

**Journées techniques**  
organisées avec l'appui du Sétra  
et sous l'égide de la CoTITA

---

# **PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE**

**Mardi 27 mars 2012**  
**Lundi 2 et mardi 3 avril 2012**

CETE Méditerranée, Aix-en-Provence



# Journées techniques

organisées avec l'appui du Sétra  
et sous l'égide de la CoTITA

## PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

---

# Exemple de calcul sismique

## *Cas d'un ouvrage mixte*

**Mardi 3 avril 2012**

*Anthony HEKIMIAN*  
CETE Méditerranée, Aix-en-Provence



## *Exemple de calcul : ouvrage mixte*

---

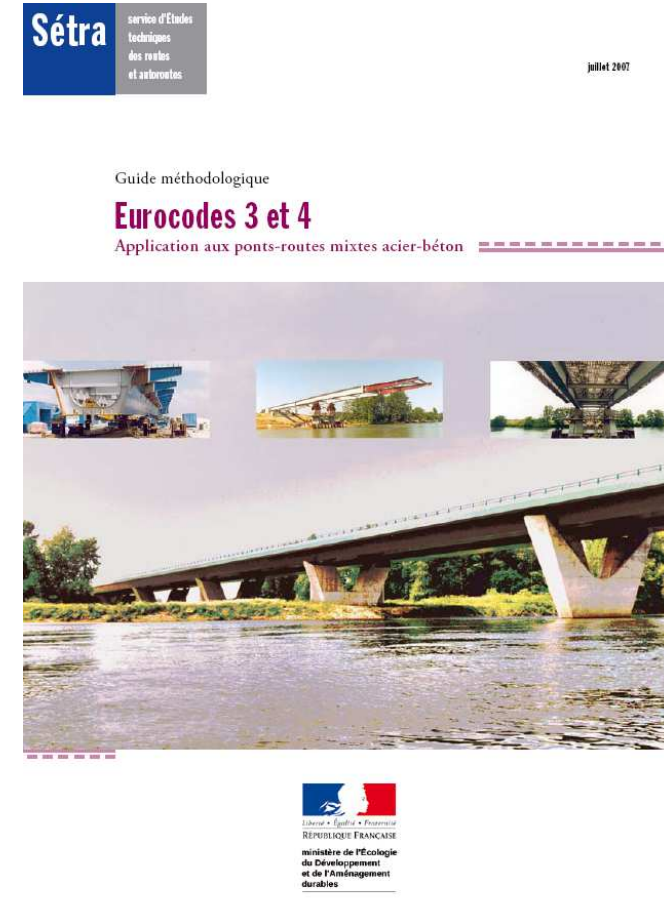
### **Plan :**

- Description de l'ouvrage
- Hypothèses sismiques
- Calcul des sollicitations sismiques
- Vérifications sous séismes



## Description de l'ouvrage

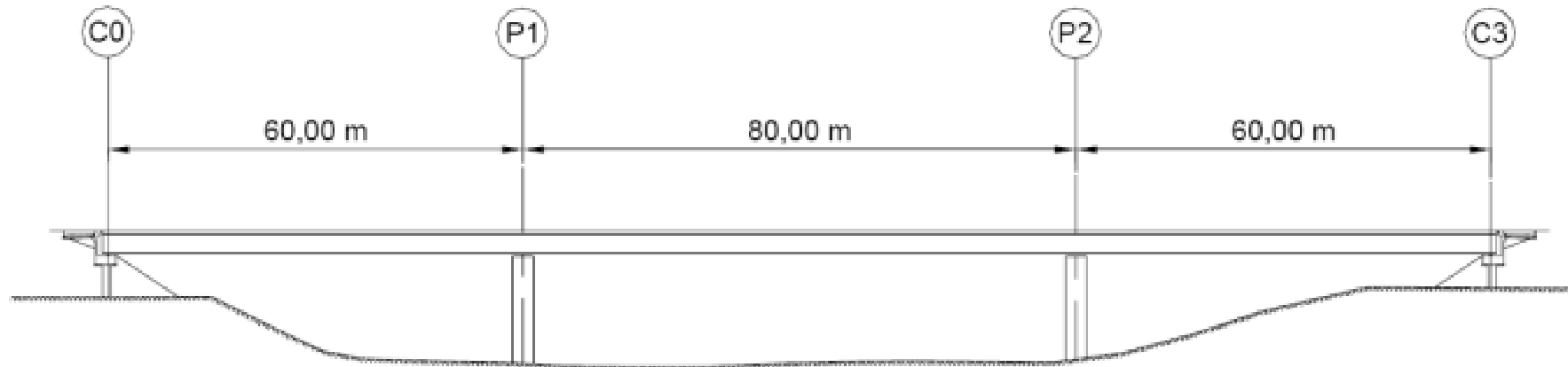
Il s'agit de l'ouvrage pris en exemple dans le guide méthodologique « Eurocodes 3 et 4 – Application aux ponts routes mixtes acier-béton » (Sétra, juillet 2007).



L'ouvrage est supposé implanté en **zone de sismicité moyenne (métropole)**.

## Description de l'ouvrage

### Coupe longitudinale



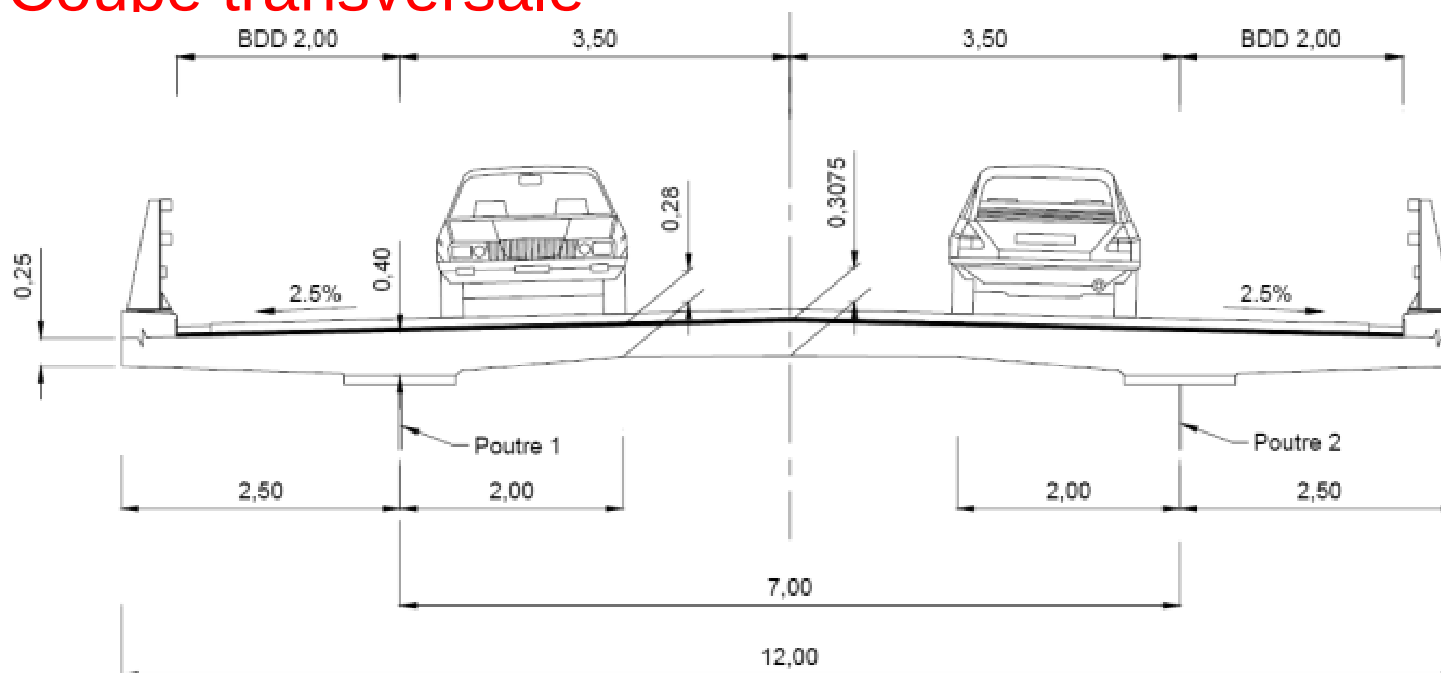
Abouts de 0,5m soit une **longueur totale de 201m**.

