



Concours Jeunes AFGC 2021 Viaduc sur la Mayenne

Arnaud BOUARD – Responsable Technique Ouvrages d'Art - SCE



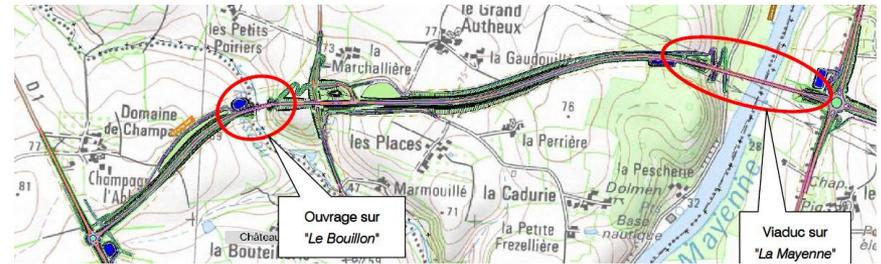
sce

Aménagement
& environnement

Principe de l'ouvrage

Contexte du concours

- ▶ Contournement Nord de Château-Gontier
- ▶ Environ 300 m à franchir, sans appui dans le lit mineur de la Mayenne (120 m)
- ▶ 28 m au dessus de la Mayenne



Voies à porter

- ▶ Deux voies routières de 3,50 m chacune (charges Eurocodes + convois exceptionnels type C2 et E2F1)
- ▶ Une voie pour modes doux de 3 m et séparée du reste de la chaussée

Proposition du groupement SCE – AOA – APC

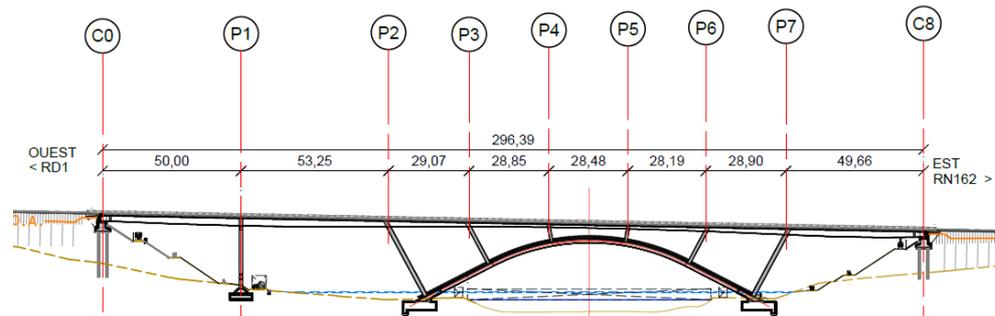
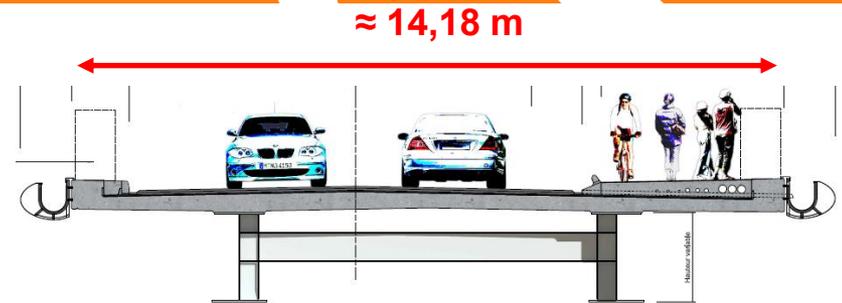
- ▶ Un pont en arc portant le tablier par l'intermédiaire de pilettes inclinées
- ▶ Bonus : traversée piétonne d'une rive à l'autre via l'arc



Le tablier, courant mais pas si simple

Conception

- ▶ Coupe transversale assez courante (bipoutres mixtes)
- ▶ Mais ...



