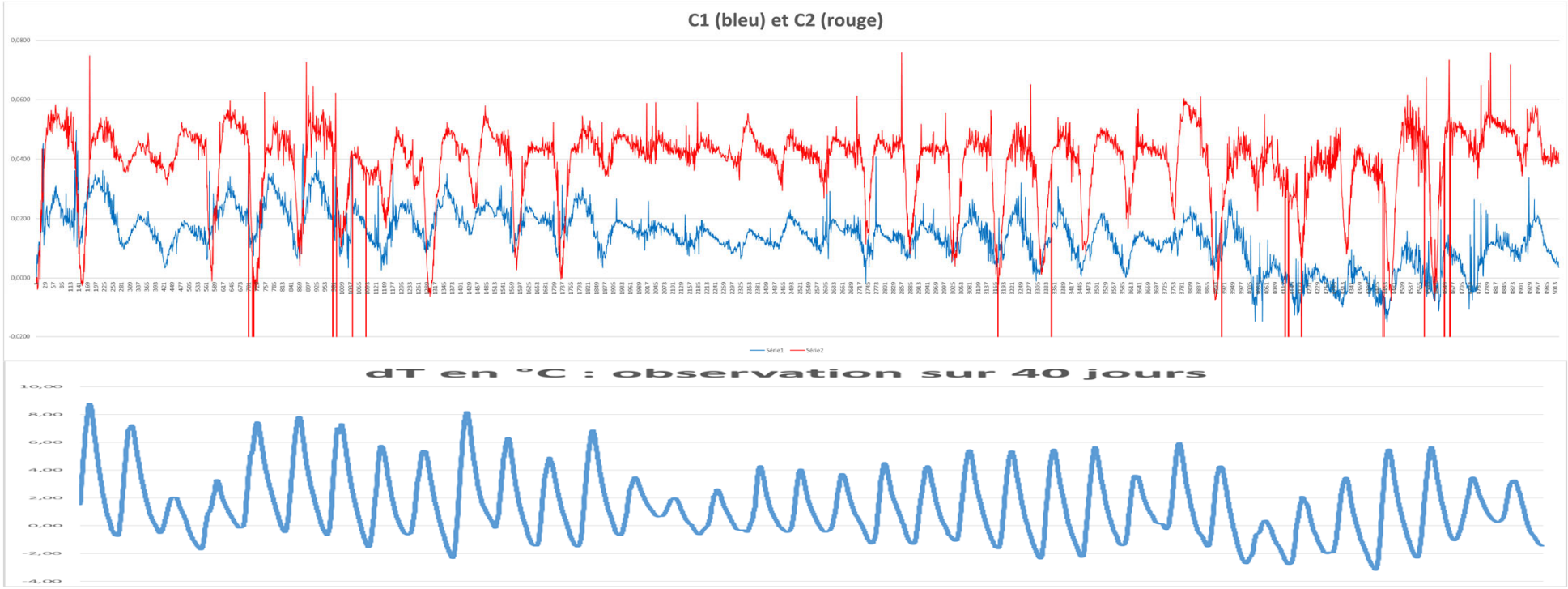
Constats et résultats : mesure de gradients

- au final, mesures intéressantes…malgré la période
- les gradients présentant une amplitude jusqu'à +7 voire + 8°C



Constats et résultats : mesure de gradients et de courbure sous circulation

- Très bonne corrélation entre les variations de courbure dans les zones de clavage fissurées et le gradient thermique
- Un exemple : comparaison des déplacements constatés sur C1/C2 et du gradient thermique → **les variations de courbures sont en lien direct avec le gradient thermique**



Constats et résultats : mesure de gradients et de courbure sous circulation

- Mise en évidence de l'intensité du trafic par quelques pics liés au passage de camions → augmentation brutale du déplacement de courbure au passage de 1 camion ou mieux au croisement de 2 camions

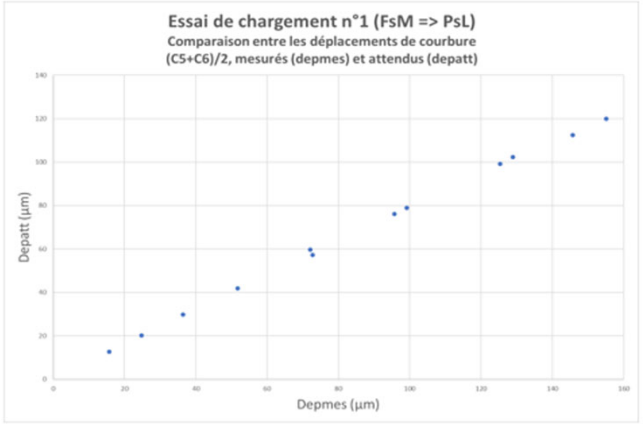




- Ici, le changement de courbure est de 60 µm entre 2 scrutations puis brutalement de 140 µm…