S'agissant d'un exemple théorique, les hypothèses simplificatrices suivantes ont été faites :

- Le tracé en plan est **rectiligne**,
- L'extrados est plat,
- L'ouvrage est droit,
- Les poutres métalliques sont de hauteur constantes : 2800mm.

## Description de l'ouvrage

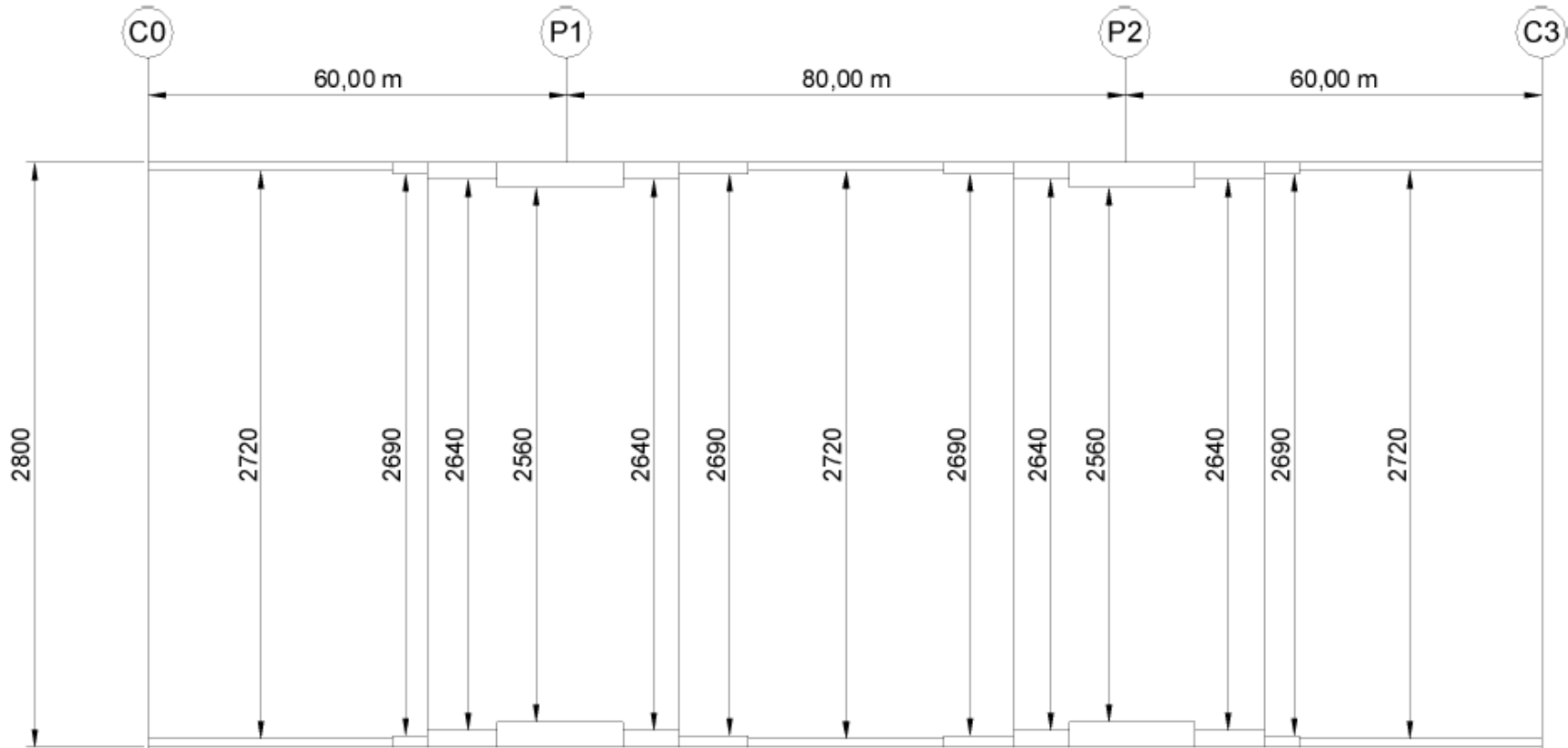
### Coupe transversale



- Coupe transversale symétrique,
- Largeur totale de 12m,
- Entraxe des poutres principales de 7m
- Profil en travers portant une chaussée bidirectionnelle à 2 voies de 3,5m bordées de chaque côté par une BDD de 2m et une longrine de BN4

# Description de l'ouvrage

## Répartition matière



SEMELLE SUPERIEURE Largeur constante 1000	35000 x 40	5000 x 55	10000 x 80	18000 x 120	8000 x 80	10000 x 55	28000 x 40	10000 x 55	8000 x 80	18000 x 120	10000 x 80	5000 x 55	35000 x 40
AME	18 x 40000			26 x 36000			18 x 4 8000			26 x 36000			18 x 40000
SEMELLE INFERIEURE Largeur constante 1200	35000 x 40	5000 x 55	10000 x 80	18000 x 120	8000 x 80	10000 x 55	28000 x 40	10000 x 55	8000 x 80	18000 x 120	10000 x 80	5000 x 55	35000 x 40





## Description de l'ouvrage

---

### Piles et culées

Chaque pile est supposée constituée d'un **fût circulaire de 3m de diamètre surmonté d'un chevêtre de section carrée de 2m x 2m d'une longueur horizontale de 8,5m.**

La distance entre la base du fût et le dessus des chevêtres est de **3m pour les culées (C0 et C3) et 15m pour les piles (P1 et P2).**

Dans le cadre de cet exemple, pour des raisons de simplification, les **fondations sont supposées infiniment rigides**, ce qui conduit à considérer les piles et les culées comme parfaitement encastrées dans le sol (cette hypothèse est sécuritaire du point de vue des efforts mais potentiellement non conservative du point de vue des déplacements). Dans le cadre d'une étude opérationnelle, il conviendrait de modéliser les fondations et l'interaction sol/structure et d'évaluer plus finement leur souplesse.

## Description de l'ouvrage

---

### Système d'appui du tablier

Le tablier repose sur des **appareils d'appui en élastomère fretté** dont nous avons déterminé les caractéristiques à partir d'un **dimensionnement en service selon la norme NF EN 1337-3**.

Les dimensions des appareils d'appui obtenus sont les suivantes :

- Sur culées :  $400 \times 600$  ; 8(12+4) ; 2×6  
avec dispositif anti-cheminement en partie supérieure
- Sur piles :  $700 \times 800$  ; 4(16+5) ; 2×8

## Description de l'ouvrage

---

### Caractéristiques des matériaux

a) Béton C35/45 pour le hourdis et les appuis

✓ Résistance caractéristique à la compression sur cylindre :

$$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$$

✓ Résistance moyenne en compression à 28j :

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 43 \text{ MPa}$$

✓ Module d'élasticité :  $E_{cm} = 22000 (f_{cm}/10)^{0,3} = 34077 \text{ MPa}$

✓ Le **coefficient d'amortissement** est pris égal à **5%** dans la modélisation dynamique (NF EN 1998-2, §4.1.3).

b) Acier de charpente

✓ Module d'élasticité :  $E_a = 210000 \text{ MPa}$

✓ Le **coefficient d'amortissement** est pris égal à **2%** dans la modélisation dynamique (NF EN 1998-2, §4.1.3).