- Position excentrée de la Mayenne
- Balancement des travées non optimal (position de P1 imposée par VC1 et zone humide)
- Hauteur de poutre dictée par parti architectural
- Tablier appuyé sur pilettes et non sur pile

**Tablier courant géométriquement
mais pas structurellement !**



Nombreuses itérations de calcul pour aboutir à la répartition matière la plus économique possible

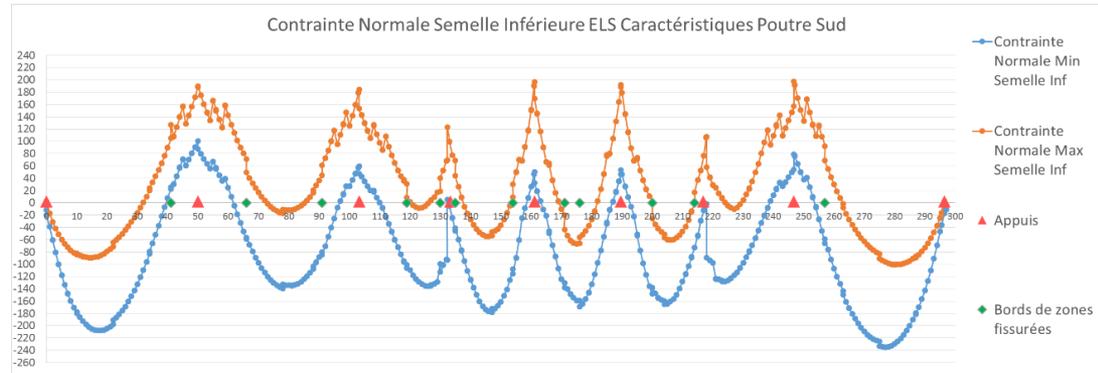
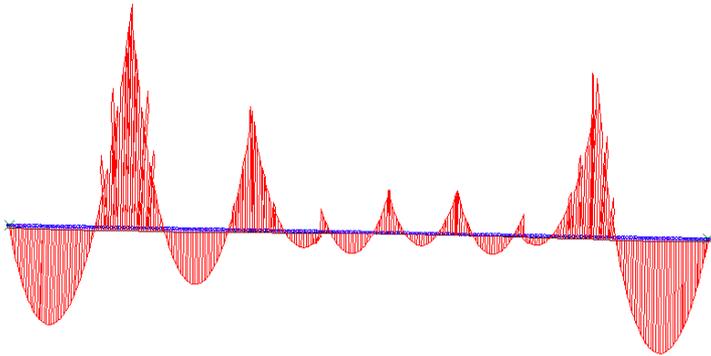
Le tablier, courant mais pas si simple

Objectif : obtenir des niveaux de contraintes similaires dans chaque section malgré des valeurs de moment très hétérogènes

CEREMA - CEREMA_CTOA

Viaduc sur la Mayenne

- ST1

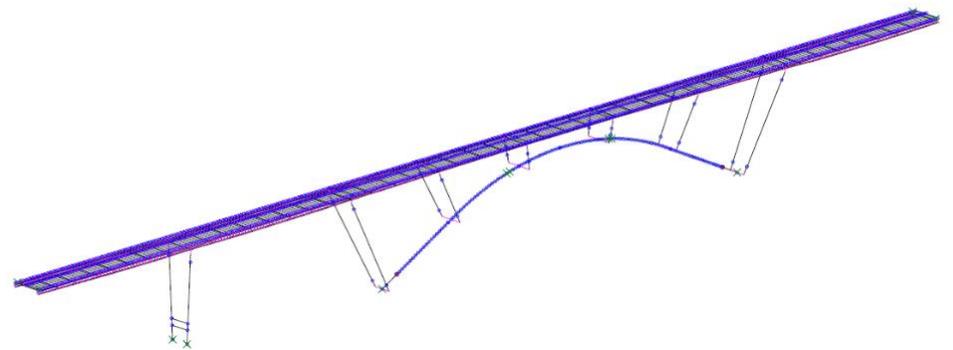


CEREMA - CEREMA_CTOA

Viaduc sur la Mayenne

- ST1

- ▶ Calcul phasé (historique de construction estimé) et recherche des zones fissurées
- ▶ Vérifications en contraintes ELS et en capacité ELU (selon classe 1 à 4 des tôles)
- ▶ Vérification au déversement (et conception des entretoises en conséquence)
- ▶ Justification en fatigue (limite l'emploi de nuance S460)
- ▶ Vérification faisabilité lancement (1 depuis chaque rive)



L'arc, le cœur de l'ouvrage

Conception « intérieure » - Principe fondamental

- ▶ Nombre très restreint de pilettes ⇔ Arc non funiculaire de ses charges principales ⇔ Arc très fléchi

