

Reconstruction de l'OA265 à Bettembourg :

Ingénierie et point structurel

- 28/06/24 -



LUX OUVRAGE D'ART - Présentation

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

- Bureau ingénieurs-conseils, membre de l'OAI (Ordre Architectes et Ingénieurs-Conseils)
- Implantation: Niederkorn (Luxembourg)
- **2004**: création par Adrien Loiseau (ingénieur-conseil, spécialité ouvrages d'art)
- **2008**: association à Fabien Dodeller (ingénieur-conseil, spécialité ouvrages d'art)

ATOUS

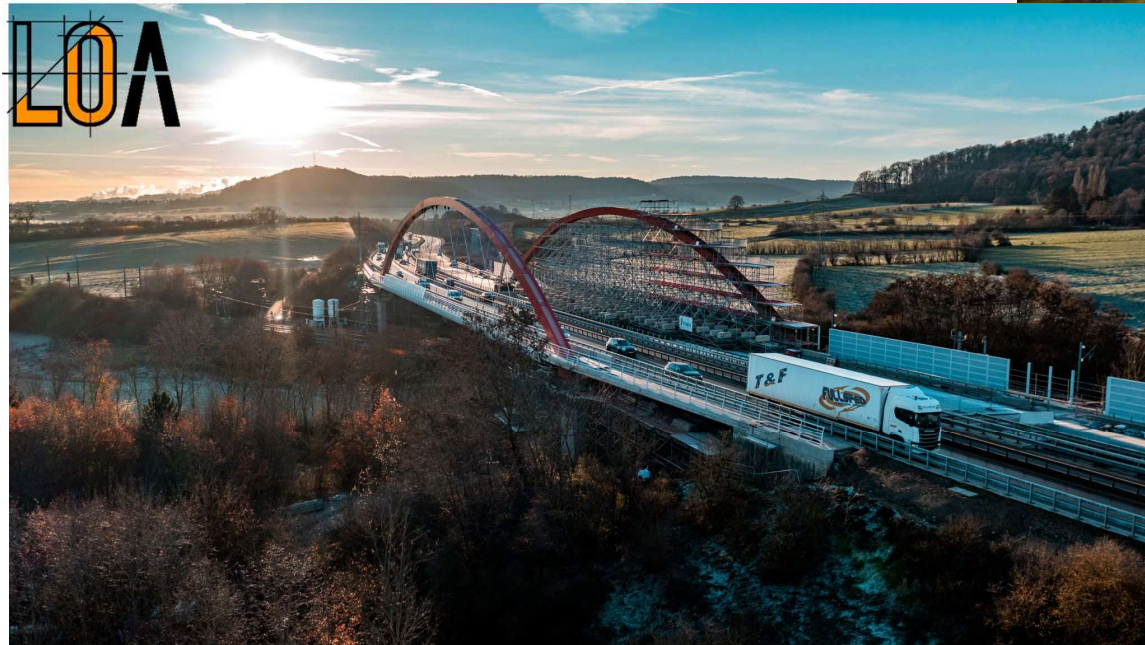
- Niveau de compétence: haut niveau de qualification des ingénieurs-conseils et experts
- Réactivité : implication directe des ingénieurs-conseils dans les projets, structure réduite
- Spécialisation: expérience et compétences dédiées aux ouvrages d'art et structures complexes
- Polyvalence: couvre l'ensemble des prestations allant du diagnostic à l'exécution maîtrise du référentiel luxembourgeois et français



BOWSTRING

BOWSTRING

- Tablier élégant
- Tablier de grande hauteur statique
- De plus en plus de références





BOWSTRING

BOWSTRING : Pont de l'observatoire

- 1 seul arc





BOWSTRING : Pourquoi un Arc d'un point de vue structurel ?

Pourquoi un Arc ?

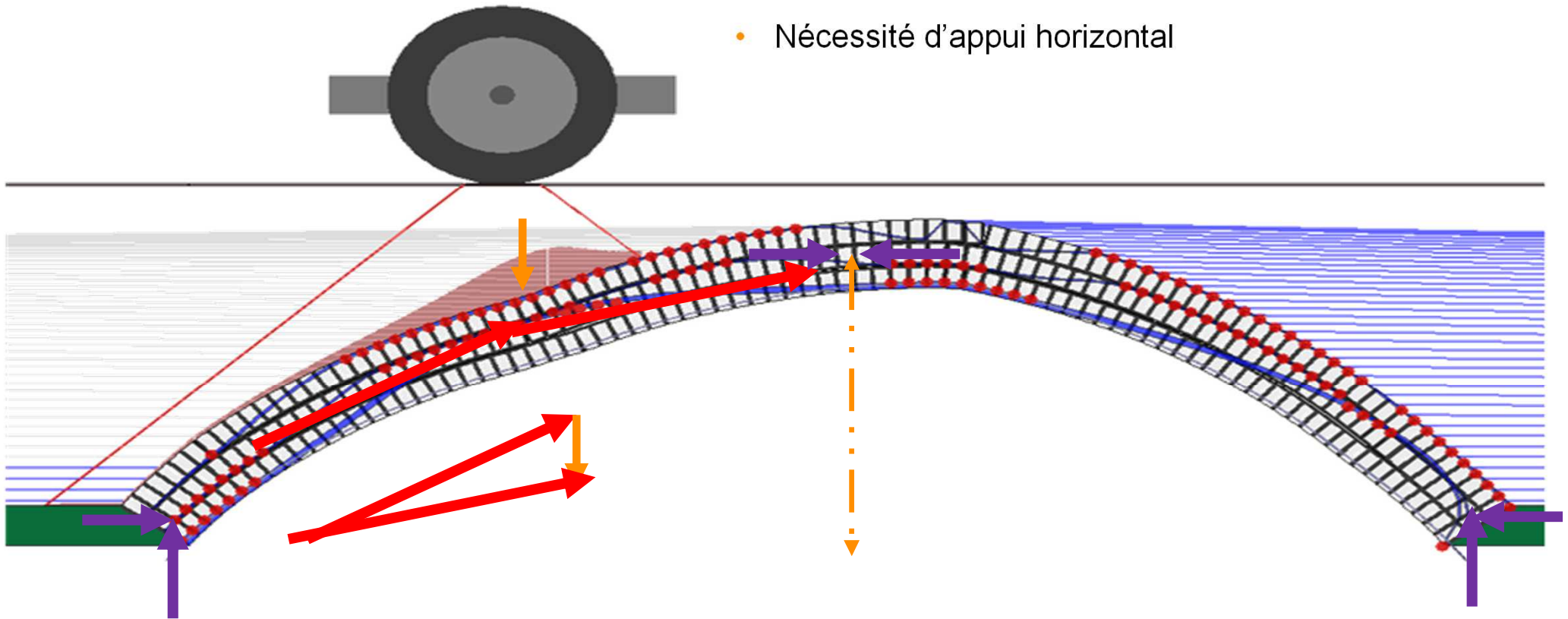
- Une grande hauteur statique
- De tout temps la voûte est utilisée



BOWSTRING : Pourquoi un Arc d'un point de vue structurel ?

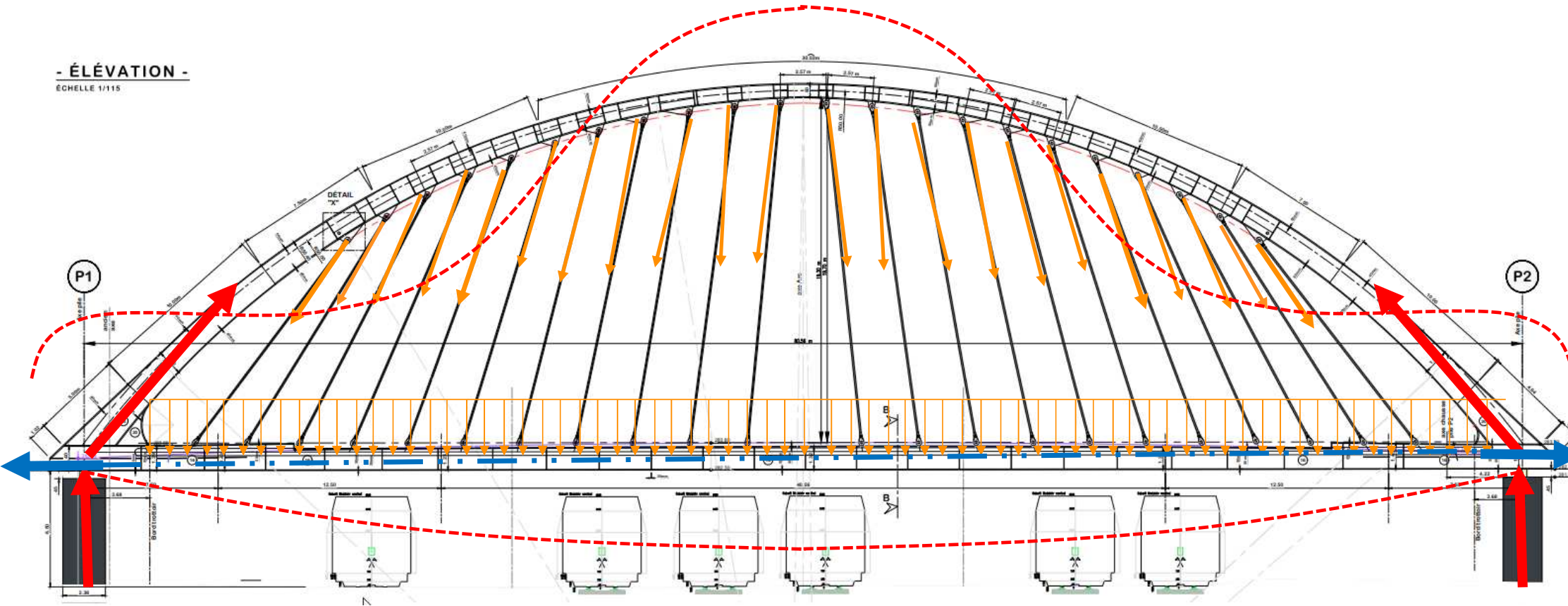
Pourquoi un Arc ?

- Fonctionnement : Compression
- Nécessité d'appui horizontal



BOWSTRING : Arc auto-ancré ?

- ÉLÉVATION -
ECHELLE 1/115



----- Flexion résiduelle



BOWSTRING : Détails Conception ?

Nombre de suspentes : $N = 44$ (coef sécurité 20 sous Poids Propre)

- Multiplication redondance => robustesse
- Ancienne conception : Peu de haubans : Construction moderne hauban nombreux

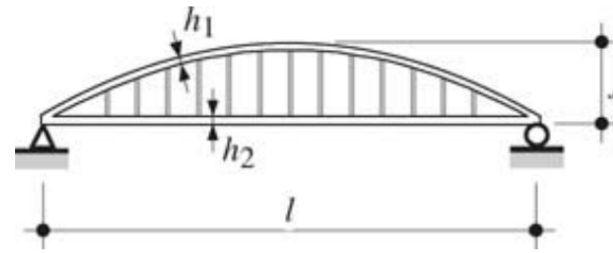
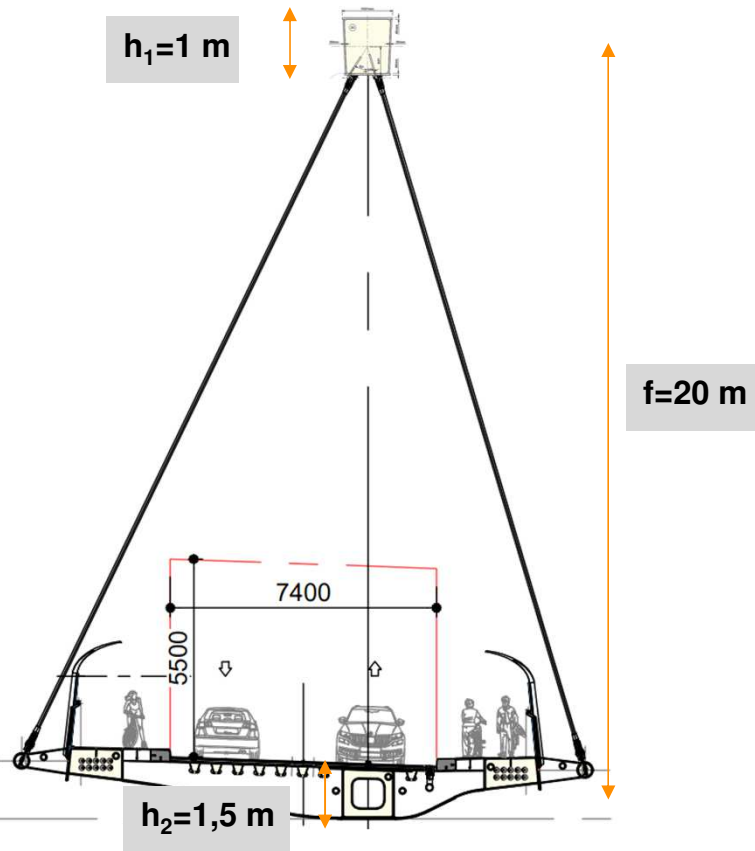


2018 : morandi bridge collapse : (**Corrosion**)



2019 : nanfang'ao bridge collapse : (**Corrosion**)

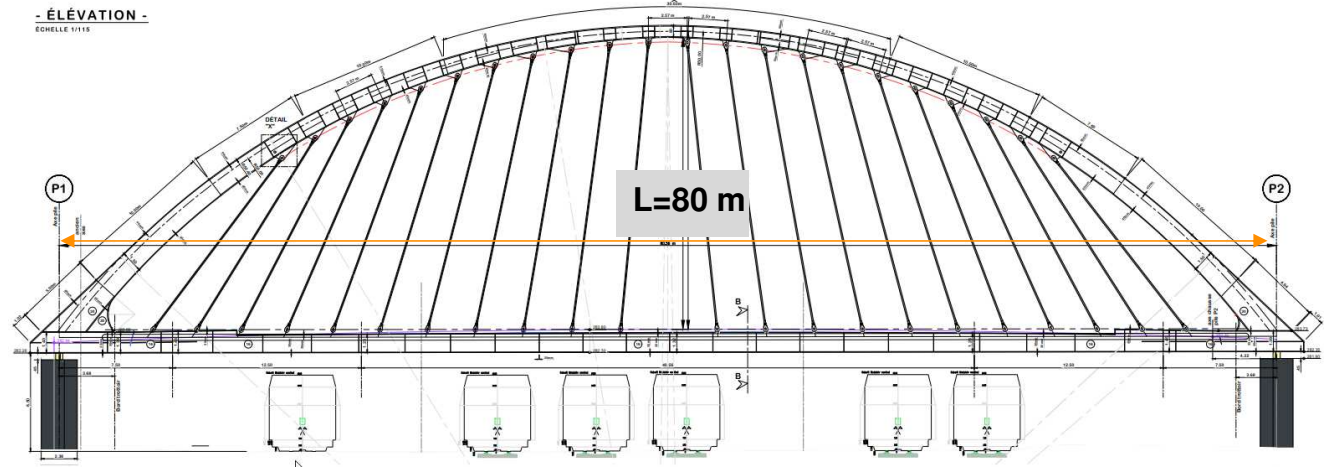
BOWSTRING : Bettembourg : règle de prédimensionnement :



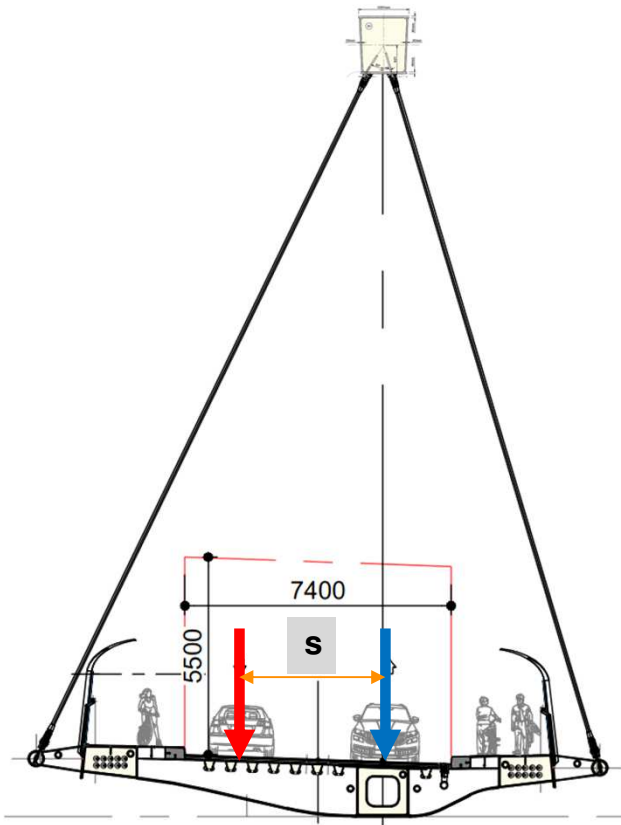
$$\lambda_1 = \frac{f}{l} \quad \lambda_2 = \frac{h_1 + h_2}{l}$$