## Description de l'ouvrage

### Caractéristiques des matériaux

#### c) Appareils d'appui en élastomère fretté

✓ Le module de cisaillement pour la vérification des appareils d'appui est pris égal à :

- sous charges statiques :

$$G_d = G_g = 0,9 \text{ MPa} \quad (\text{NF EN 1337-3, §4.4.2})$$

- sous l'effet horizontal des charges d'exploitation (freinage) :

$$G_d = G_{dyn} = 1,8 \text{ MPa} \quad (\text{guide technique « Appareils d'appui en élastomère fretté » 2007, §3.2.2})$$

- sous l'effet des actions sismiques :

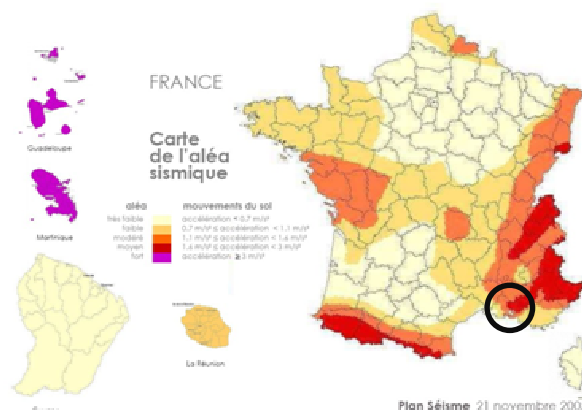
$$G_d = G_b = 1,1 \times G_g = 1 \text{ MPa} \quad (\text{NF EN 1998-2, §7.5.2.4(5)})$$

✓ Le **coefficient d'amortissement** est pris égal à **5%** dans la modélisation dynamique (NF EN 1998-2, §7.5.2.4(5)).

# Hypothèses sismiques

## Localisation – Catégorie d'importance – Classe de sol

L'ouvrage est supposé implanté dans les Bouches-du-Rhône (13) sur la commune de Lançon-Provence, soit en **zone 4, dite de sismicité moyenne**, au sens du nouveau **zonage sismique national** officialisé par la publication du **décret n°2010-1255 du 22 août 2010** portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français.



L'ouvrage, se situant sur une route nationale, est considéré comme appartenant à la **catégorie d'importance III** (importance moyenne au sens de l'EC8-2).

La **classe de sol** est la classe **B** (sols granulaires sur-consolidés sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur). Le coefficient topographique  $\tau$  est égal à **1,0** (zone de plaine).

# Hypothèses sismiques

---

## Choix de conception parasismique

L'ouvrage étant situé dans une zone de sismicité moyenne, et reposant sur des **appareils d'appui en élastomère fretté**, nous proposons de profiter de l'**isolation partielle des mouvements du sol** apportée par ces derniers et d'adopter une conception élastique de l'ouvrage et des appuis.

Le dimensionnement de l'ouvrage est donc basé sur un **comportement élastique ( $q=1$ )**, ce qui signifie que les matériaux constitutifs de la structure restent dans le domaine élastique et que l'effet du séisme de référence n'est pas de nature à endommager notablement l'ouvrage (ouvrage quasi-intact à l'issue du tremblement de terre).

La justification des appareils d'appui est menée en considérant un coefficient de fiabilité  $\gamma_{IS}=1,5$  conformément à l'article 7.6.2 de la NF EN 1998-2. Par conséquent, il n'est pas prévu l'emploi de butées parasismiques.

# Hypothèses sismiques

## Caractérisation de l'action sismique

### a) Accélération de calcul

L'arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la classe dite « à risque normal » fixe le niveau d'accélération caractéristique de référence pour la zone 4 (sismicité moyenne) à  $A_{EK} = 1,6 \text{ m/s}^2$  et le coefficient d'importance pour la catégorie d'importance moyenne (cat. III) à  $\gamma_I = 1,2$ .

Au final, l'accélération sismique de dimensionnement est :

$$A_{Ed} = \gamma_I \cdot A_{EK} = 1,92 \text{ m/s}^2$$

Pour le séisme vertical et pour les régions de sismicité faible à moyenne (France métropolitaine), l'accélération à prendre en compte selon ce même arrêté est  $A_{Ev} = 0,9 A_{Ed} = 1,73 \text{ m/s}^2$ .

### b) Coefficients de comportement

Le coefficient de comportement  $q$  est pris égal à 1 (conception élastique).

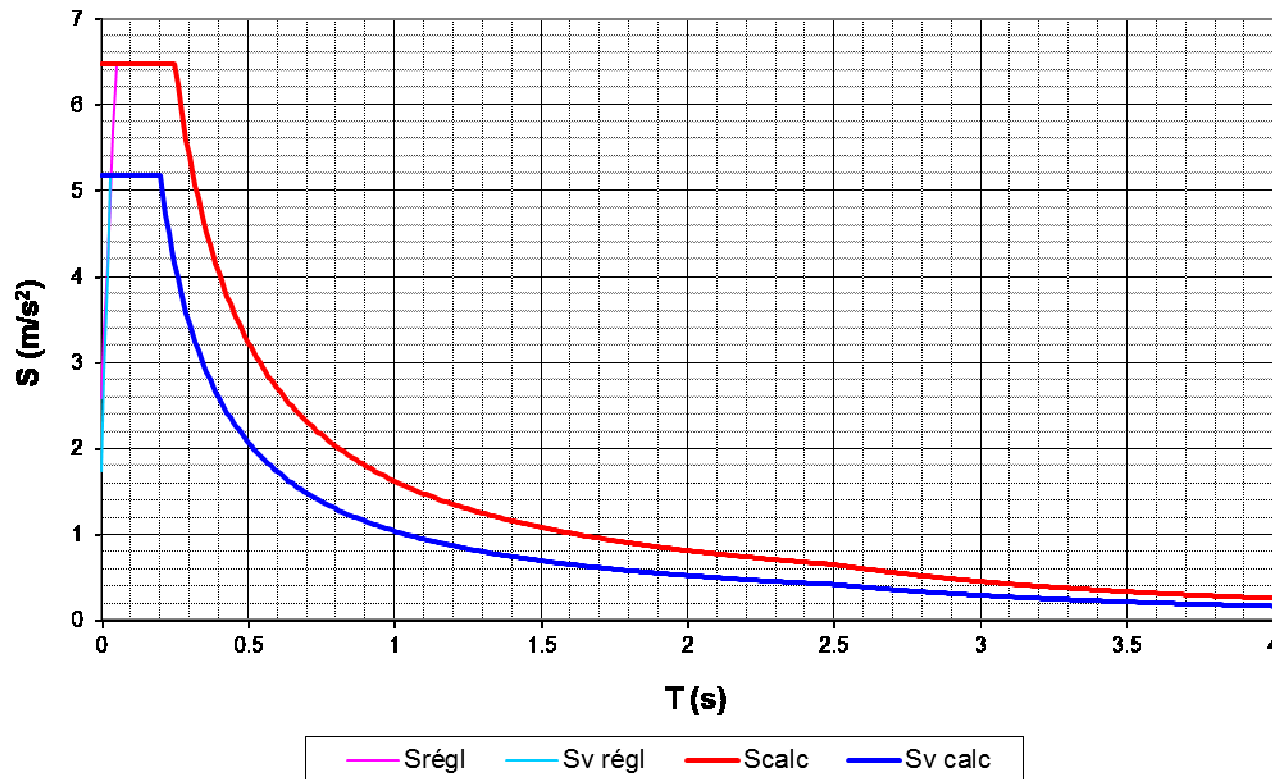
**Pour l'analyse dans la direction verticale, le coefficient de comportement doit être pris égal à  $q = 1,0$  (cf. EC8-2 §4.1.6(12)P).**

# Hypothèses sismiques

## Caractérisation de l'action sismique

### c) Spectres de calcul

L'arrêté sismique « Pont » fixe également les caractéristiques spectrales pour un spectre de type 2 (métropole), pour un sol de classe B et compte tenu de la topographie du site aux valeurs suivantes :