Constats et résultats : épreuve de chargement maîtrisé

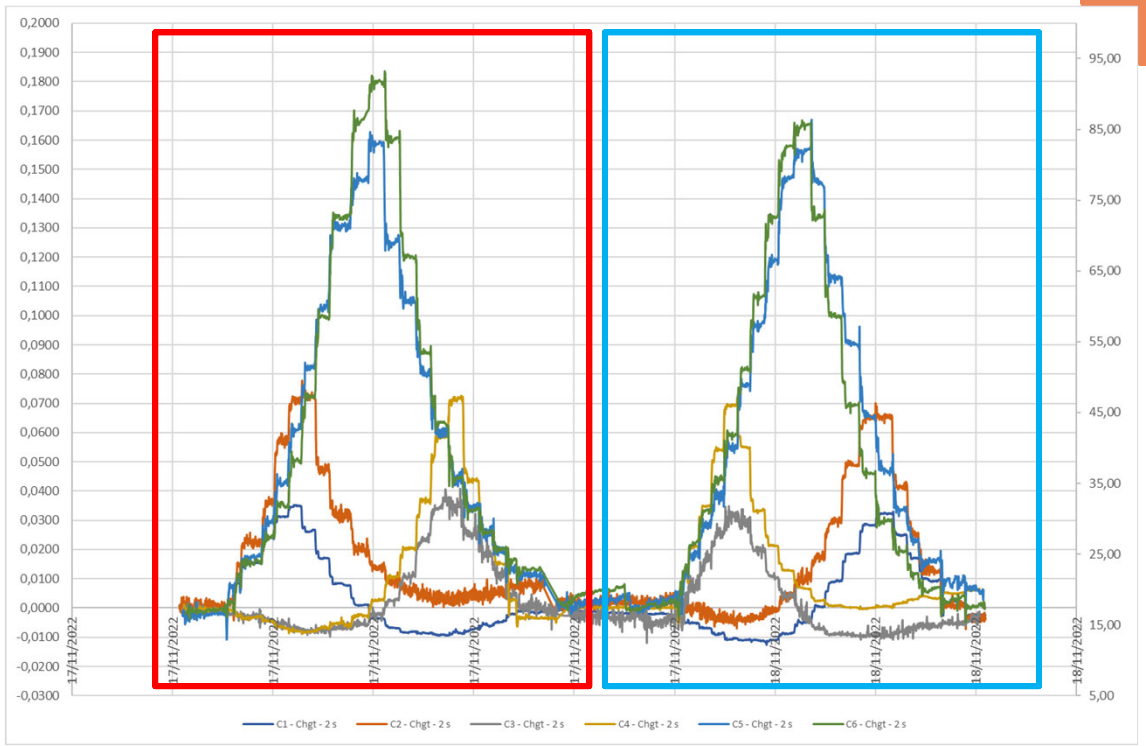
- Les zones de clavage C1 et C3 (poutre de rive Nord) « fournissent » une réponse très proche de celle attendue au niveau des pré-calculs
- Côté Sud, réponse en mode dégradé : les déplacements mesurés sont quasi au double de la réponse attendue → ensoleillement, biais, … ?
- Concernant les courburemètres sur chaussée, on obtient un comportement globalement linéaire sur toutes les épreuves de chargement (depmes/depatt)



- Gradient thermique de l'ordre de +1°C

Constats et résultats : épreuve de chargement maîtrisé





- Sens FSM → PSL
- Sens PSL → FSM
- Comportement quasi symétrique

Synthèse

- Après 50 ans de bons et loyaux services, les matériaux présentent un bon état de conservation
- Les zones de clavage sont fissurées
- Les déformations mesurées côté Sud sont systématiquement + élevées
- **L'origine des fissures (clavage) est en lien 2 causes principales :**
  - Non-prise en compte des effets du gradient thermique dans le dimensionnement de l'ouvrage

  → Mis en évidence par la (très bonne) corrélation gradients thermiques / ouverture fissure

  - Déficit de précontrainte en lien avec le manque de fiabilité du système d'ancrage

  → Mis en évidence par les mesures réalisées à l'arbalète

- Selon les cas de charge pris et les gradients thermiques envisagés, la comparaison entre les calculs de 1981 et ceux issus de la campagne 2022 indique :
  - des contraintes de traction supplémentaires de +5 à +6MPa à mi-portée de T2
  - de +2 à +3,5 MPa aux clavages

Perspectives. Suite à donner

A ce stade, et dans le cadre du dimensionnement du projet de renforcement de l'ouvrage, il semble nécessaire de compléter les données d'entrée par

- Surveillance des valeurs critiques sur période longue car l'instrumentation (sondes de T et courburemètres) est toujours en place. Une campagne complémentaire devrait démarrer prochainement, et ce sur une période « plus adéquate »
- Caractérisation complémentaire des zones de clavage :
  - Valeur de la Rc ?
  - Estimation du module d'élasticité ?
  - Continuité du ferraillage passif ?

Diagnostic des ouvrages : pont sur le canal d'Arles à Bouc. RD268



Merci pour votre attention