λ_1 between 1/5 and 1/6

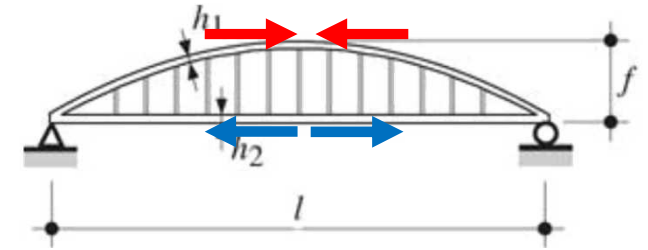
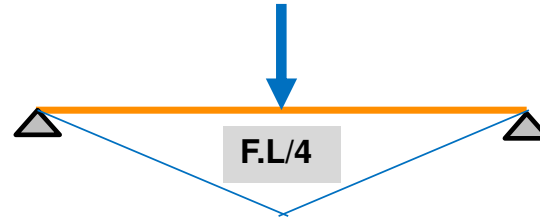
$\lambda_2 = (h_1 + h_2)/l$ generally lies between 1/30 and 1/45



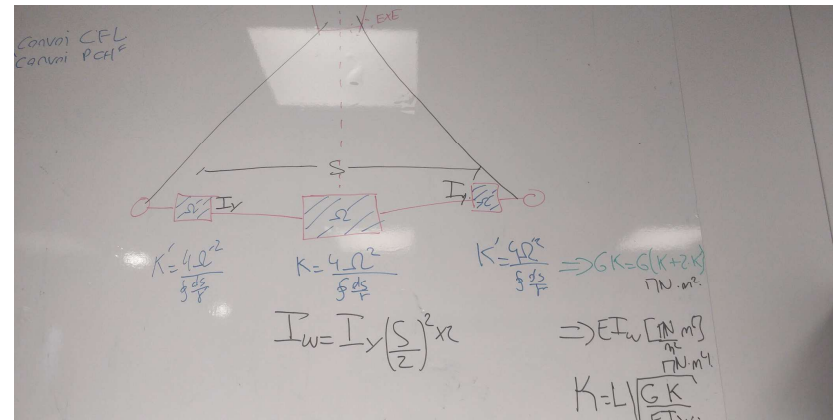
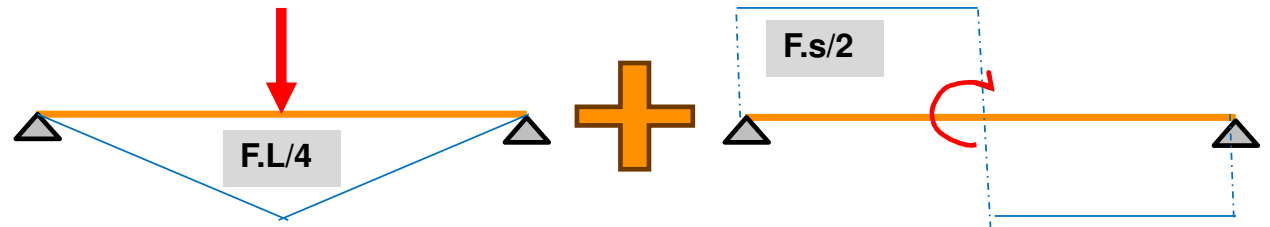
BOWSTRING : grand principe de fonctionnement



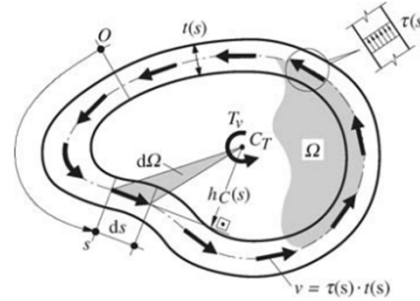
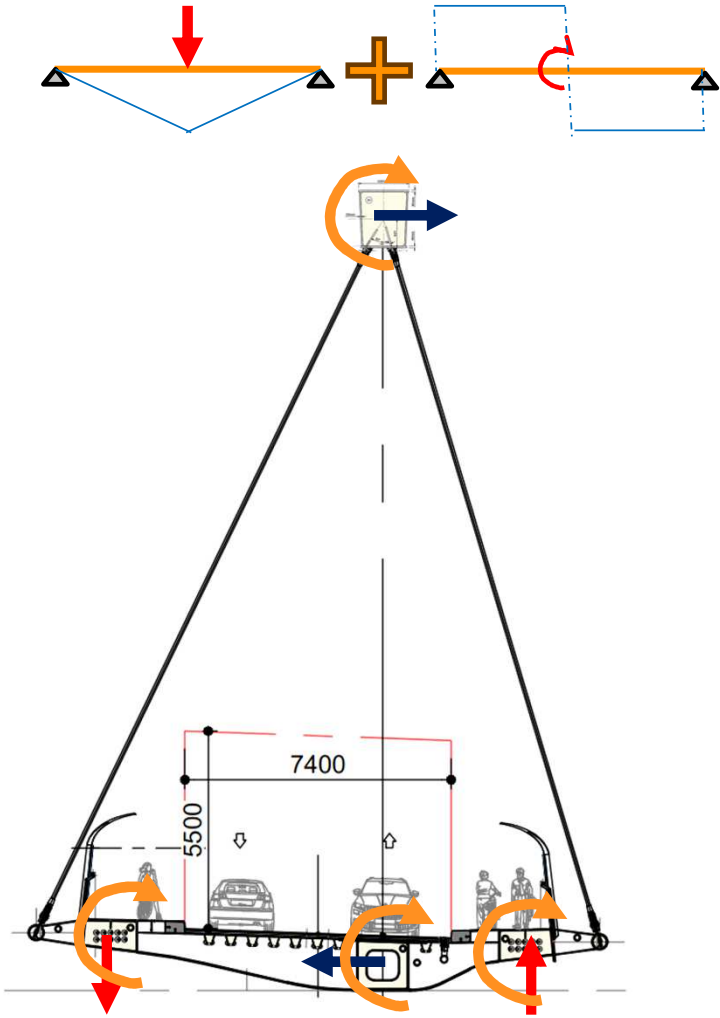
Flexion :



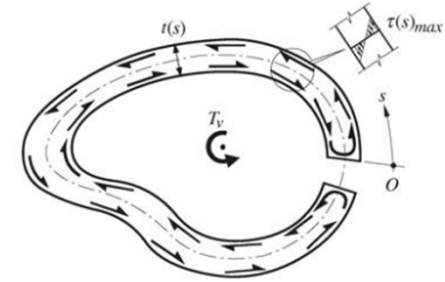
Torsion :



BOWSTRING : Torsion uniforme et Gauchissement

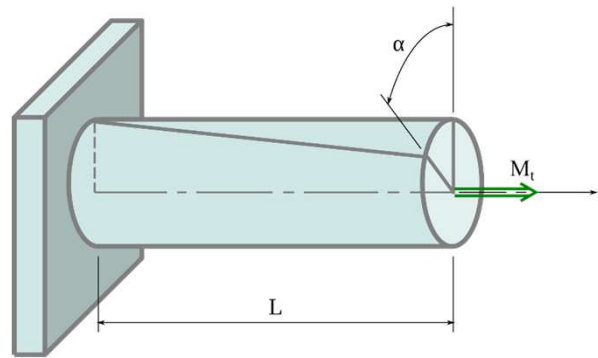


(a) Closed section



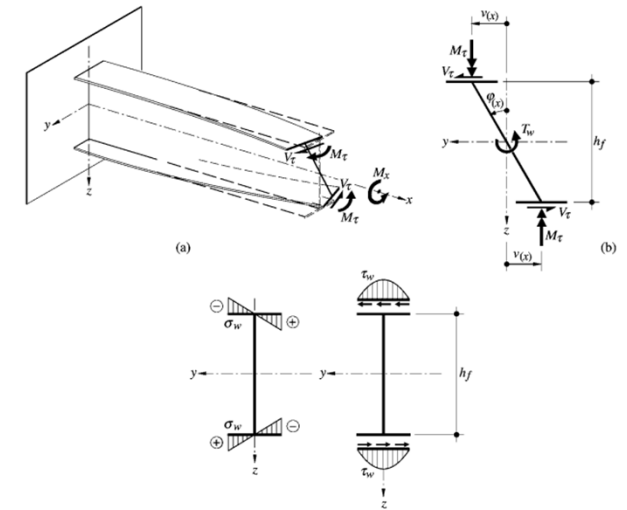
(b) Open section

Torsion Uniforme : section fermée

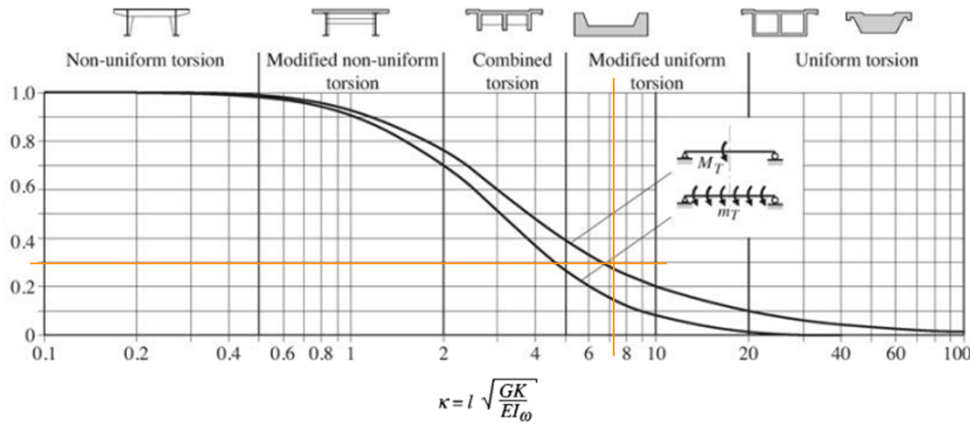


Torsion Non Uniforme: section ouverte

INTERNAL MOMENTS AND FORCES IN BEAM BRIDGES

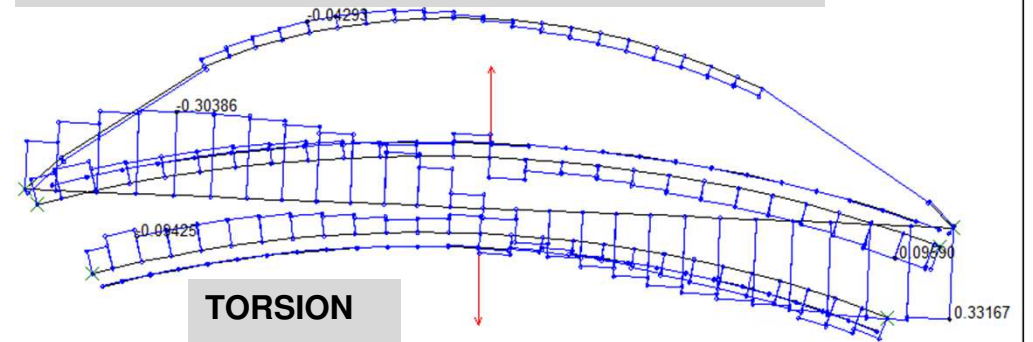


BOWSTRING : TORSION

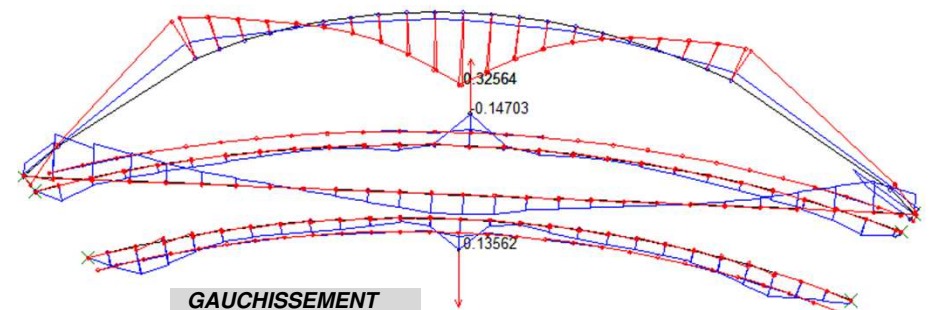


Couple charge 10 tonnes x 16 m ($M_t = 160t.m$)

- $B^* = M_t \times L/4 = 3200 t.m$
- $T = 160/2 = 80 t.m$



TORSION

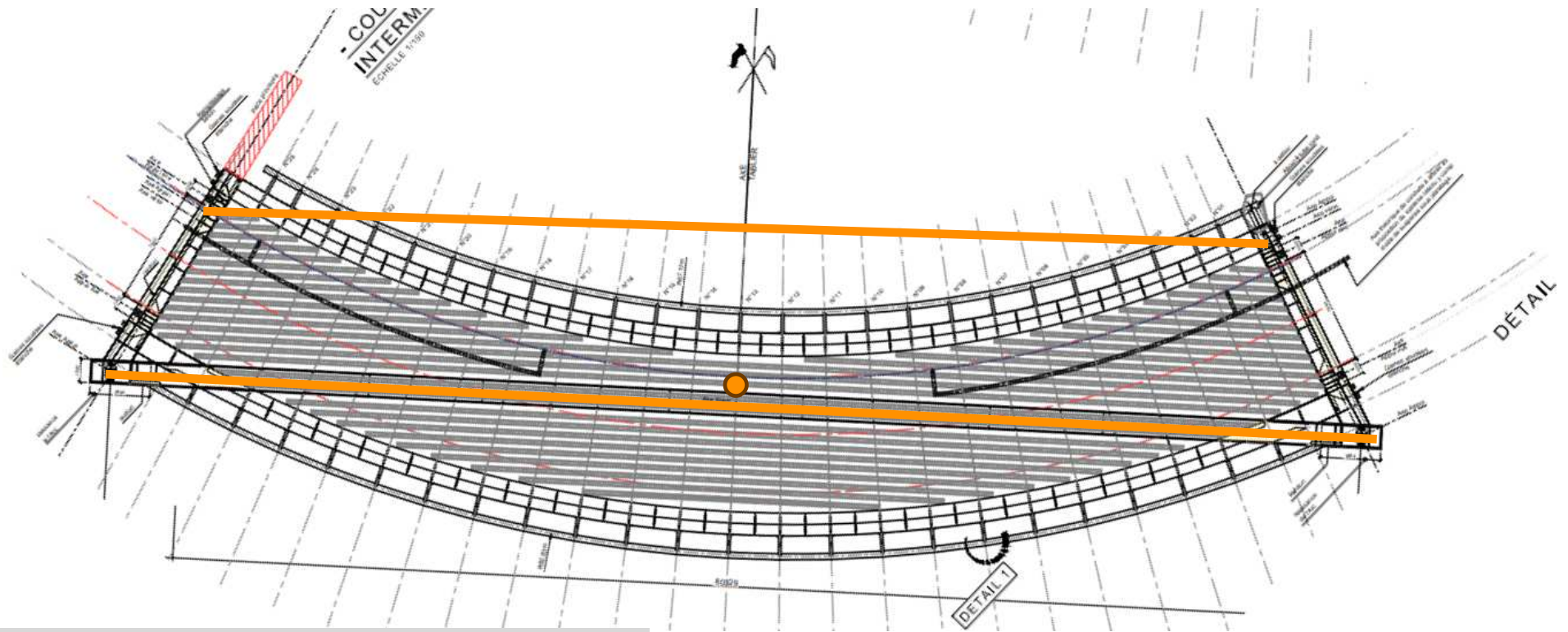


GAUCHISSEMENT

- $\kappa = 6,4$
- $K = 0,06 m^4 + 0,16 m^4 + 0,05m^4 = 0,3 m^4$
- $I_w = 20,3 m^6$
- $T = 4,3+9,4 + 9,6 + 30,4 = 54 t.m \Rightarrow 70\% \text{ UNIFORME}$
- $B^* = 32,56 \times 20 + 15 \times 16 = 890 t.m \Rightarrow 30\% \text{ NU}$

Résistance majoritaire en torsion UNIFORME (recalage Calcul Manuel / ST1)

BOWSTRING : EQUILIBRE GLOBAL !