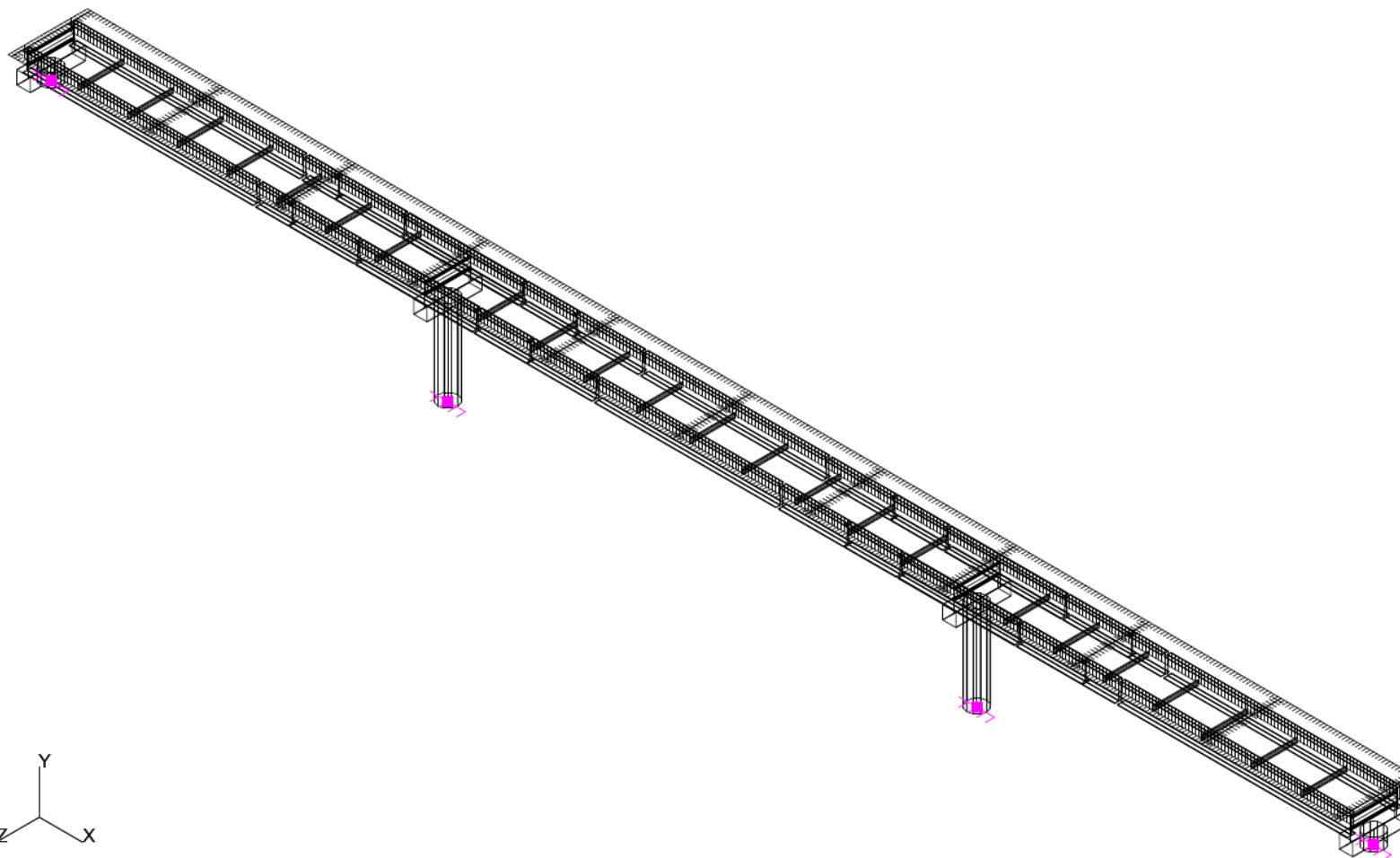




# Calcul des sollicitations sismiques

## Modélisation

Les efforts sismiques sont déterminés à partir d'une modélisation de la structure, à l'aide d'un logiciel de calcul dynamique aux Eléments Finis.



# Calcul des sollicitations sismiques

---

## Modélisation

Les caractéristiques du modèle sont les suivantes :

- Poutres principales modélisées par des éléments filaires ;
- Entretoises sur appuis modélisées par des éléments filaires encastrés sur les poutres principales ;
- Entretoises courantes modélisées par des éléments filaires articulés suivant un axe vertical avec les poutres principales ;
- Hourdis modélisé par un élément surfacique d'épaisseur constante (épaisseur moyenne), respectant la largeur réelle et dont le feuillet moyen est disposé au niveau du centre de gravité du hourdis ;
- Des barres infiniment rigides permettent de liasonner les poutres principales et la dalle ;
- Les appuis sont modélisés avec leurs caractéristiques mécaniques brutes (sections non fissurées) ;
- Les appareils d'appui sont modélisés par une barre dont les caractéristiques sont déterminées de telle manière à respecter le comportement théorique d'un appareil d'appui en élastomère fretté.

# Calcul des sollicitations sismiques

## Modes propres

Les 40 premiers modes propres de la structure sont déterminés en considérant la masse permanente de la structure (appuis et tablier avec les valeurs nominales des superstructures).

Pour chacun des modes, l'amortissement équivalent est déterminé par le logiciel en fonction des matériaux les plus sollicités.

Mode N°	Grandeurs des modes propres					Masses Modales		
	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Energie (J)	Amortissement (%)	M <sub>x</sub> (%)	M <sub>y</sub> (%)	M <sub>z</sub> (%)
1	3.03	2.075	0.48	5	4.96	0	0	80.73
2	3.13	2.006	0.5	5	5	80.72	0	0
3	3.31	1.896	0.53	5	4.97	0	0	0
4	7.47	0.841	1.19	28	4.13	0	0	0.03
5	7.61	0.826	1.21	29	2.65	0	0.53	0
6	8.72	0.72	1.39	38	3.37	0	0	0.02
7	12.11	0.519	1.93	73	2.72	0	0	0
8	12.48	0.504	1.99	78	3.34	0	0	0
9	13.8	0.455	2.2	95	3.56	0	0	0.04
10	14.67	0.428	2.33	108	2.86	0	58.19	0
11	18.75	0.335	2.98	176	4.05	0	0	0
12	22.58	0.278	3.59	255	3.88	0	0	0
13	26.57	0.236	4.23	353	2.9	0	0	0
14	28.02	0.224	4.46	393	4.32	0	0	2.26
15	31.36	0.2	4.99	492	3.65	0	0	0
16	33.16	0.189	5.28	550	5	0	0	0
17	33.18	0.189	5.28	550	5	8.94	0	0
18	34.14	0.184	5.43	583	3.99	0	0	1.08
19	37.72	0.167	6	712	3.03	0	0.47	0
20	38.34	0.164	6.1	735	3.17	0	0	0
21	39.34	0.16	6.26	774	3.35	0	0	0.42
22	42.06	0.149	6.69	885	3.81	0	0	0
23	47.69	0.132	7.59	1137	3.21	0	8.69	0
24	48.2	0.13	7.67	1161	2.12	0	0.24	0
25	48.47	0.13	7.71	1175	2	0	0	0
26	48.48	0.13	7.72	1175	2	0	0	0
27	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
28	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
29	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
30	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
31	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
32	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
33	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
34	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
35	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
36	48.49	0.13	7.72	1176	2	0	0	0
37	48.51	0.13	7.72	1177	2.04	0	0.24	0
38	48.6	0.129	7.74	1181	2	0	0	0
39	48.71	0.129	7.75	1186	3.91	0	0	3.81
40	53.36	0.118	8.49	1423	4.09	0	0	0

# Calcul des sollicitations sismiques

## Séisme longitudinal

A partir des spectres d'accélération définis précédemment et d'une analyse multimodale appliquant une méthode CQC prenant en compte un mode résiduel, on obtient les efforts et déformations sous séisme longitudinal.

Le repère local des fûts et des appareils d'appui est tel que :

$$\begin{cases} \vec{x} = \vec{Y} \\ \vec{y} = -\vec{X} \end{cases}$$

Par convention,  $M_y$  (respectivement  $M_z$ ) est le moment de flexion d'axe  $y$  (respectivement  $z$ ).