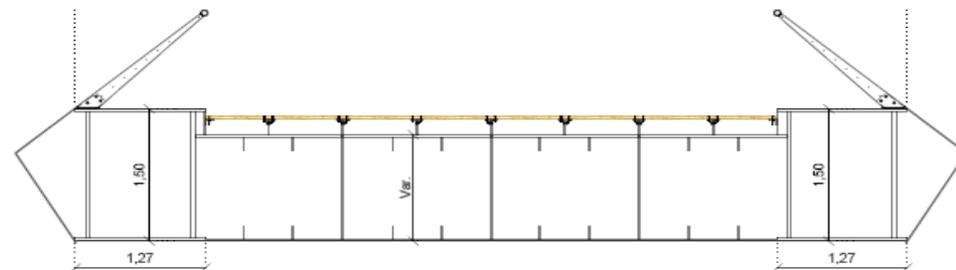
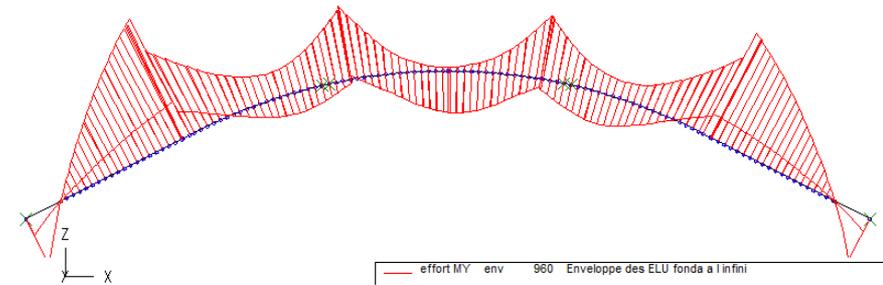
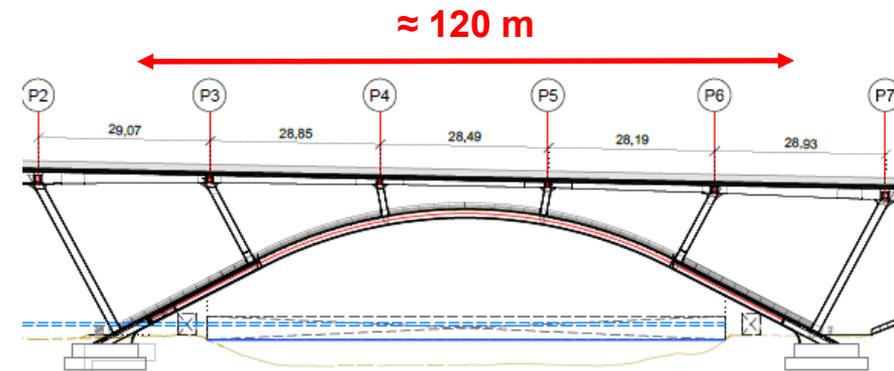
➔ **Trainage de cisaillement très important !**

- ▶ Charges ponctuelles très importantes sur arc (jusqu'à 7500 KN ELU en pied de pilettes) et dissymétriques entre rives

➔ **Section nécessairement rigide en torsion pour limiter la flexion transversale**

- ▶ Choix concepteur : limiter les réductions de sections sous TC à 25% environ, pour que les ELS ne soient pas dimensionnant vis-à-vis des ELU

➔ **Définition de la section en caisson multicellulaires à 7 âmes**



L'arc, le cœur de l'ouvrage

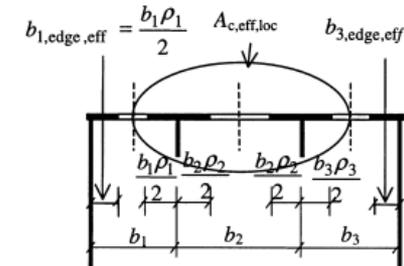
Définition des épaisseurs de tôles - Principe

Equilibrage des contraintes entre fibres supérieure et inférieure par modulation des épaisseurs de semelles, en visant ≈ 300 MPa aux ELU, après prise en compte du voilement de plaques

Equilibrage : diminuer V_z et augmenter W_z en zone de flexion positive et vice versa

Voilement : 2 paramètres possibles pour jouer sur l'importance du voilement de plaque : son épaisseur ou son raidissage => meilleur compromis entre coût matière et coût soudure à déterminer pour chaque section

- ▶ En rive : intéressant d'épaissir légèrement car déjà épaisse et utile vis-à-vis du fonctionnement global + astuce de l'entraxe des âmes
- ▶ En zone centrale : intéressant de raidir car tôles fines surtout destinées aux flux de cisaillement (tranchant et torsion)