Centre de Gravité entre les lignes d'appui : Réaction positive sous poids propre

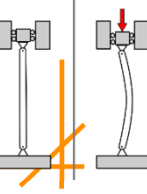


INSTABILITE DE L'ARC



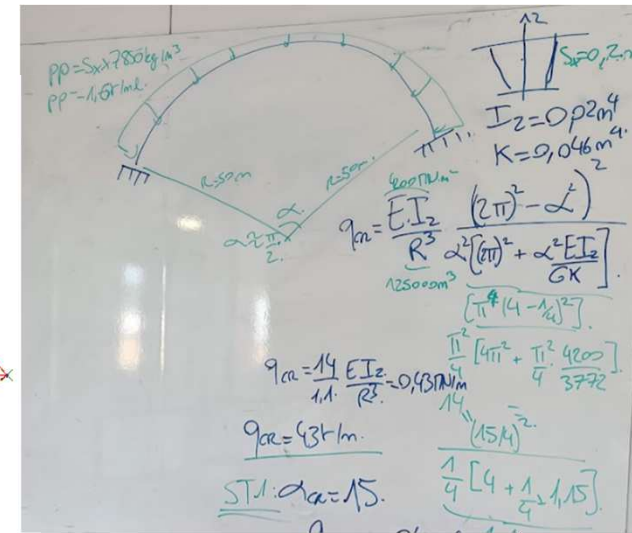
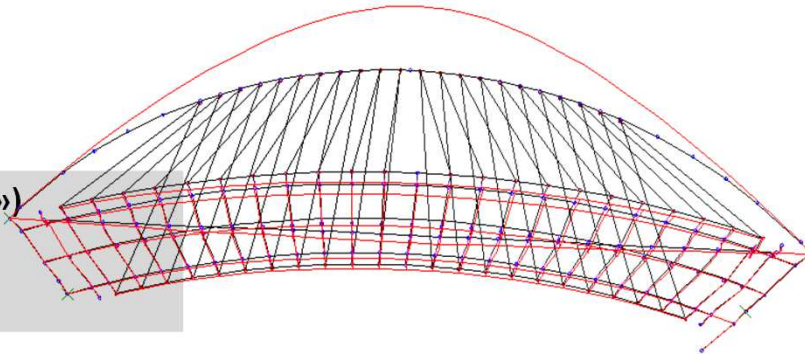
Flambement EULERIEN

- $N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L^2} = 650 \text{ tonnes}$



Flambement sans suspentes : (« bi-encastré »)

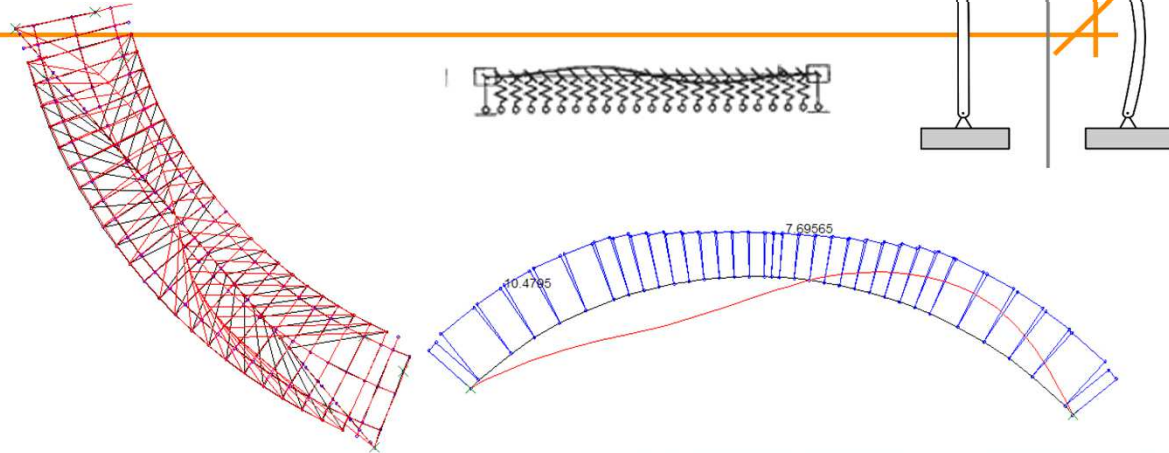
- $N_{cr} = 3\ 000 \text{ tonnes}$



BOWSTRING : FLAMBEMENT de l'ARC

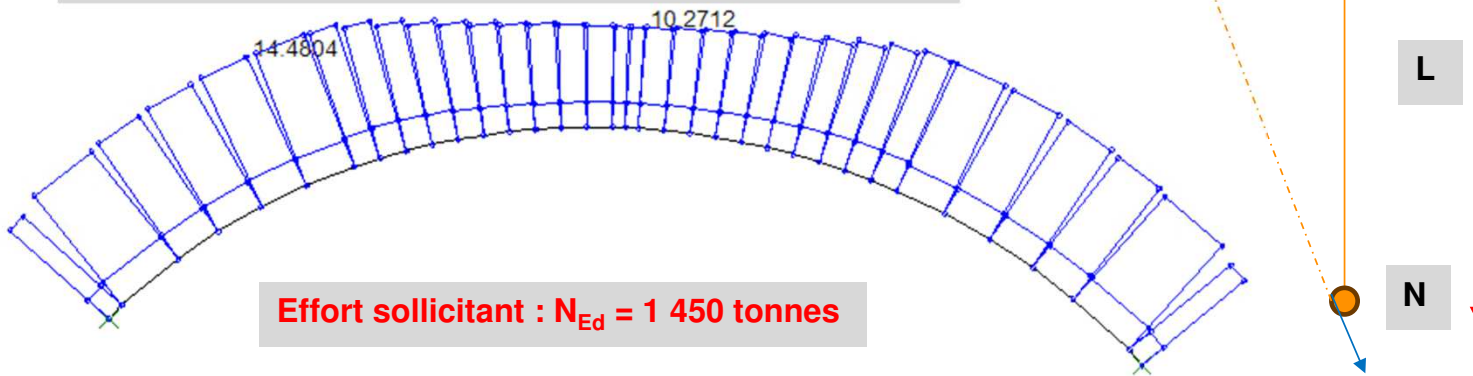
Flambement ST1 : bi-encastée + suspende + raideur torsion

- $N_{cr} = 7175 \text{ tonnes}$

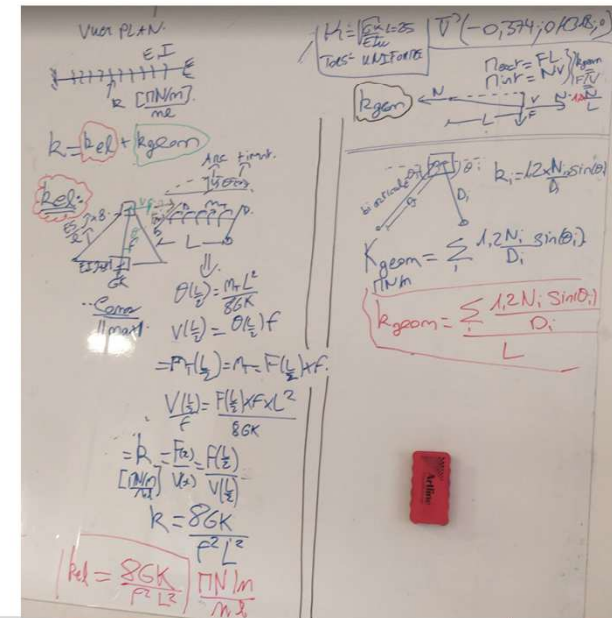


Flambement raideur élément tendu (« second ordre »)
Effet stabilisateur traction suspendes : N/L

- $N_{cr} > 10\,000 \text{ tonnes}$



Effort sollicitant : $N_{Ed} = 1\,450 \text{ tonnes}$

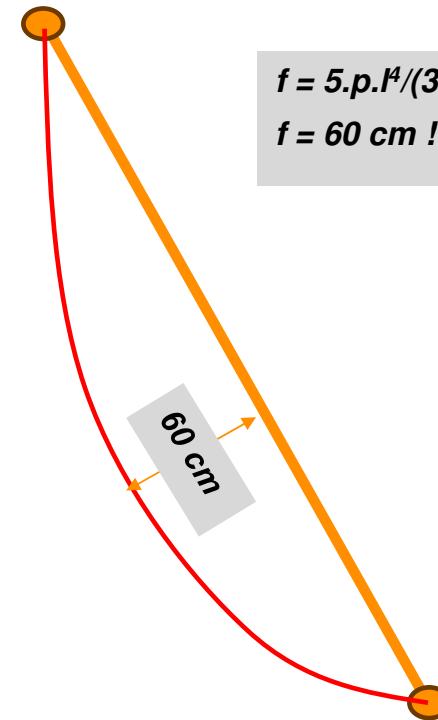


Réglage des suspentes : poutre pure

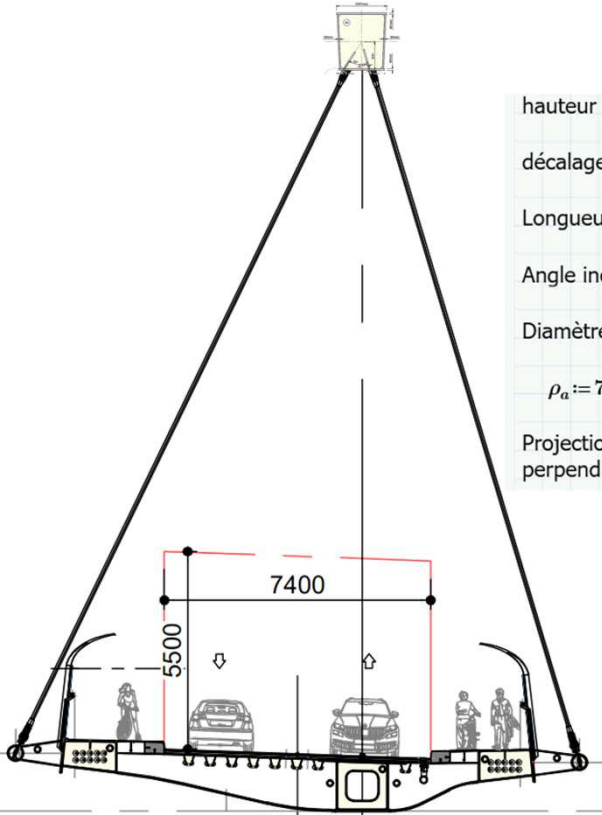
44 suspentes phi 100 mm INCLINEES

Suspente considérée comme une poutre : $p = 22 \text{ kg/ml !!!}$

hauteur suspente :	$H := 19.5 \text{ m}$
décalage horizontal :	$S := 7.35 \text{ m}$
Longueur suspentes :	$L := \sqrt{S^2 + H^2} = 20.839 \text{ m}$
Angle inclinaison suspentes :	$\theta := \text{atan}\left(\frac{H}{S}\right) = 69.347^\circ \quad 90^\circ \Leftrightarrow \text{suspentes verticale}$
Diamètre barre :	$\Phi := 0.1 \text{ m} \quad S_b := \pi \cdot \frac{\Phi^2}{4} = 0.008 \text{ m}^2$
$\rho_a := 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	$p_b := \rho_a \cdot S_b = 0.617 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad I_b := \pi \cdot \frac{\Phi^4}{64} = (4.909 \cdot 10^{-6}) \text{ m}^4$
Projection effort perpendiculaire à la barre :	$p_{bp} := p_b \cdot \cos(\theta) = 0.217 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$



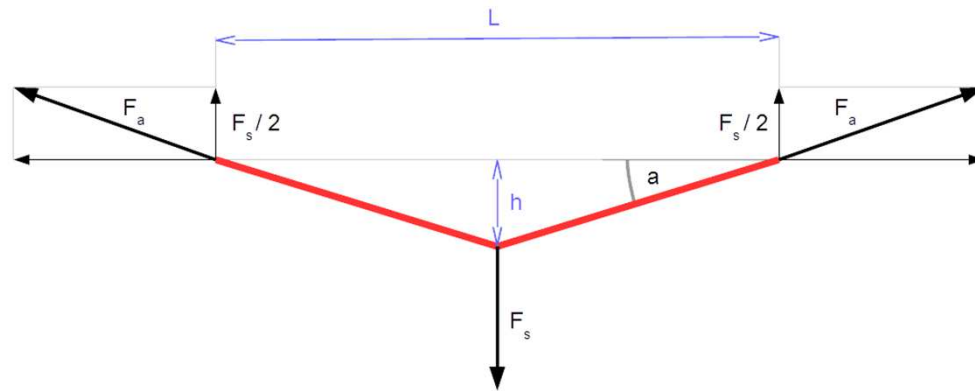
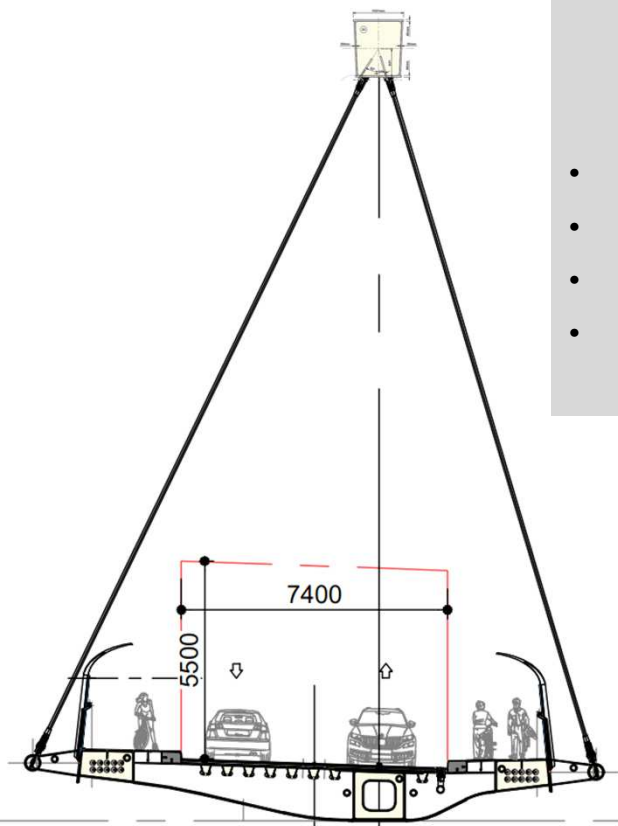
$f = 5.p.l^4/(384.E.I)$
 $f = 60 \text{ cm !!!}$



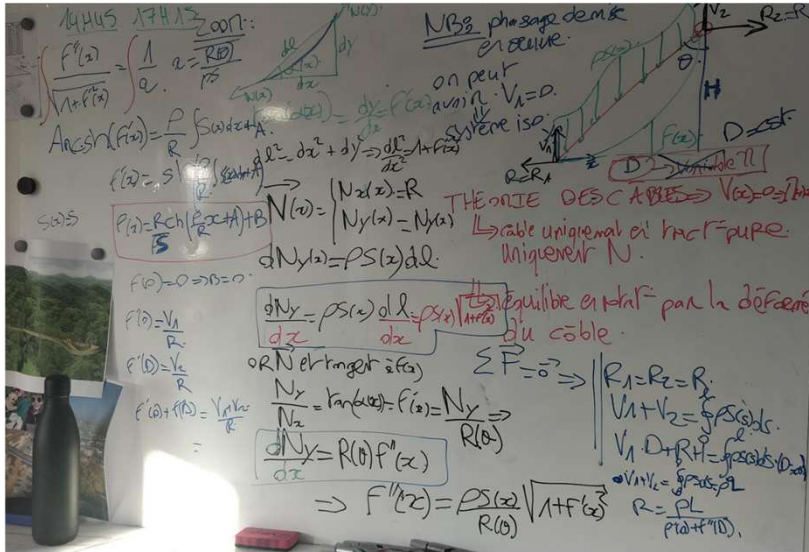
44 suspentes phi 100 mm INCLINEES

!!! Équilibre en grand déplacement !!!