Les efforts en pied des différents fûts et au niveau des appareils d'appui sont :

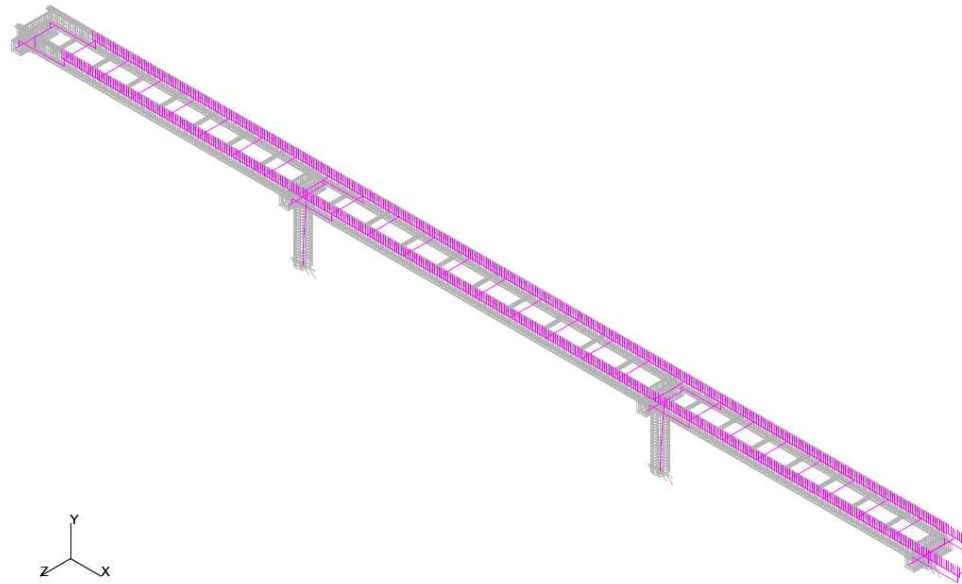
	C0		P1		P2		C3	
	Pied culée	Appareil d'appui	Pied pile	Appareil d'appui	Pied pile	Appareil d'appui	Pied culée	Appareil d'appui
$F_x$ (MN)	0.0428	0.0214	0.0499	0.0245	0.0499	0.0245	0.0428	0.0214
<b><math>F_y</math> (MN)</b>	<b>0.3684</b>	<b>0.1842</b>	<b>1.6368</b>	<b>0.5191</b>	<b>1.6368</b>	<b>0.5191</b>	<b>0.3684</b>	<b>0.1842</b>
$F_z$ (MN)	0	0.0001	0	0.0001	0	0.0001	0	0.0001
$M_y$ (MN.m)	0.0001	-	0.0004	-	0.0004	-	0.0001	-
<b><math>M_z</math> (MN.m)</b>	<b>1.142</b>	-	<b>21.5944</b>	-	<b>21.5944</b>	-	<b>1.142</b>	-

Les déplacements en tête des appuis et au niveau du tablier sont :

	C0		P1		P2		C3	
	Tête culée	Tablier	Tête pile	Tablier	Tête pile	Tablier	Tête culée	Tablier
$DX$ (cm)	0.01	8.3	1.18	8.3	1.18	8.3	0.01	8.3

# Calcul des sollicitations sismiques

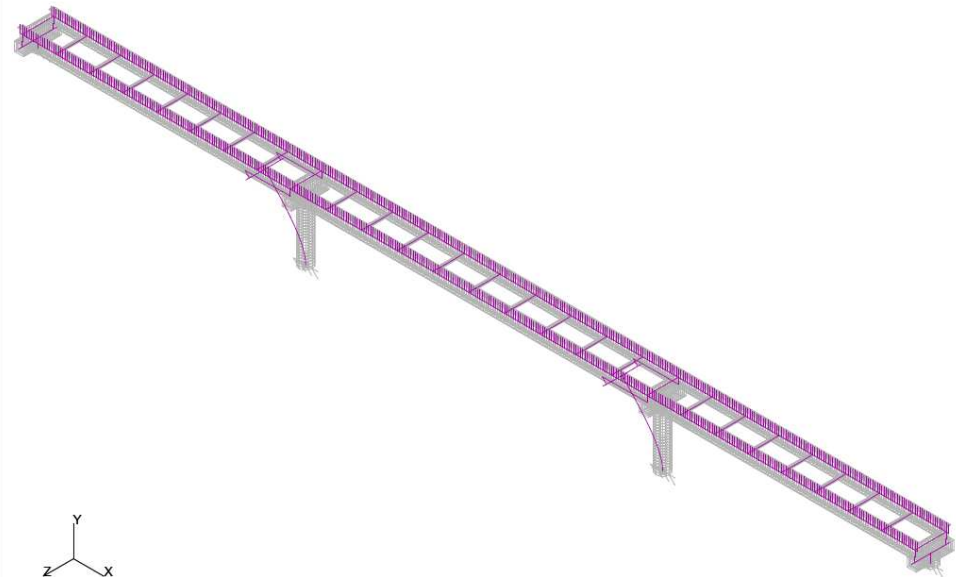
## Séisme longitudinal



Dynamique  
Mode n°2

Mode n°2

Période	2.006 s
Pulsation	3.133 rad/s
Fréquence	0.499 hz
Energie	5 J
Amortissement	5.00 %



Dynamique  
Mode n°17

Mode n°17

Période	0.189 s
Pulsation	33.178 rad/s
Fréquence	5.280 hz
Energie	550 J
Amortissement	5.00 %



# Calcul des sollicitations sismiques

## Séisme transversal

A partir des spectres d'accélération définis précédemment et d'une analyse multimodale appliquant une méthode CQC prenant en compte un mode résiduel, on obtient les efforts et déformations sous séisme longitudinal.

Les efforts en pied des différents fûts et au niveau des appareils d'appui sont :

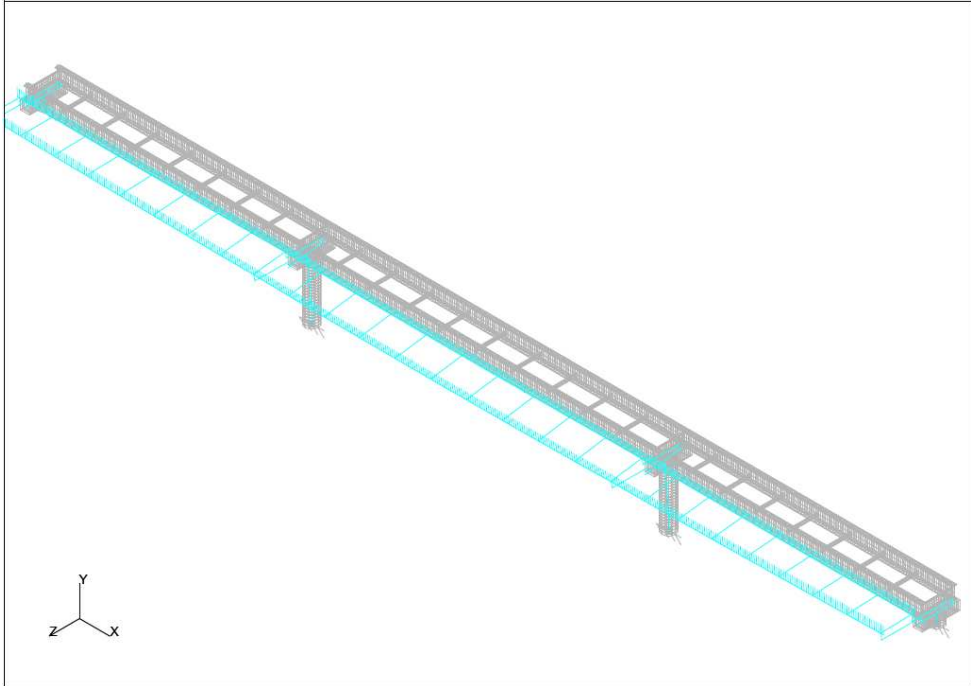
	C0		P1		P2		C3	
	Pied culée	Appareil d'appui	Pied pile	Appareil d'appui	Pied pile	Appareil d'appui	Pied culée	Appareil d'appui
Fx (MN)	0	0.2351	0	0.5782	0	0.5782	0	0.235
Fy (MN)	0	0.0018	0	0.0031	0	0.0031	0	0.0018
<b>Fz (MN)</b>	<b>0.3561</b>	<b>0.1788</b>	<b>1.2576</b>	<b>0.5029</b>	<b>1.2575</b>	<b>0.5029</b>	<b>0.356</b>	<b>0.1788</b>
<b>M<sub>y</sub> (MN.m)</b>	<b>2.5466</b>	-	<b>19.5845</b>	-	<b>19.5828</b>	-	<b>2.5459</b>	-
Mz (MN.m)	0	-	0.0001	-	0.0001	-	0	-

Les déplacements en tête des appuis et au niveau du tablier sont :

	C0		P1		P2		C3	
	Tête culée	Tablier	Tête pile	Tablier	Tête pile	Tablier	Tête culée	Tablier
DZ (cm)	0.01	8.02	1.16	8.25	1.16	8.25	0.01	8.02