Calculs de voilement de plaque menés selon EN 1993-1-5

Paramètre	Sous panneau latéraux	Sous panneau central	Raidisseur en simple plat
	Position	Interne	Interne
C	0.42	0.37	0.15
t	0.025	0.025	0.015
ψ	1	1	1
c/t	16.80	14.80	10.00
f_y ou $\sigma_{réelles}$	355	355	355
ϵ	0.81	0.81	0.81
Classe mini	3	3	3
$k\sigma$	4	4	0.43
λp	0.364	0.320	0.660
ρ_{loc}	1.00	1.00	1.00

Voilement Global du panneau	Type Colonne		
		b1	0.210
		b2	0.185
		Asl1	0.012500
		$Z_{log}/\text{dessous plaque}$	0.028250
		Isl1	1.89E-05
		a	4
		$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl}$	196.19
		Asl1,eff	0.0125
		$\beta A,c$	1.0000
		λc	1.345
		α	0.49
		e1	0.0158
		e2	0.0718
		e	0.072
		i	0.039
		αe	0.656
		ϕ	1.780
		χc	0.34

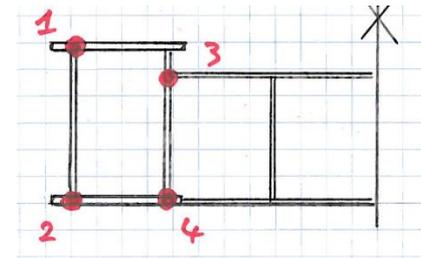
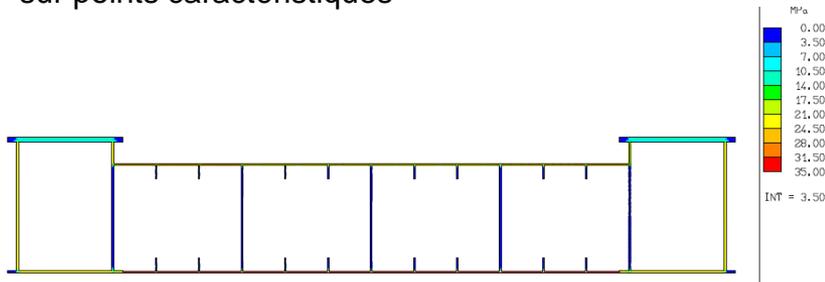
Type Plaque à 2 raidisseurs		
	b1	0.62
	b2	0.62
	Asl1 equ	0.025
	Isl1 equ	3.79E-05
	ac	3.174
	$\sigma_{cr,st}$	621.46
	λp	0.756
	ρ	0.94

Interpolation	Méthode	à 2 raidis.
	ξ	2.17
	ξ retenu	1.00
	ρc	0.94
	Comportement type plaque dominant	

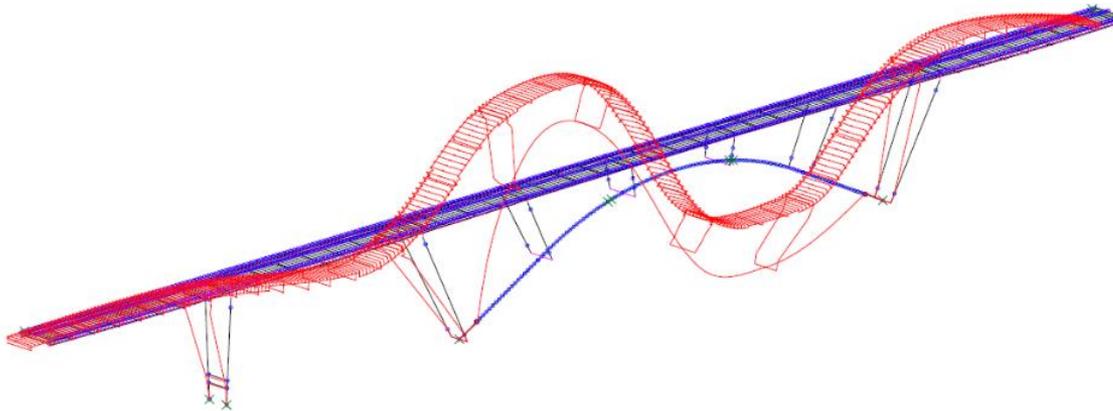
L'arc, le cœur de l'ouvrage

Justifications finales

- ▶ Analyse du comportement sous efforts tangentiels (voilement sous cisaillement) et Interaction toutes contraintes (σ VM) sur points caractéristiques