- *Equilibre fonction :*
- *Longueur*
- *Tension*
- *Flèche*



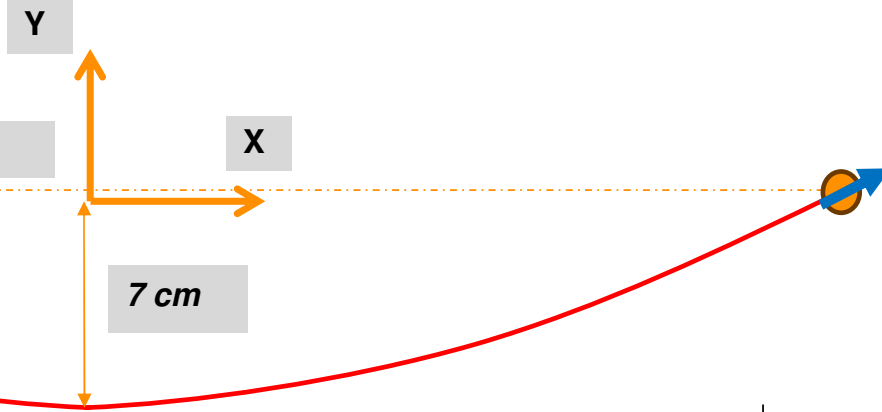
Réglage des suspentes : corde pure : $I = 0 \text{ m}^4$



$$f(x) := a \cdot \cosh\left(\frac{x}{a} + \alpha\right) + \beta$$

Équation de la chaînette

$T = 6,1 \text{ tonnes (poids suspente 1 tonnes)}$



Équation aux limites :

- Longueur : L_0 ? : **SANS DEFAUT**
- Répartition poids oreille supérieure et inférieure ? **VERTICALE SUPERIEURE**
- Tension initiale T_0 ? **POIDS SUSPENTE**

Estimation précise : Inertie réelle + effet chaînette

BUT :

- *Raideur des appuis des suspentes ? : Mouvement de l'arc et tablier influent sur le comportement de la suspente*
- *Phasage de mise en œuvre ? Chaque suspente détend les suspentes précédentes*
- *Charge permanente ? Superstructures (enrobé) augmente la tension dans les suspentes => favorable, diminue la flèche*





Estimation précise : Phasage adopté

3. S5E puis S5I
4. S7I puis S7E
5. S9I puis S9E
6. S3E puis S3I
7. S11I puis S11E
8. Enlèvements des palées sous les poutres de rive
9. S1E puis S1I
10. Enlèvement des palées sous le tirant. L'ouvrage sera sur 4 appuis comme dans la situation définitive
11. Mise en place des suspentes « paire » dès les plus externes (S2) vers les centrales (S10)

Mise en œuvre d'une suspente

- *Poids propre*
- *Mise en place superstructure. Suppression progressive des appuis provisoires*
- *Mise en tension des suspentes naturelles*

Programmation ST1 :

Comme un effet de second ordre :

- *Activation de la suspente mise en œuvre*
 - *Application de 1% de la charge PP sur géométrie origine*
 - *Stockage flèche suspente sous cas de charge élémentaire précédent (1% PP suspente)*
 - *Modification géométrie suspente (création « ventre » + effet chaînette)*
 - *Application 100 fois de l'itération précédente*
- *Activation suspente suivante sous le même principe*
- *Suppression d'appui au besoin*
- *Ajout superstructures*

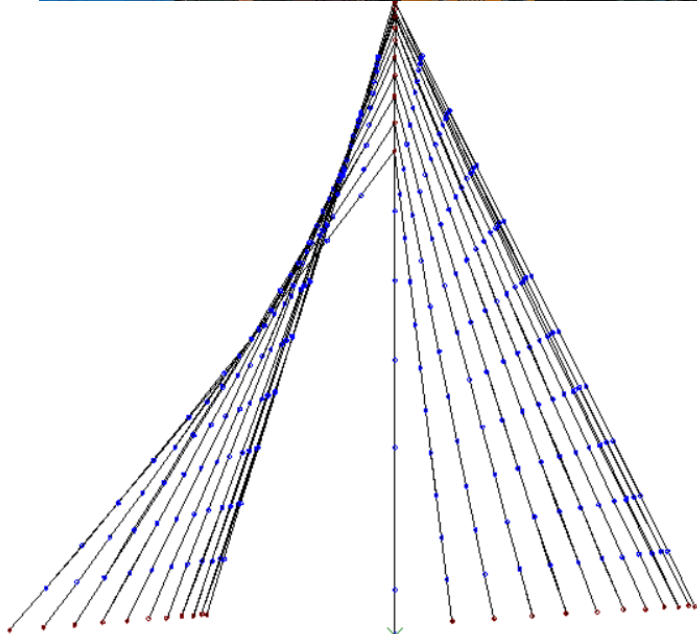
Flèche estimée : 20 cm



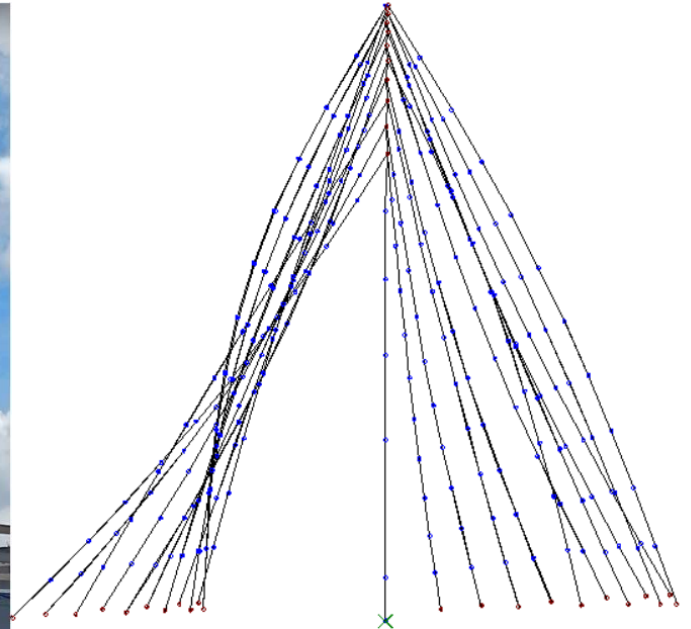
Estimation précise : Phasage adopté



Mise en place des Suspentes impaires : 1/2
Suppression du calage
Suspentes impaire (extrémités => centre)
Superstructures.



Allure 50 itérations (pas effet chaînette)
 $F_{max} = 20 \text{ cm}$



Allure 1 itération (pas effet chaînette)
 $F_{max} = 100 \text{ cm}$

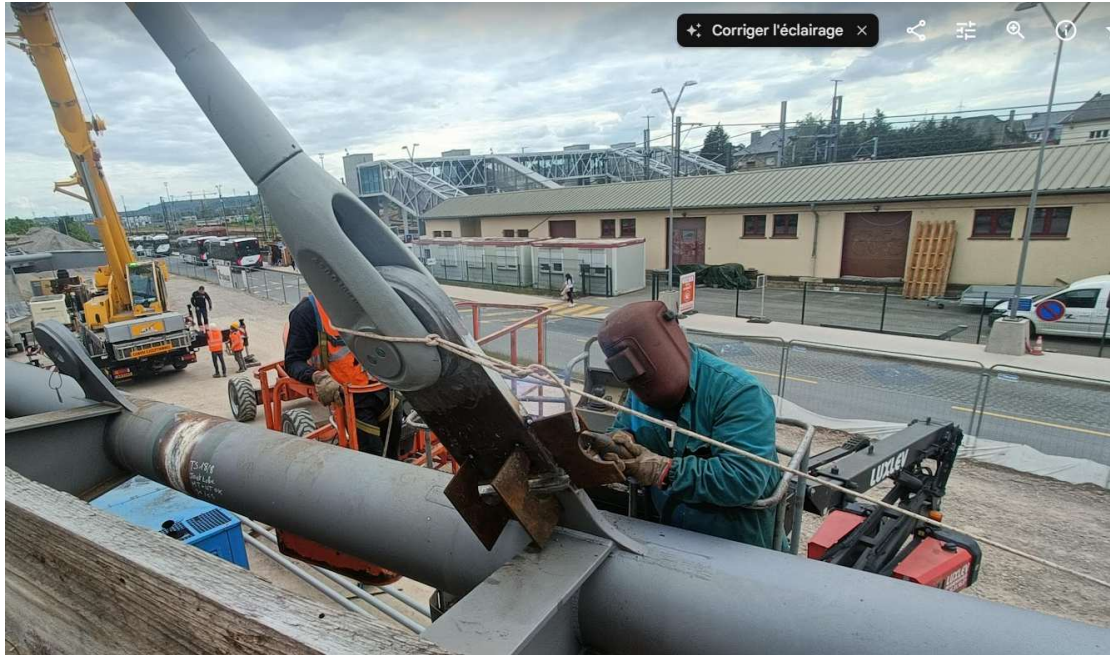


Pose au palonnier

- *Suspente droite au moment de la pose*



Précaution supplémentaire



- Soudure Oreille :**
- *Réglage millimétrique de la longueur*
 - *Retrait de soudure de l'ordre de 1 mm sur la longueur totale*
 - *Réduit la flèche théorique /2 environ*

20 m

20 cm => 10 cm

20,003 m - 1 mm!



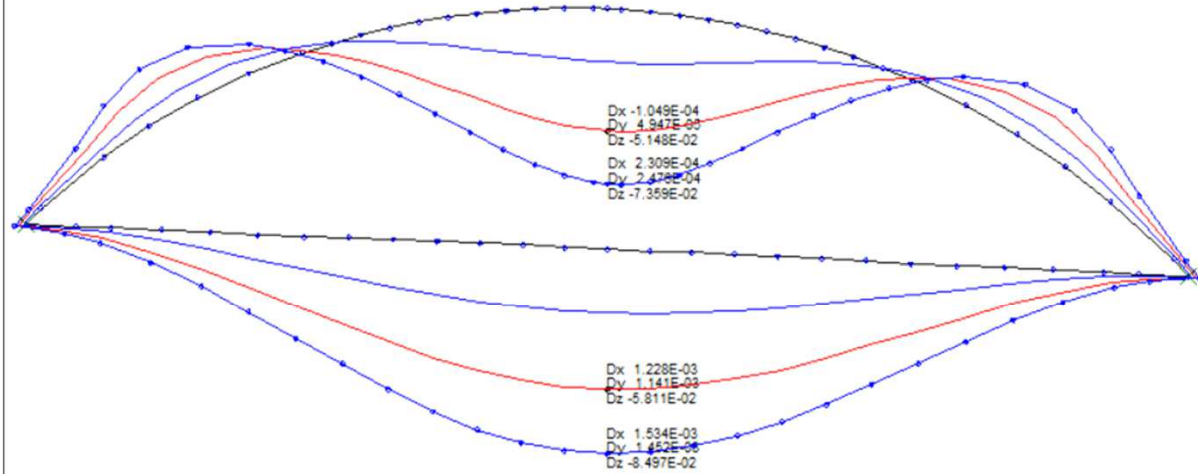
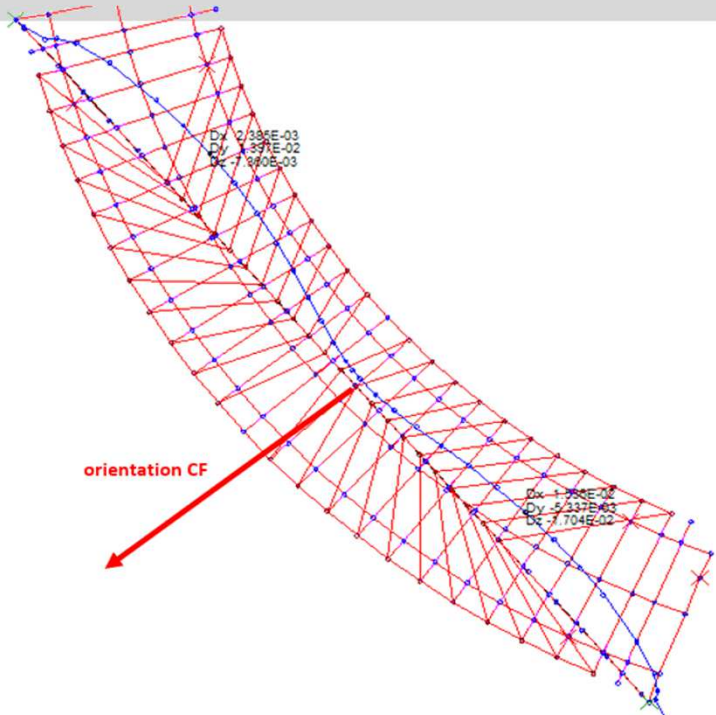
Contre flèche : PP+SUP

ARC :

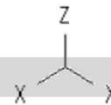
- Vertical : 75 mm
- Horizontal : 20 mm : **NON RETENU** tirant construit « droit »

TIRANT :

- Vertical : 85 mm (<> arc : raideur pièce de pont)



—	depla	comb	10	CONTRE FLECHE PERMANENTE
—	depla	comb	10	CONTRE FLECHE PERMANENTE



—	depla	charg	1	POIDS PROPRE
—	depla	comb	10	CONTRE FLECHE PERMANENTE
—	depla	comb	11	CONTRE FLECHE SUPERSTRUCTURES