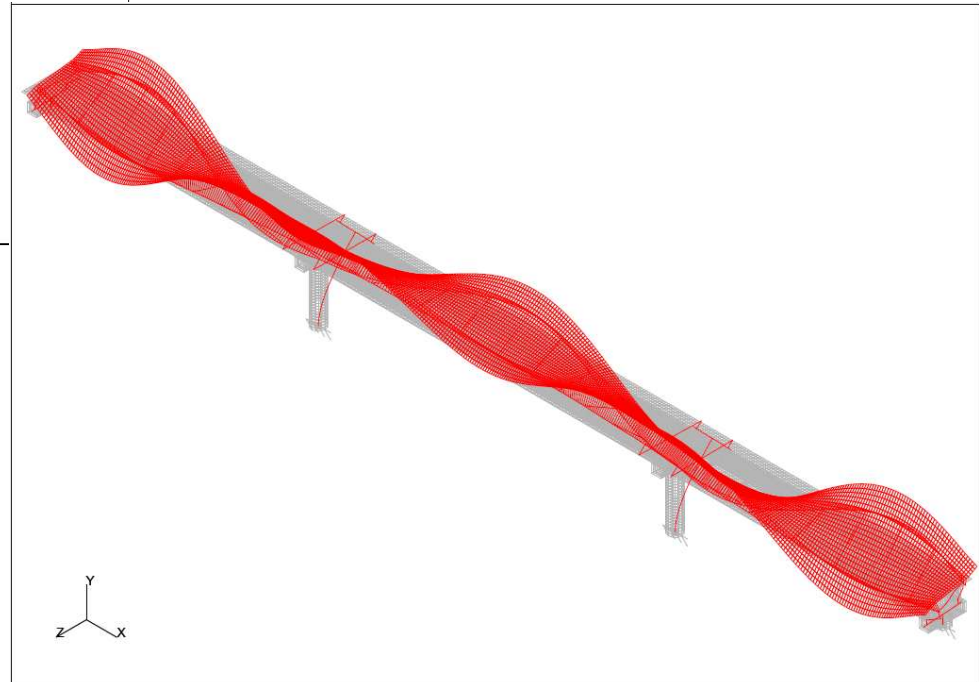
# Calcul des sollicitations sismiques

## Séisme transversal



Dynamique Mode n°1	
Période	2.075 s
Pulsation	3.028 rad/s
Fréquence	0.482 hz
Energie	5 J
Amortissement	4.96 %

Mode n°1



Dynamique Mode n°14	
Période	0.224 s
Pulsation	28.024 rad/s
Fréquence	4.460 hz
Energie	393 J
Amortissement	4.32 %

Mode n°14



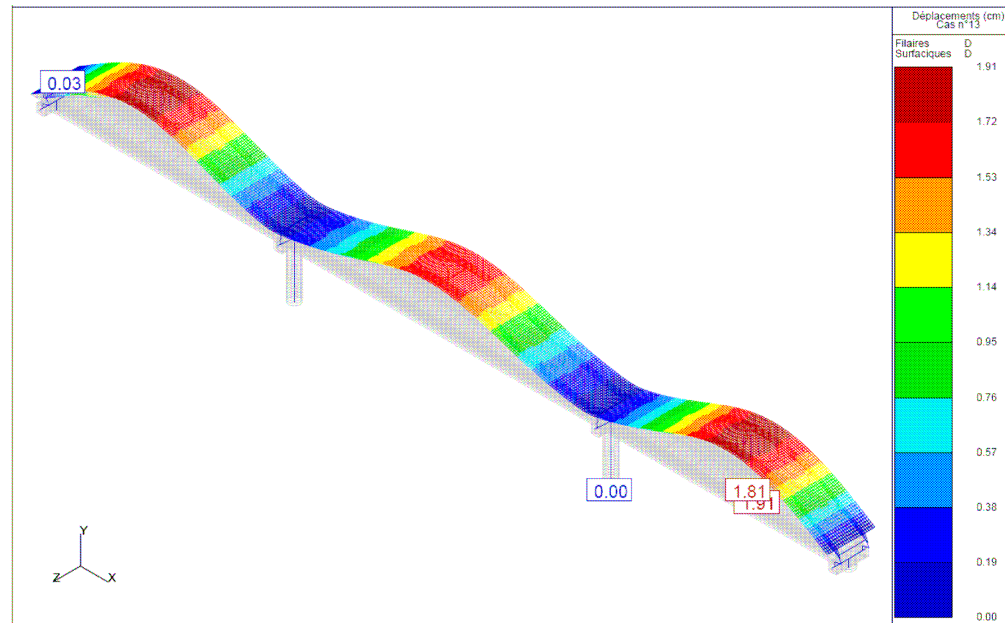
# Calcul des sollicitations sismiques

## Séisme vertical

Les efforts en pied des différents fûts et au niveau des appareils d'appui sont :

	C0		P1		P2		C3	
	Pied culée	Appareil d'appui	Pied pile	Appareil d'appui	Pied pile	Appareil d'appui	Pied culée	Appareil d'appui
<b>Fx (MN)</b>	<b>0.8676</b>	<b>0.4305</b>	<b>2.9285</b>	<b>1.4358</b>	<b>2.9285</b>	<b>1.4358</b>	<b>0.8676</b>	<b>0.4305</b>
Fy (MN)	0.0129	0.0064	0.0064	0.0022	0.0064	0.0022	0.0129	0.0064
Fz (MN)	0	0.002	0	0.0049	0	0.0049	0	0.002
My (MN.m)	0	-	0	-	0	-	0	-
Mz (MN.m)	0.0399	-	0.0828	-	0.0828	-	0.0399	-

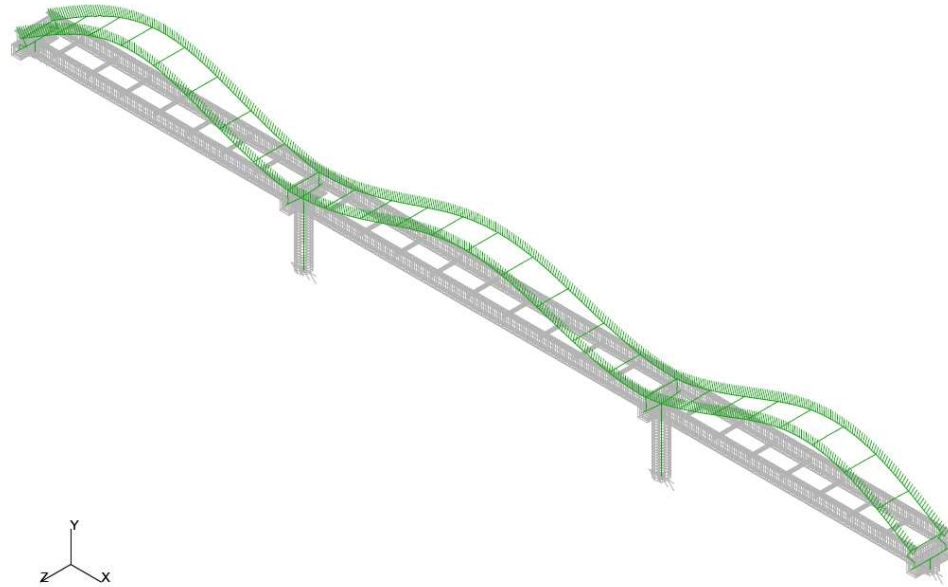
La structure se déforme de la manière suivante :