- ▶ Analyse des risques d'instabilités globales aux ELU (flambement)



1er mode d'instabilités = flambement dans le plan de l'arc, avec $\alpha_{cr} \approx 10$ à 12
 $\Leftrightarrow N_{cr} = 328 \text{ MN}$ $\Leftrightarrow L_f \approx 36 \text{ m} \approx 0,31 \cdot L$



Puis interaction entre contraintes normales et risques d'instabilités

Les pilettes, toutes différentes

Conception - Principe fondamental

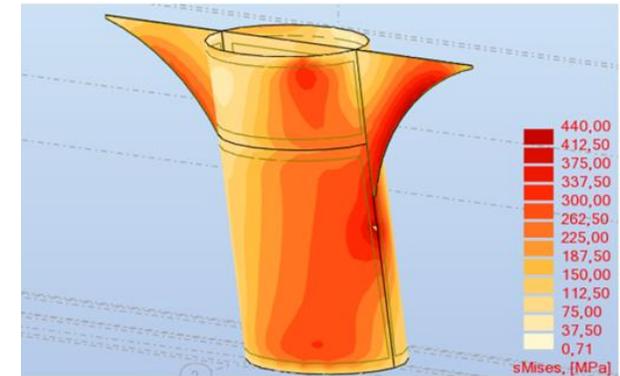
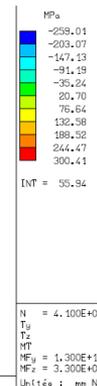
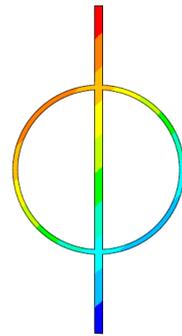
- ▶ Longueurs différentes selon la position sur l'arc, mais aussi selon la pente longitudinale du tablier
- ▶ Diamètres différents selon le parti architectural
- ▶ Pilettes très fléchies en plus de la compression

Modulation des épaisseurs pour justifications en contraintes ELU...

mais attention à la convergence car épaissement = rigidification = drainage d'efforts complémentaires

➔ Raidisseurs locaux uniquement (tête et pieds) + utilisation de plats d'enfourchement

P7	Cas de concomitance : My		Cas de concomitance : Mz		Max
Tete	Calcul de σ max		Calcul de σ max		
	N	11.29 MN	N	10.99 MN	
	My	6.72 MN.m	My	4.5 MN.m	
	Mz	0.03 MN.m	Mz	2.48 MN.m	
	GN max	255.63 Mpa	GN max	214.92 Mpa	256
	Part de N/S	93.2 Mpa	Part de N/S	90.7 Mpa	
Si section carré (ST1)	256.36 MPa	Si section carré (ST1)	259.44 MPa		
Pied	Calcul de σ max		Calcul de σ max		
	N	11.82 MN	N	11.19 MN	
	My	4.33 MN.m	My	0.91 MN.m	
	Mz	1.87 MN.m	Mz	3.38 MN.m	
	GN max	211.57 Mpa	GN max	176.97 Mpa	212
	Part de N/S	97.6 Mpa	Part de N/S	92.4 Mpa	
Si section carré (ST1)	247.44 MPa	Si section carré (ST1)	196.06 MPa		



+ Justification à la fatigue et vis-à-vis des instabilités

Modèle locaux EF complémentaires



Utilisation locale d'acier S460

Techniquement

- ▶ Ouvrage exceptionnel (tablier de 300 m, arc de 120 m, environ 1900 T d'acier)
- ▶ Recherche constante d'économie de matière
- ▶ Utilisation massive et approfondie des Eurocodes (Acier, Béton, Mixte, Fondations, Séisme, etc.), y compris application des principes à des cas non décrits dans les règlements (respect de la « Philosophie Eurocodes »)

Personnellement

- ▶ 1^{er} ouvrage de cet ampleur, entre un an et demi et deux ans de travail
- ▶ Travail passionnant, très enrichissant,
- ▶ Très nombreux interfaces et échanges avec Maître d'ouvrage, architecte, géotechnicien, environnementalistes, experts, etc.

Perspectives

Pas de problème de conception significatif détecté en phase travaux

→ Application du principe d'arc métallique à un plus grand nombre d'ouvrages dans des configurations similaires !