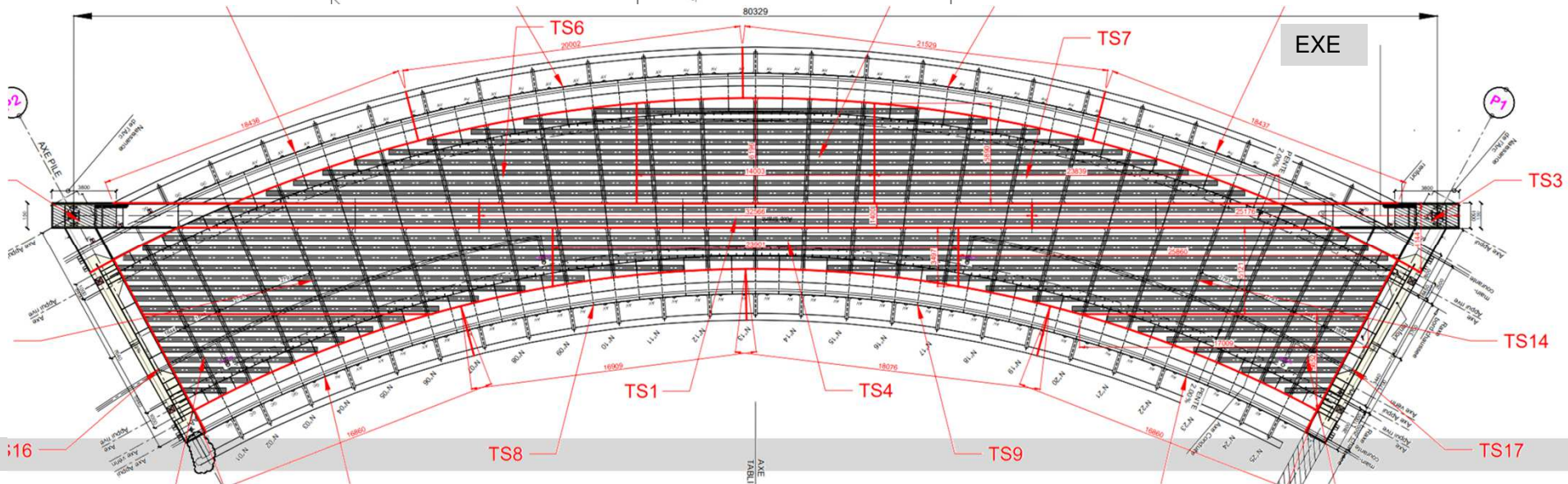
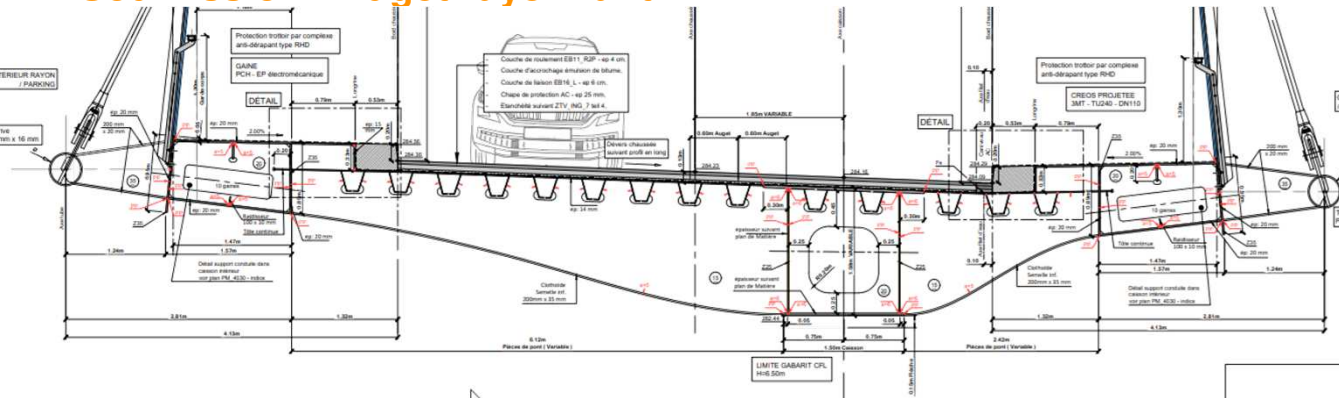
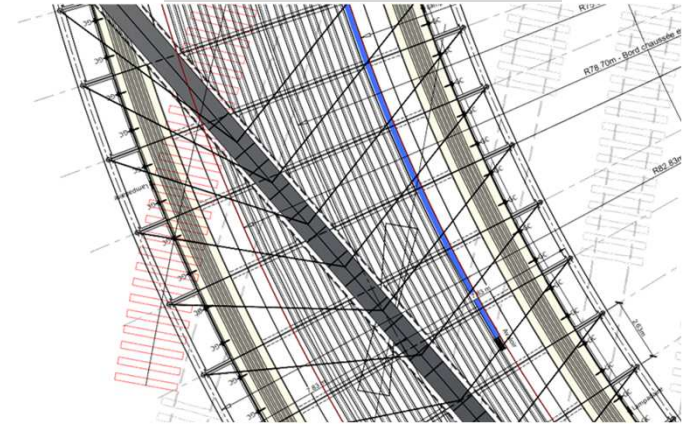


BOWSTRING : Détails Conception ?

AUGET : choix d'auget // au tirant

- Soumission** : Auget rayonnant

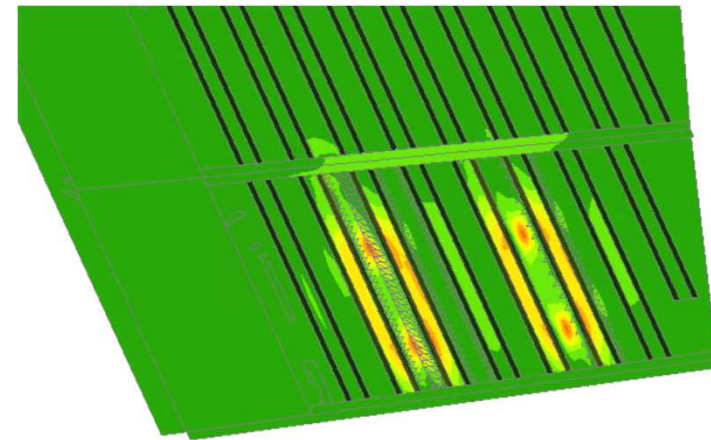
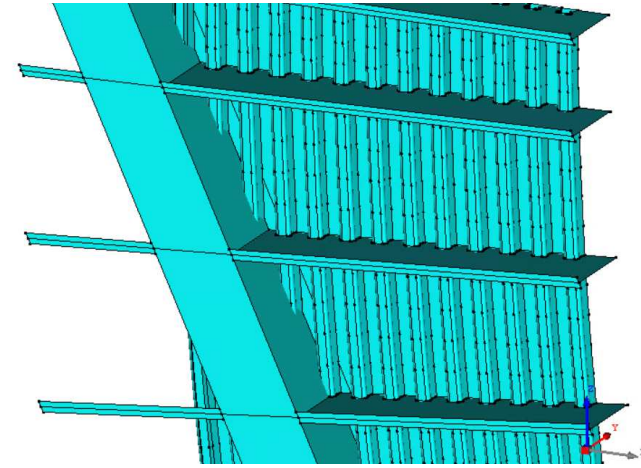
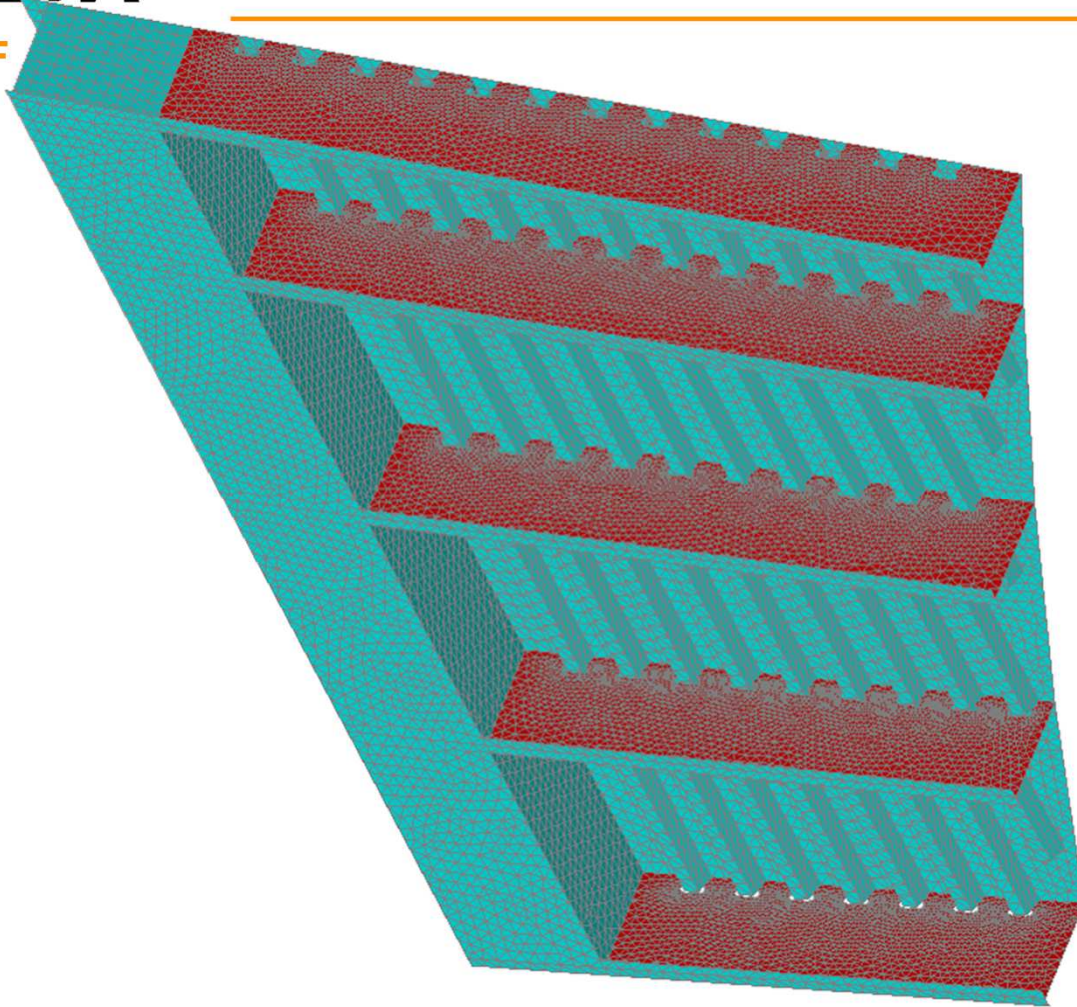
DCE (SOUMISSION)



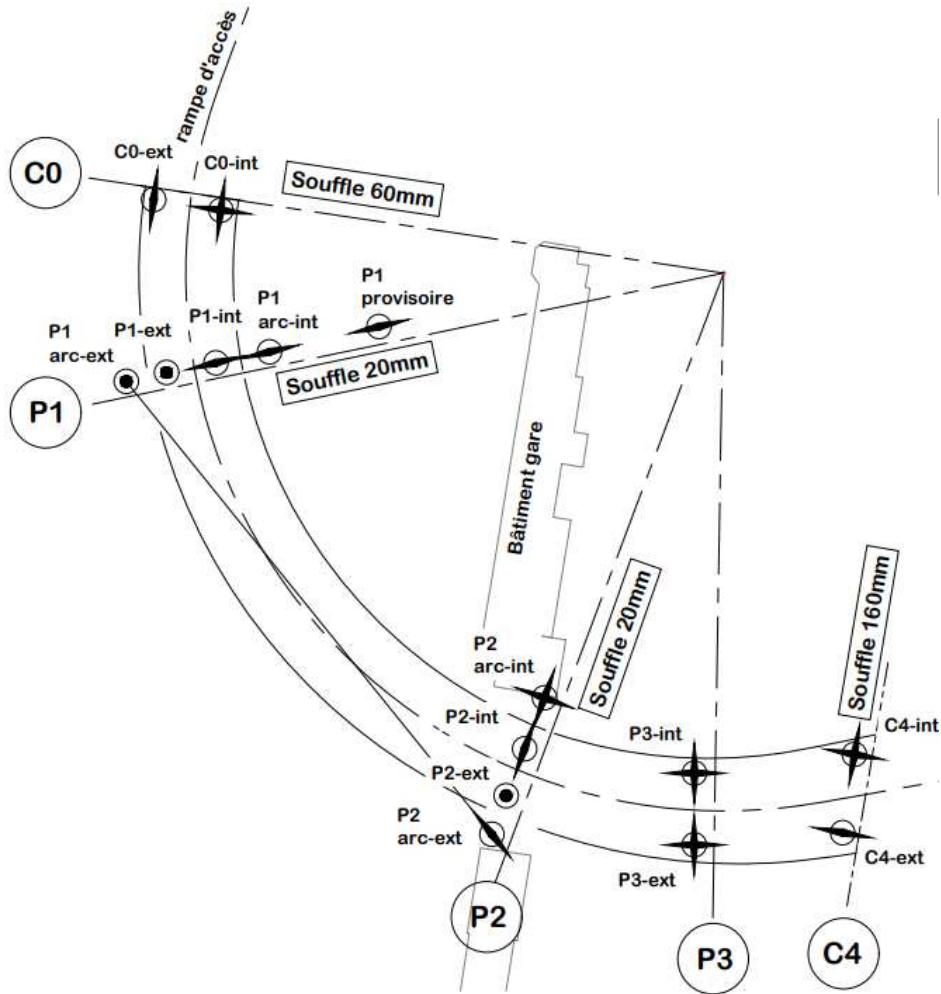


BOWSTRING : Auget

MEF



Fonctionnement Horizontal

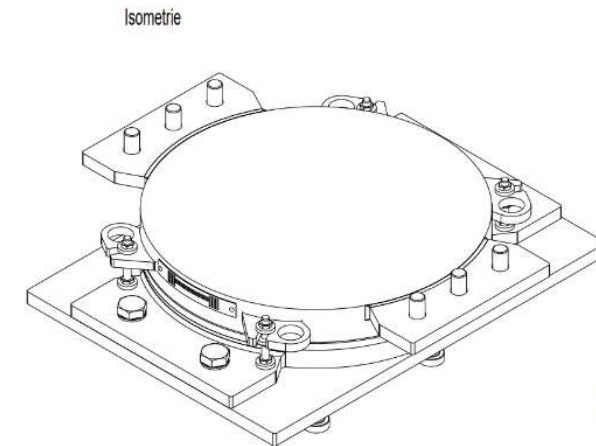
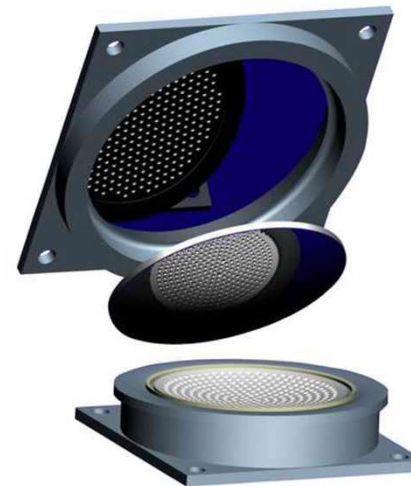


Actions :

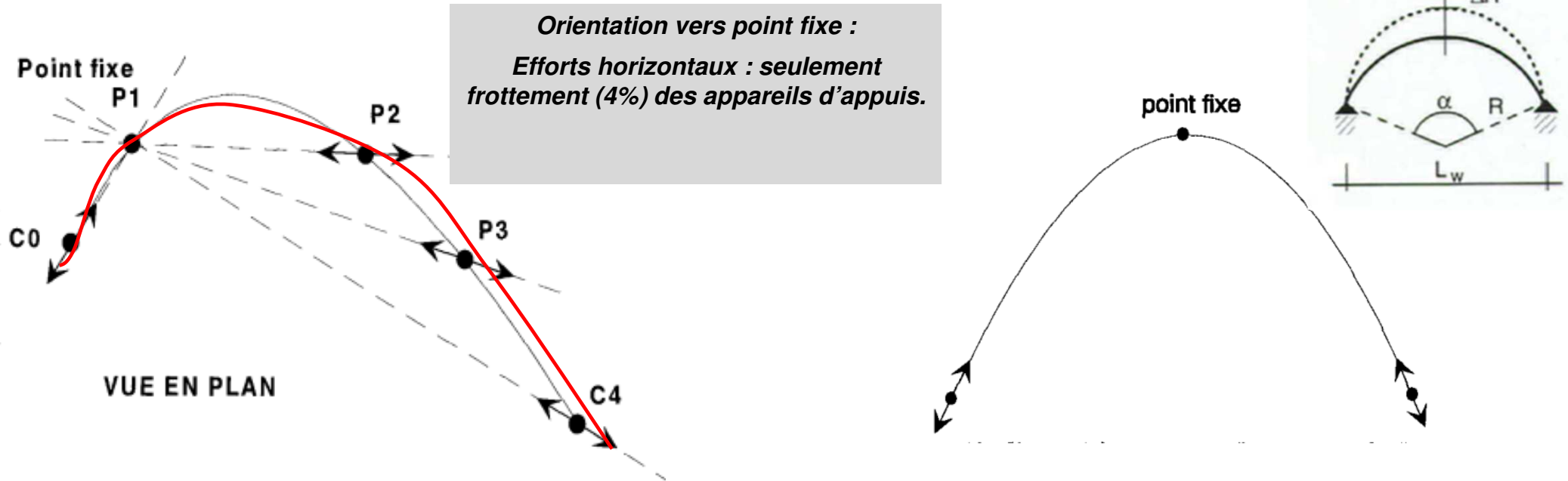
- **Freinage/Accélération : 50 tonnes**
- **Force centrifuge : 15 tonnes**
- **Dilatation thermique : (+ ou - 55 °C)**

Appareils d'appuis :