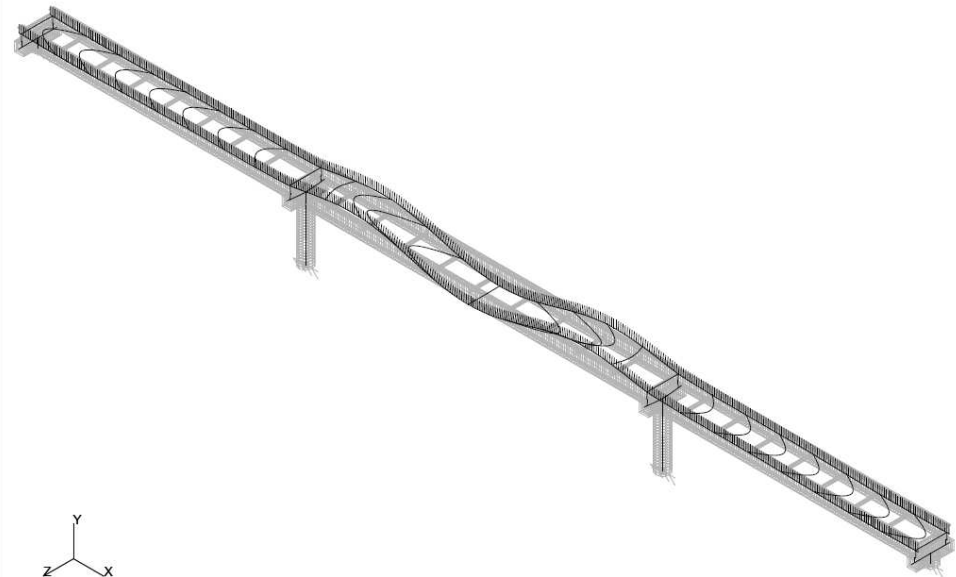
# Calcul des sollicitations sismiques

## Séisme vertical



Dynamique Mode n°10	
Période	0.428 s
Pulsation	14.670 rad/s
Fréquence	2.335 hz
Énergie	108 J
Amortissement	2.86 %

Mode n°10



Dynamique Mode n°23	
Période	0.132 s
Pulsation	47.686 rad/s
Fréquence	7.589 hz
Énergie	1137 J
Amortissement	3.21 %

Mode n°23



# Calcul des sollicitations sismiques

## Combinaisons sismiques

Les effets du séisme selon les 3 directions principales sont combinés (24 comb.) :

$$S_1 = \pm 1 \times S_L \pm 0,3 \times S_T \pm 0,3 \times S_V$$

$$S_2 = \pm 0,3 \times S_L \pm 1 \times S_T \pm 0,3 \times S_V$$

$$S_3 = \pm 0,3 \times S_L \pm 0,3 \times S_T \pm 1 \times S_V$$

Où :  $S_L$ ,  $S_T$ ,  $S_V$  représentent les effets des séismes longitudinal, transversal et vertical

La combinaison sismique de calcul est alors obtenue par :

$$G_k + A_{Ed}$$

Où  $G_k$  représente l'ensemble des actions permanentes moyennes (poids propres et superstructures calculées avec leurs valeurs nominales) et  $A_{Ed}$  l'enveloppe des combinaisons sismiques  $S$ .

En outre, pour les justifications de certains équipements (appareils d'appui, joints de chaussée...), il convient de prendre en compte la moitié des effets des actions thermiques caractéristiques ( $T_k$ ) ainsi que les effets des déformations différées (retrait, fluage...) ( $S_{diff}$ ). La combinaison sismique devient alors :

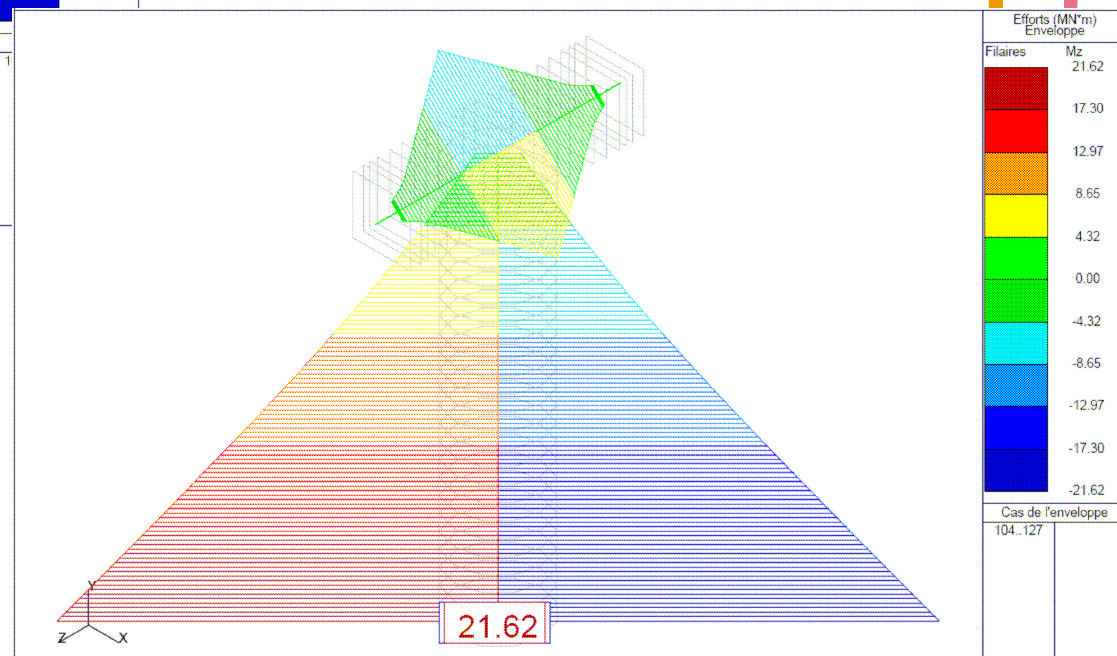
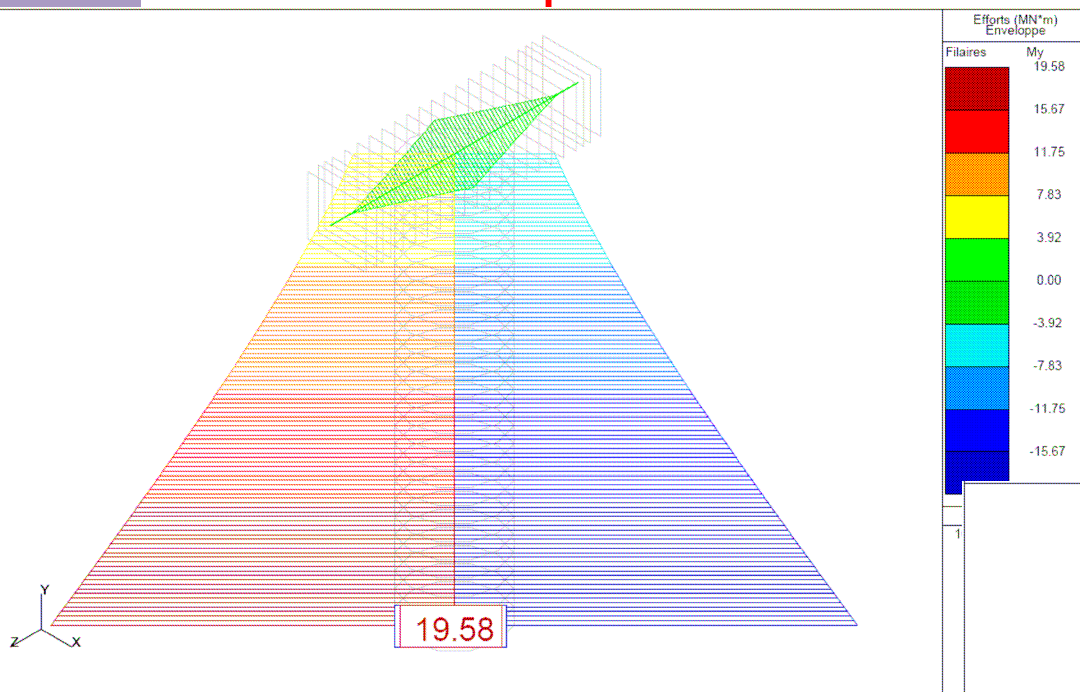
$$G_k + A_{Ed} + S_{diff} + 0,5 \cdot T_k$$

# Vérifications sous séisme

## Fûts des piles

### Moment de flexion My

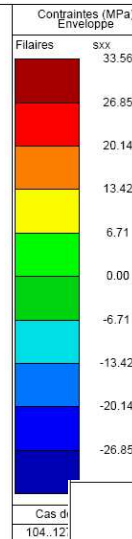
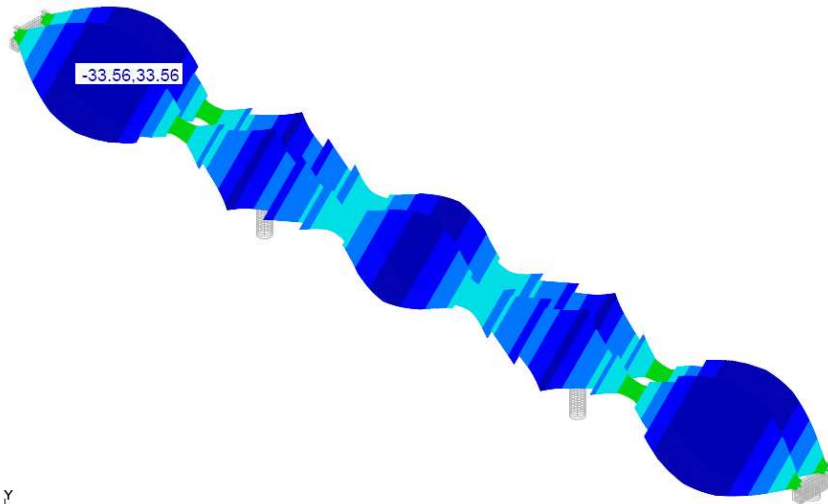
Un ferrailage composé de 16HA32 (0,18% de l'aire de béton) répartis à la périphérie du fût serait suffisant pour reprendre ces efforts.