- **Appuis sphériques (métallique ou à calotte)**



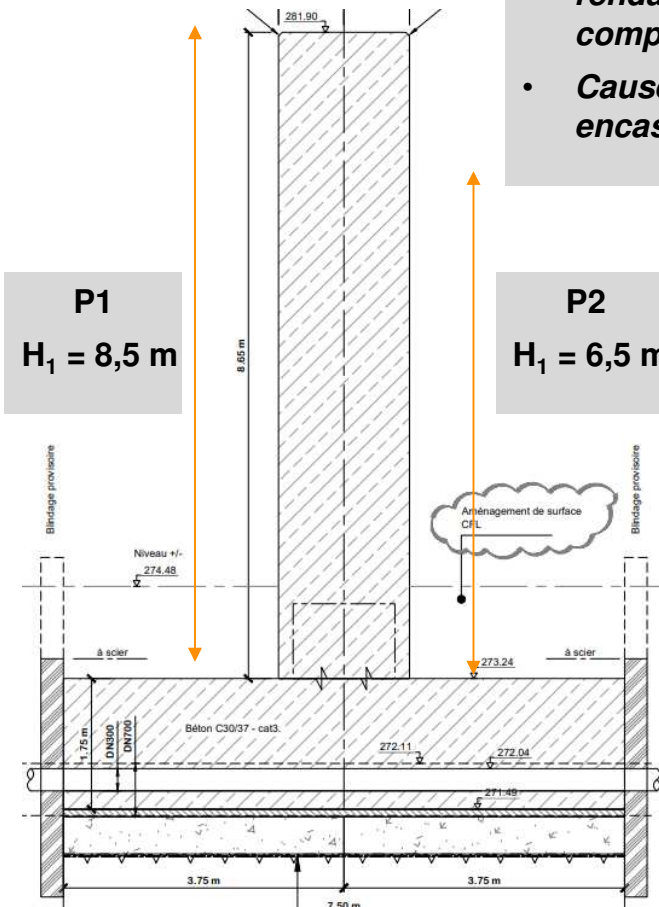
Fonctionnement Horizontal : Théorie



ON RETIENT UNE ORIENTATION PERPENDICULAIRE AU JOINT DE CHAUSSEE, AFIN DE GARANTIR LA MEILLEURE DURABILITE DU TABLIER

Fonctionnement Horizontal : Soumission

- *Guidage thermique implique des efforts rendant le ferrillage du fût de pile complexe P1 (HA40)*
- *Causes : travée de rive petite : encastrement*

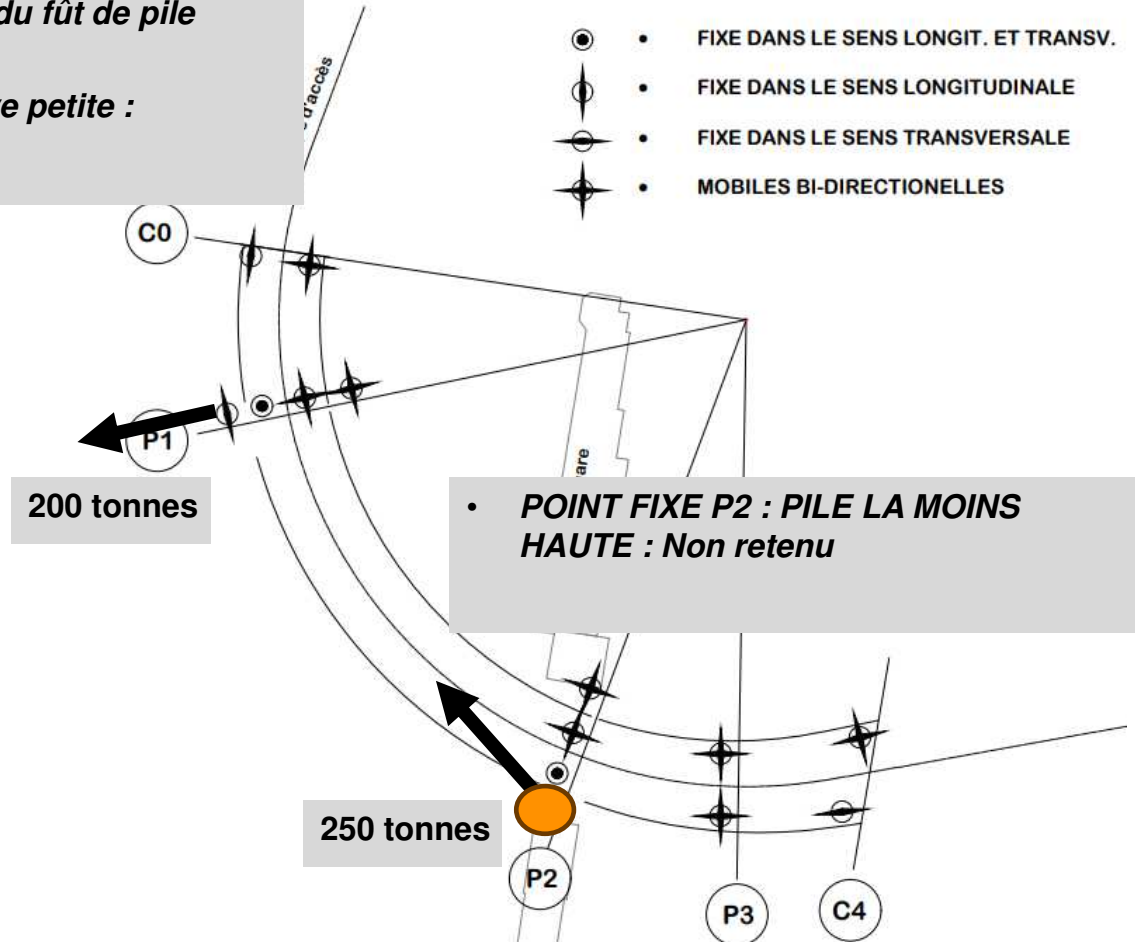


P1
 $H_1 = 8,5 \text{ m}$

P2
 $H_1 = 6,5 \text{ m}$

LÉGENDE :

- FIXE DANS LE SENS LONGIT. ET TRANSV.
- FIXE DANS LE SENS LONGITUDINALE
- FIXE DANS LE SENS TRANSVERSALE
- MOBILES BI-DIRECTIONELLES







200 tonnes

• **POINT FIXE P2 : PILE LA MOINS HAUTE : Non retenu**

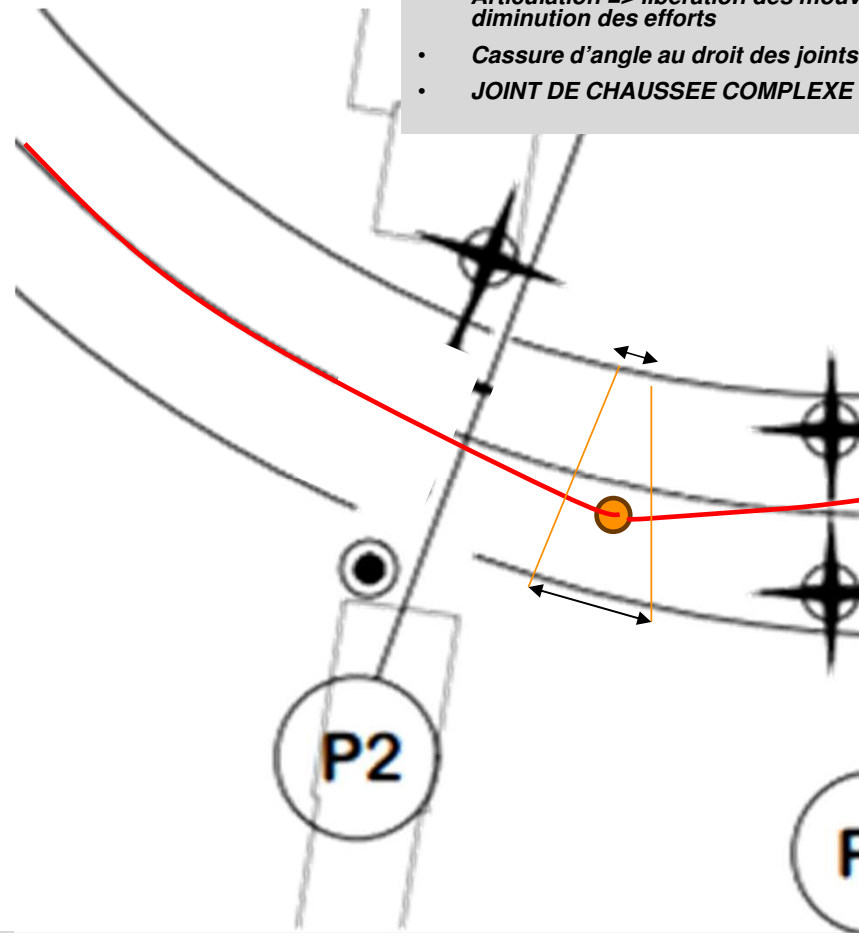
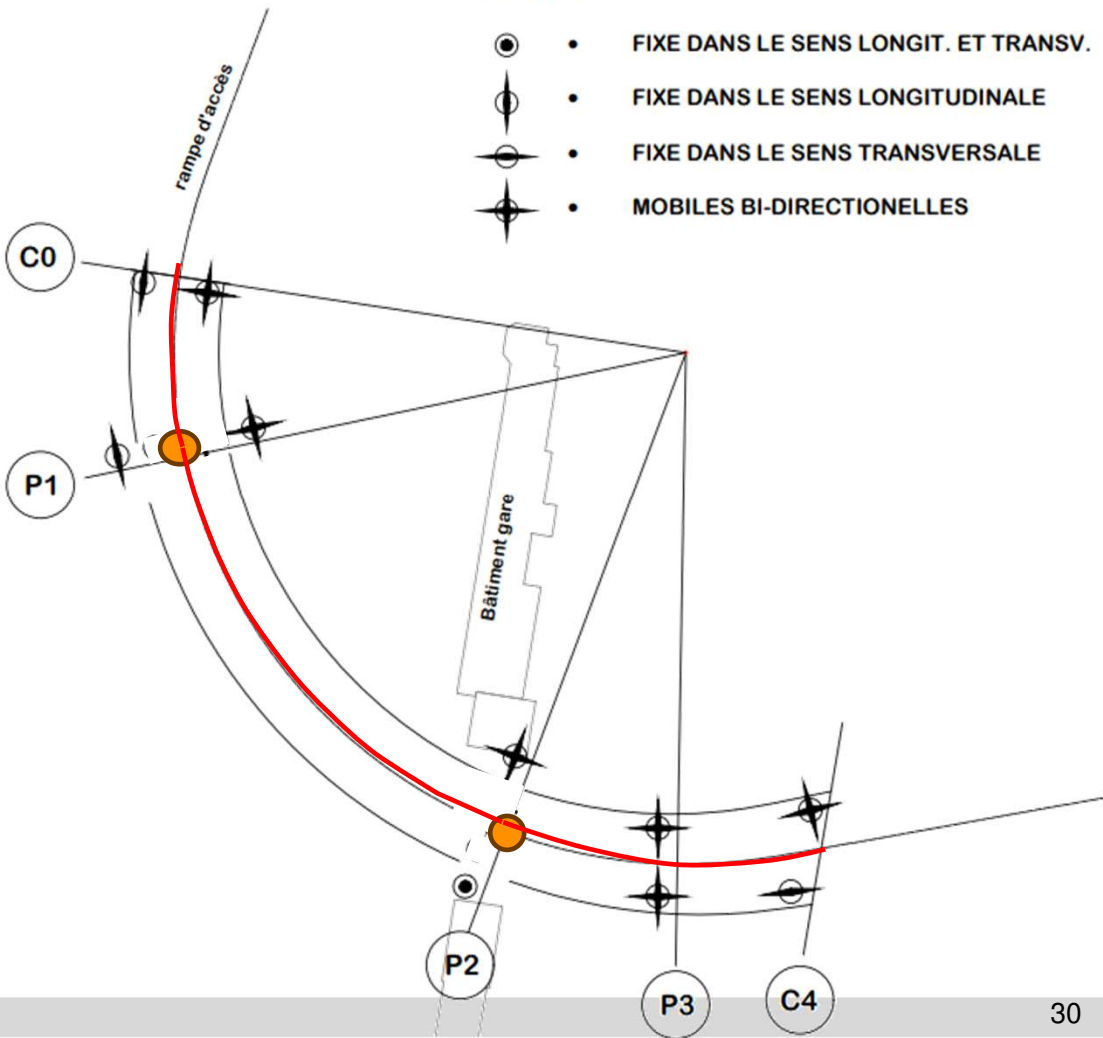
250 tonnes

Fonctionnement Horizontal : EXE : Libérer le tablier

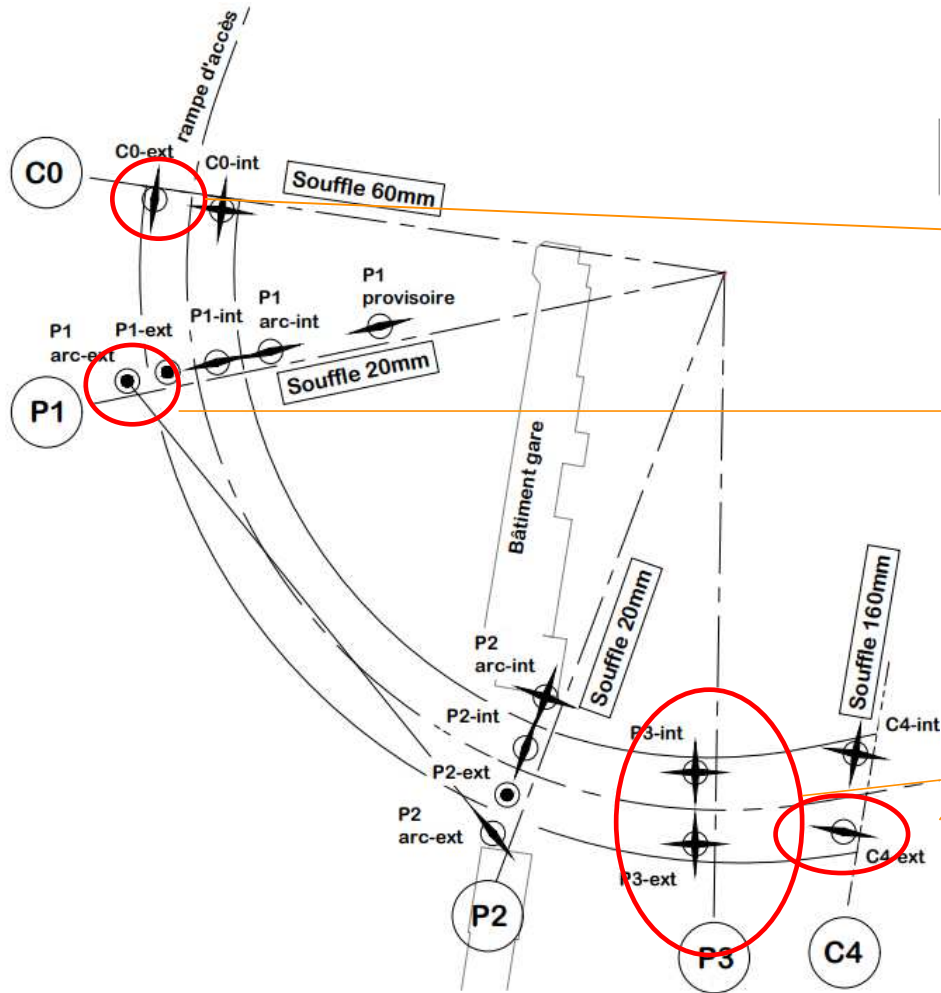
LÉGENDE :

-  • FIXE DANS LE SENS LONGIT. ET TRANSV.
-  • FIXE DANS LE SENS LONGITUDINALE
-  • FIXE DANS LE SENS TRANSVERSALE
-  • MOBILES BI-DIRECTIONNELLES

- *Articulation => libération des mouvements, diminution des efforts*
- *Cassure d'angle au droit des joints*
- **JOINT DE CHAUSSEE COMPLEXE**



Fonctionnement Horizontal : EXE : point fixe en P1



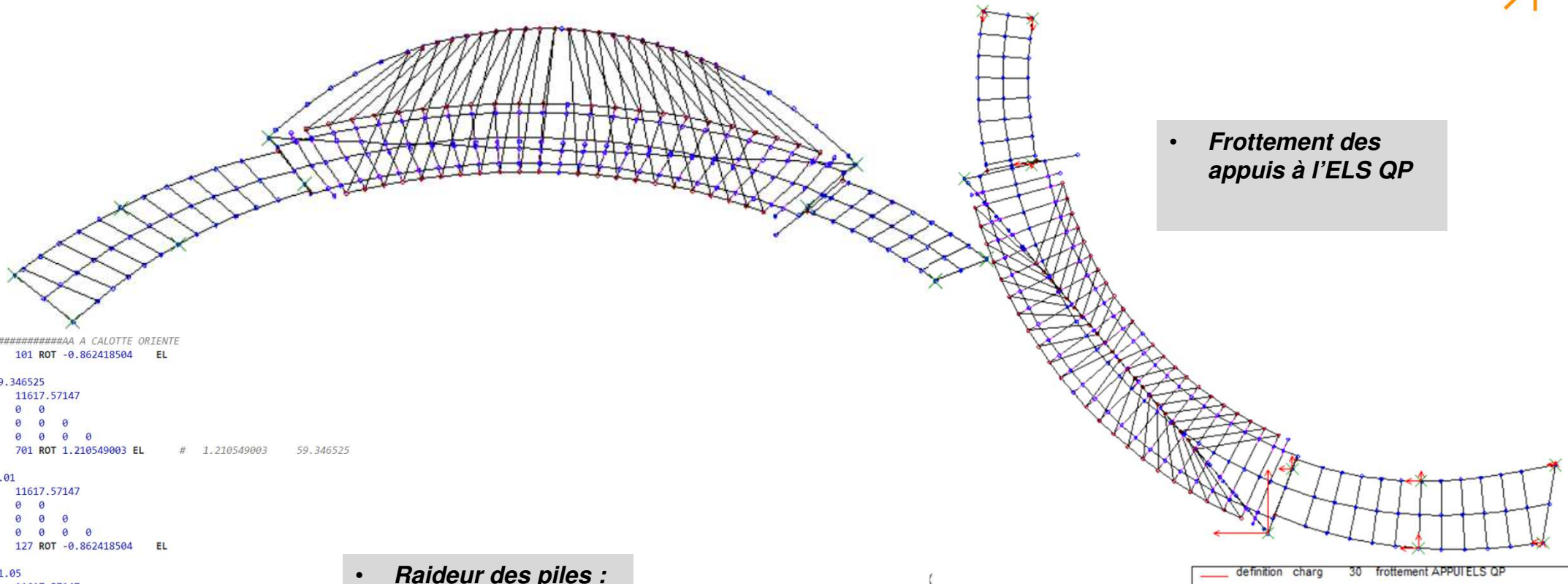
- *Guidé perpendiculaire au joint*

- *Point fixe P1*

- *Non guidé sur P3*



Fonctionnement Horizontal : EXE : point fixe en P1

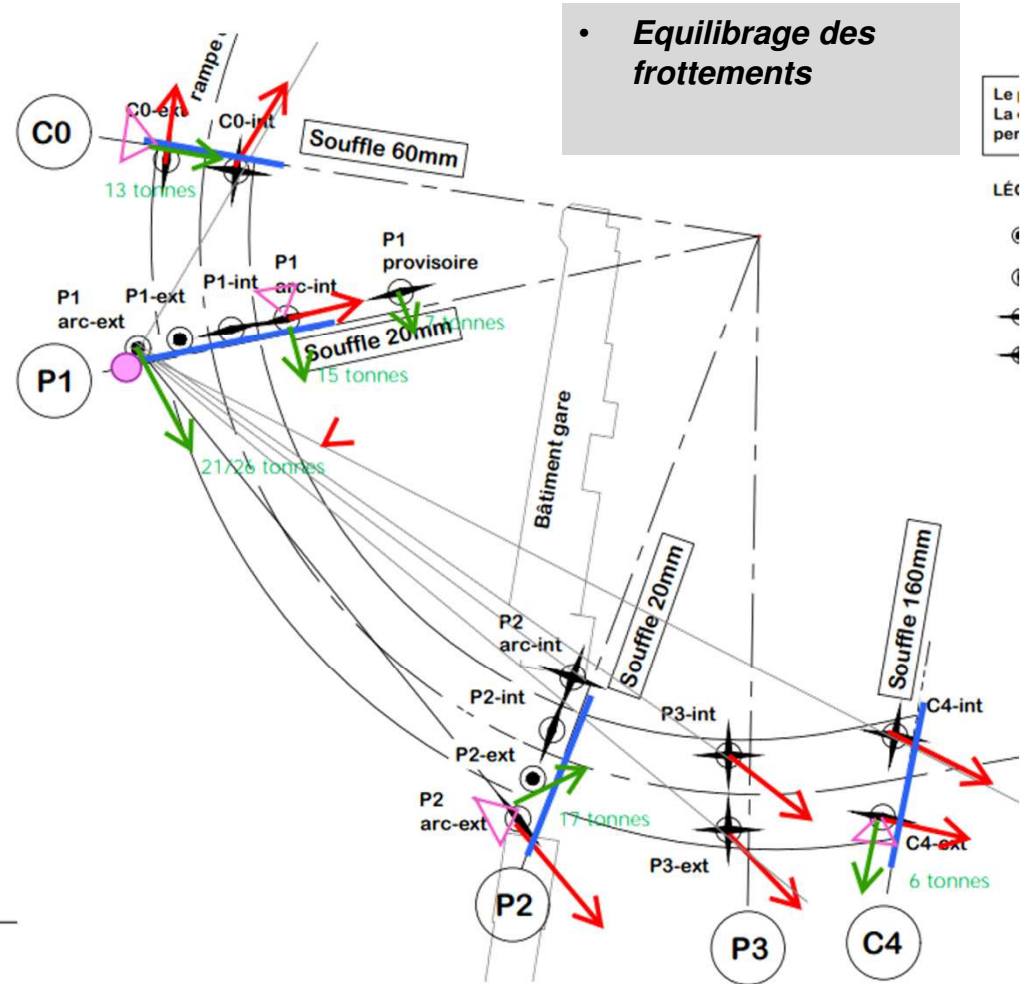
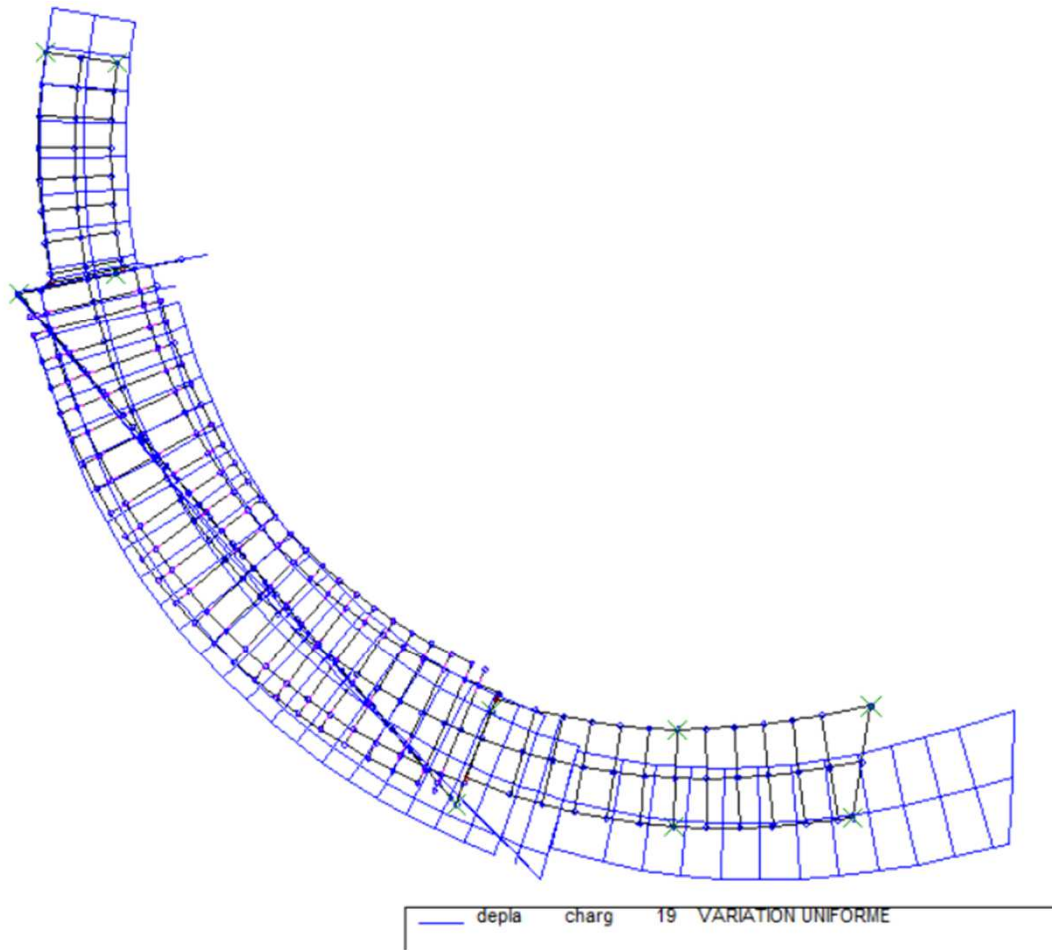


- **Frottement des appuis à l'ELS QP**

- **Raideur des piles : Appuis élastiques**

```
#####A A CALOTTE ORIENTE
APPUI 101 ROT -0.862418504 EL
0.00
0 59.346525
0 0 11617.57147
0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
APPUI 701 ROT 1.210549003 EL # 1.210549003 59.346525
0
0 0.01
0 0 11617.57147
0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
APPUI 127 ROT -0.862418504 EL
51.05
0 51.05
0 0 11617.57147
0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
APPUI 702 ROT 0.20625306 EL
0
0 86.35269784
0 0 11617.57147
0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
EXEC CHARG 80 , 108 , 109
```


Fonctionnement Horizontal : EXE : point fixe en P1



Le
La
per
L'Éc
C
A



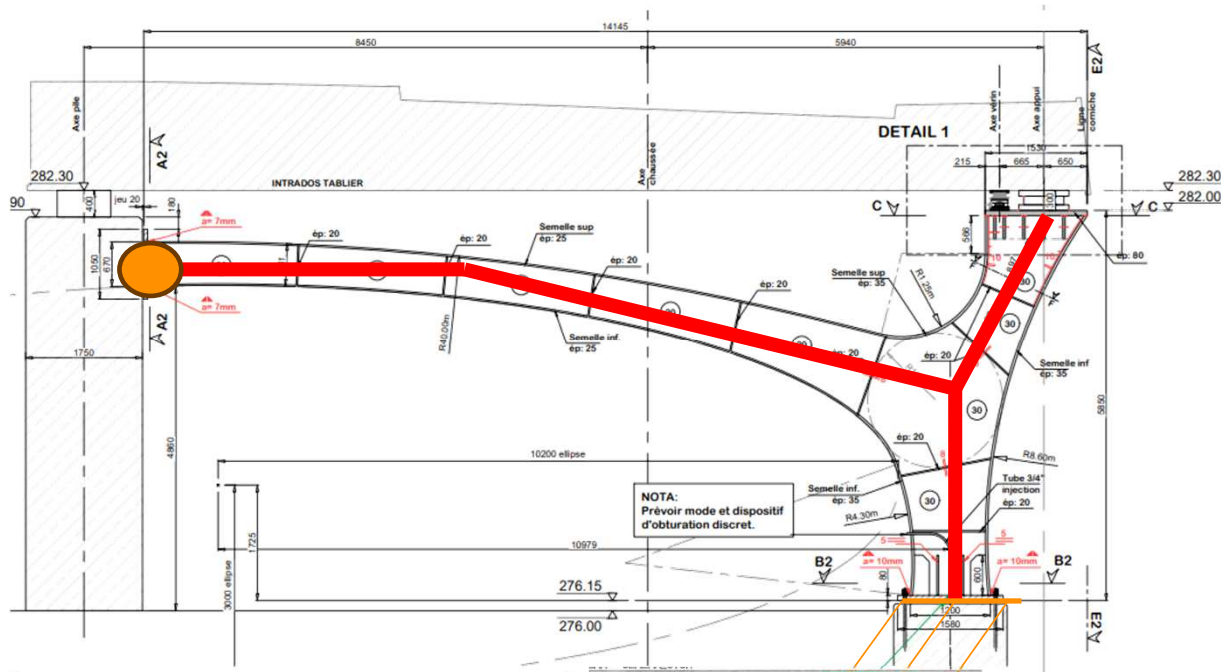
Fonctionnement Horizontal : Descente de Charge

VALEURS ELU													
TRAVEE	APPUI		Fx [MN]	Fy [MN]	H résultant [MN]	Fz [MN]	D résultant [cm]	DX [cm]	DY [cm]	αX [mrad]	αY [mrad]	α [mrad]	
CD-P1	C0-INT	Min	0,00	0,00	0,00	0,46	3,61	-1,3	-3,37	-3,7	-1,5	4,0	
		Max	0,00	0,00	0,00	2,50	3,61	1,3	3,37	9,4	3,5	10,0	
	C0-EXT	Min	-0,80	-0,12	0,81	0,62	3,54	-0,52	-3,5	-3,4	-3,4	0	4,8
		Max	0,80	0,12	0,81	2,50	3,54	0,52	3,5	6,5	0	6,5	6,5
	P1-EXT	Min	-0,60	0,90	1,08	0,46	0,00	0	0	-3,6	-2	4,1	4,1
		Max	0,60	-0,90	1,08	2,50	0,00	0	0	9,3	2,2	9,6	9,6
P1-INT	Min	-0,50	0,50	0,71	0,62	0,00	0	0	-6,5	-2,2	6,9	6,9	
	Max	0,50	-0,50	0,71	2,50	0,00	0	0	3,2	0,5	3,2	3,2	
BOWSTRING	P2-ARC-EXT	Min	-0,94	-0,80	1,23	2,60	8,15	-6,2	-5,29	-2,7	-3,15	4,1	4,1
		Max	0,94	0,80	1,23	10,10	8,15	6,2	5,29	2,9	3,3	4,4	4,4
	P2-ARC-INT	Min	0,00	0,00	0,00	-0,28	7,32	-6,2	-3,9	-1,9	-4,3	4,7	4,7
		Max	0,00	0,00	0,00	5,17	7,32	6,2	3,9	2	5,8	6,1	6,1
	P1-ARC-EXT	Min	-0,64	-0,74	0,98	2,82	0,00	0	0	-2,2	-3,6	4,2	4,2
		Max	0,64	0,74	0,98	10,52	0,00	0	0	2,9	3,3	4,4	4,4
	P1-ARC-INT	Min	-0,13	-0,62	0,64	0,36	2,23	-1,7	-1,45	-2,2	-4,3	4,8	4,8
		Max	0,13	0,62	0,64	6,24	2,23	1,7	1,45	1,4	5,8	6,0	6,0
P1-ARC-PROV	Min	-0,09	-0,44	0,45	0,20	2,46	-2,2	-1,1	-5,35	-6,5	8,4	8,4	
	Max	0,09	0,44	0,45	3,56	2,46	2,2	1,1	5	2,5	5,6	5,6	
P2-C4	P2-INT	Min	-1,20	-0,24	1,22	0,25	0,00	0	0	-5	-2,7	5,7	5,7
		Max	1,20	0,24	1,22	2,38	0,00	0	0	0,5	3,3	3,3	3,3
	P2-EXT	Min	-1,97	-0,10	1,97	0,36	0,00	0	0	-4,6	-1,8	4,9	4,9
		Max	1,97	0,10	1,97	2,75	0,00	0	0	1,5	4	4,3	4,3
	P3-EXT	Min	0,00	0,00	0,00	0,50	9,51	-8,78	-3,66	-5,7	-1,7	5,9	5,9
		Max	0,00	0,00	0,00	4,25	9,51	8,78	3,66	0,6	1,4	1,5	1,5
	P3-INT	Min	0,00	0,00	0,00	0,66	8,71	-8,4	-2,3	-5,7	-1,4	5,9	5,9
		Max	0,00	0,00	0,00	4,40	8,71	8,4	2,3	0,9	1,4	1,7	1,7
	C4-EXT	Min	-0,18	-1,09	1,10	0,28	10,74	-10,6	-1,72	-3,1	-7,5	8,1	8,1
		Max	0,18	1,09	1,10	2,23	10,74	10,6	1,72	2,15	0,3	2,2	2,2
C4-INT	Min	0,00	0,00	0,00	0,31	9,91	-9,9	-0,49	-3,7	-1,11	3,9	3,9	
	Max	0,00	0,00	0,00	2,71	9,91	9,9	0,49	2,7	7	7,5	7,5	

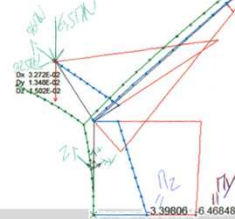
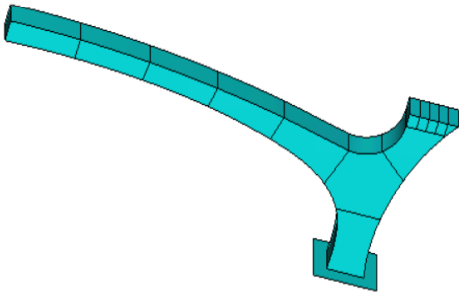
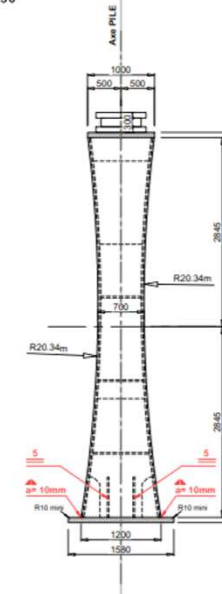
- 1 soulèvement d'appui ELU FONDAMENTAL
- Pas de soulèvement ELS fréquent et ELS Rare

- 1 AA anti-soulèvement
- 125 tonnes de réaction horizontale
- JDC C4 160 mm

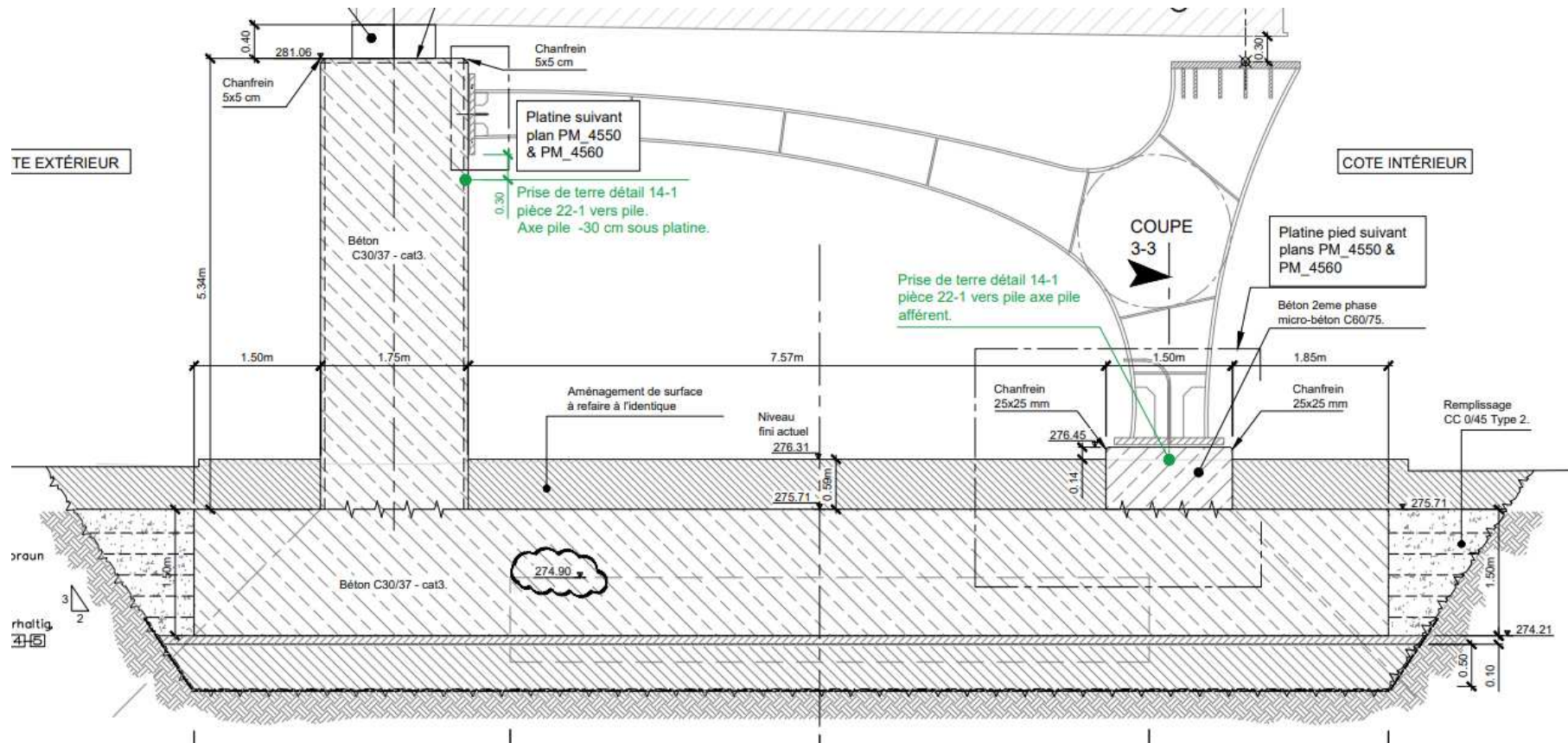
Pile métallique : 3 Piles métalliques



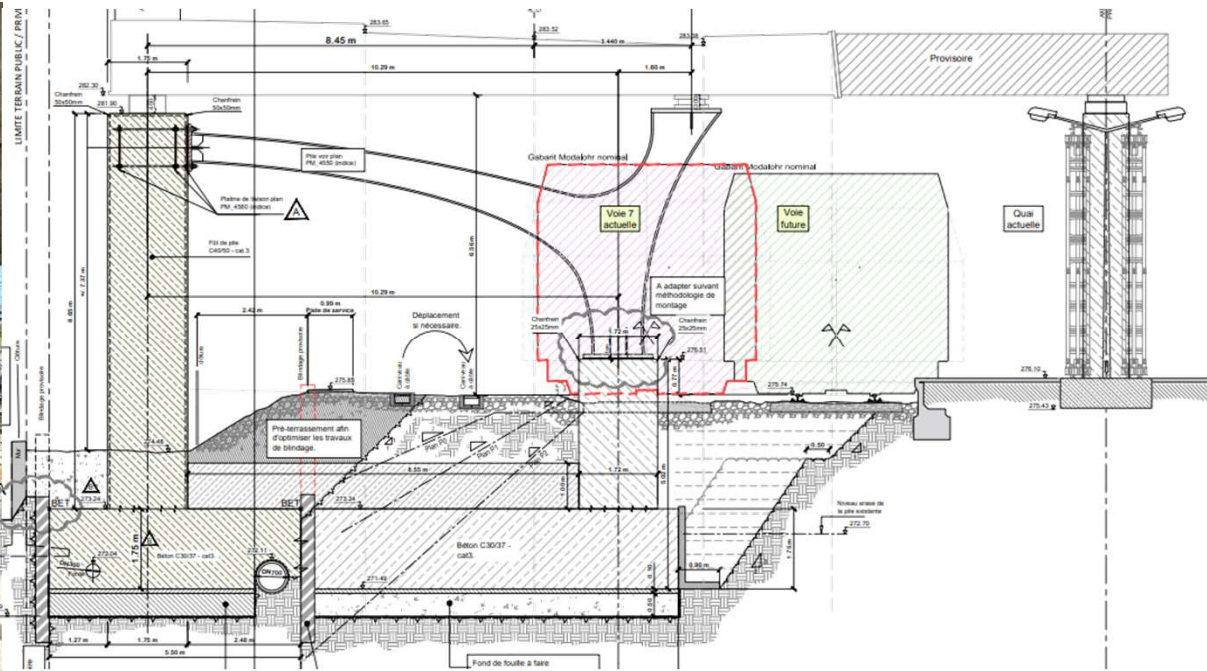
- ÉLÉVATION DE COTE E2
ÉCHELLE 1/50



- **Fonctionnement majoritaire encastrement inférieur**

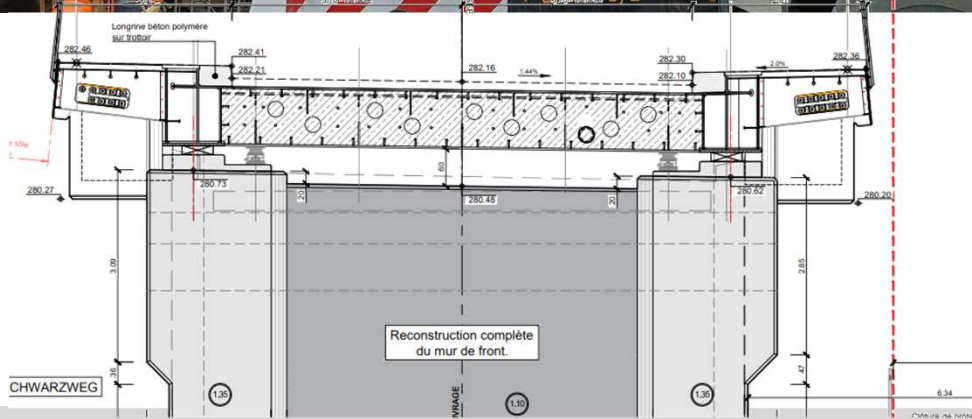
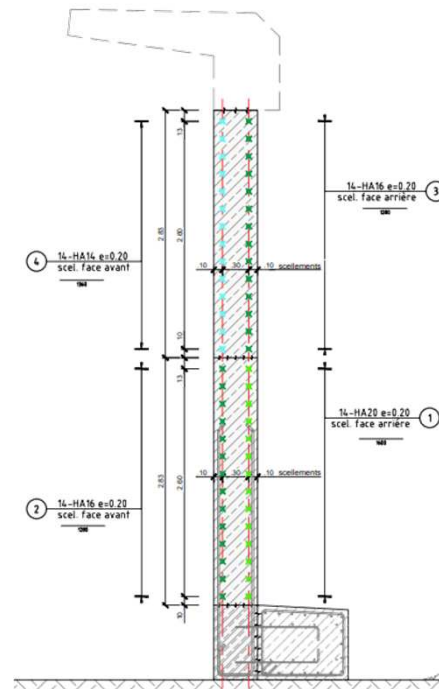


- **Fondation superficielle : Identique existant : Marne compacte**



- *Phasage de réalisation*
- *P1 provisoire*



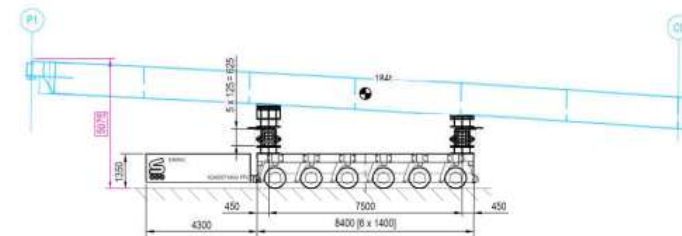


- Réutilisation Fondation existante : Nouvel Ouvrage moins lourd
- Réfection encorbellement rampe d'accès

- ELEVATION SUIVANT 1 -
ECHELLE 1/50

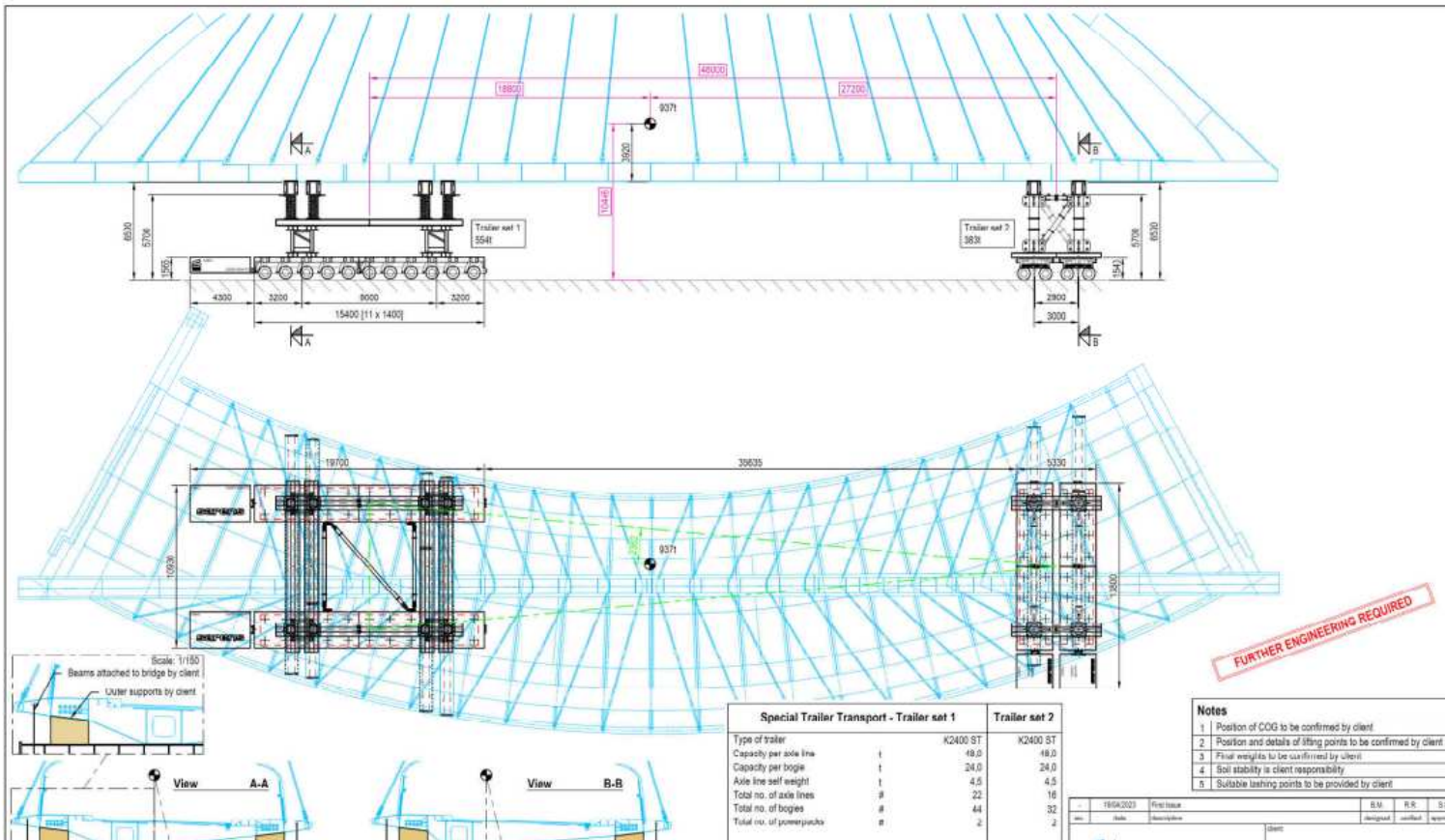


- *Moyen mécanique après sciage*
- *Kamag durant coupure de la gare (en couleur)*
- *Arbalète pour évaluation tension résiduelle câble après sciage : 25% nécessaire : OK*





- *Moyen mécanique après sciage*
- *Komag during coupure de la gare*



- **Par Kamag**
- **Pianotage au droit des caténares non déposés.**



Sébastien
 Nicolas
 Patrick
 Gilbert
 Marc
 Rawezh
 Thelma
 George
 Bernard
 Guillaume
 Eric
 Fabien
 Denis
 Vitor
 Benoit
 Vincenzo
 Frédéric
 Anthony
 Claude
 Gaetan
 Stéphan
 Léonard
 Julien
 Mike
 Laurent
 New Word
 Léna
 Pauline
 Adrien
 Damien



Damien CHAMPENROY

d.champenroy@loa.glob-ing.lu

+352 26 11 92 81



Vincenzo MONTIROSSO

v.montiroso@loa.glob-ing.lu

+352 26 11 92 81