### Moment de flexion Mz

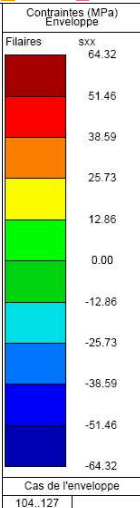
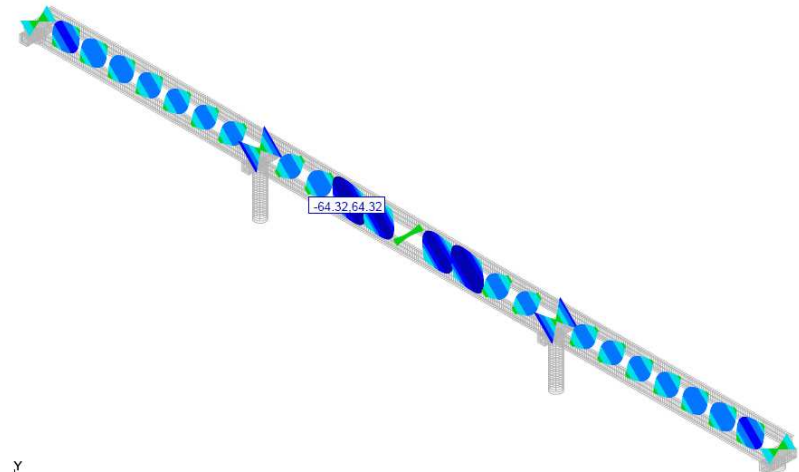
# Vérifications sous séisme

## Charpente métallique (contraintes sous séisme seul)



**Poutres principales**

$\Delta\sigma < 34\text{MPa}$   
Variation très faible.



$\Delta\sigma < 65\text{MPa}$   
Solicitation significative mais les entretoises ne sont pas sollicitées sous charges permanentes.

**Entretoises**



# Vérifications sous séisme

## Appareils d'appui

Une vérification complète des appareils d'appuis montre que les appareils d'appuis dimensionnés vis-à-vis des charges de service résistent aux sollicitations sismiques.

**Seules les vérifications vis-à-vis du non-glissement ne sont pas satisfaites et nécessitent d'équiper tous les appareils d'appuis de dispositifs anti-cheminement en partie supérieure et inférieure.**

La combinaison utilisée pour la vérification des appareils d'appuis (isolateurs sismiques) doit tenir compte d'un coefficient de majoration des déplacements de calcul de chaque isolateur  $\gamma_{IS}=1,5$  (cf. NF EN 1998-2, §7.6.2) pour augmenter la fiabilité requise pour ces derniers.

Même si l'eurocode n'est pas explicite à ce sujet, nous appliquerons ce coefficient uniquement sur les déplacements (et les efforts) horizontaux des appareils d'appui, qui correspondent à la direction selon laquelle les appareils d'appuis jouent un rôle d'isolation sismique (partielle).

Les appuis en élastomère fretté utilisé étant à faible amortissement, ces derniers sont vérifiés conformément à la norme NF EN 1337-3 en tenant compte des indications fournies aux articles 7.6.2(5) et (6) de la NF EN 1998-2.

# Vérifications sous séisme

## Appareils d'appui

Les notations sont les suivantes :

### ✓ Efforts et déformations du néoprène :

$F_X$ ,  $v_X$ ,  $\alpha_X$  respectivement effort, déplacement et rotation selon l'axe X

$$\begin{cases} F_Z = F_{Z Gk} + F_{Z AEd} + 0,5 F_{Z Tk} \\ F_X = \gamma_{IS} \times F_{X AEd} + 0,5 \times v_{X Tk} \times k_{h stat} \\ F_Y = \gamma_{IS} \times F_{Y AEd} \end{cases} \quad \text{avec } k_{h stat} = \frac{A \cdot G_{d stat}}{T_q}$$

$$\begin{cases} v_X = \gamma_{IS} \times F_{X AEd} / k_{h sism} + 0,5 \times v_{X Tk} \\ v_Y = \gamma_{IS} \times F_{Y AEd} / k_{h sism} \end{cases} \quad \text{avec } k_{h sism} = \frac{A \cdot G_{d sism}}{T_q}$$

$$\begin{cases} \alpha_X = \alpha_{X AEd} \\ \alpha_Y = \alpha_{Y Sdiff} + \alpha_{Y AEd} + 0,5 \times \alpha_{Y Tk} \pm 0,003 \quad \text{où } 0,003rd \text{ défaut de pose} \end{cases}$$

### ✓ Caractéristiques de l'appui 700 x 800 ; 4 (16 + 5) ; 2 x 8 :

$$a = 0,7 \text{ m}$$

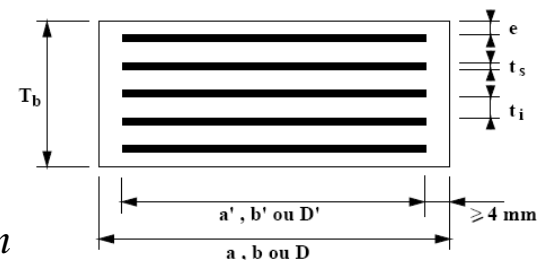
$$b = 0,8 \text{ m}$$

$$a' = 0,7 - 2 \times 0,005 = 0,69 \text{ m}$$

$$A' = a' \cdot b' = 0,5451 \text{ m}$$

$$b' = 0,8 - 2 \times 0,005 = 0,79 \text{ m}$$

$$T_e = T_q = 4 \times 0,016 + 2 \times 0,008 = 0,08 \text{ m}$$



# Vérifications sous séisme

## Appareils d'appui

Les vérifications des appareils d'appui portent sur :

### ✓ *Limitation de la distorsion totale :*

On vérifie que :  $\varepsilon_t = K_L (\varepsilon_c + \varepsilon_q + \varepsilon_\alpha) \leq 7$

(NF EN 1998-2, §7.6.2(5) et NF EN 1337-2, §5.3.3)

Avec :

$$K_L = 1 \quad (\text{NF EN1998-2 §7.6.2(5)})$$

$$\varepsilon_c = \frac{1,5 \cdot F_Z}{G \cdot A_r \cdot S} \quad (\text{NF EN 1337-3, §5.3.3.2})$$

$$\text{Où : } A_r = A' \times \left( 1 - \frac{|v_X|}{a'} - \frac{|v_Y|}{b'} \right) \quad \text{et} \quad S = \frac{A'}{l_p \cdot t_e}$$

$$\varepsilon_q = \frac{\sqrt{v_X^2 + v_Y^2}}{T_q} \quad (\text{NF EN 1337-3, §5.3.3.3})$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{(a'^2 \cdot |\alpha_Y| + b'^2 \cdot |\alpha_X|) \times t_i}{2 \sum t_i^3} \quad (\text{NF EN 1337-3, §5.3.3.4})$$

# Vérifications sous séisme

## Appareils d'appui

### ✓ Limitation de la distorsion due à l'effort horizontal :

On vérifie que :  $\varepsilon_q \leq 2$  (NF EN 1998-2, §7.6.2(6))

### ✓ Epaisseur des frettes :

Pour un appareil d'appui sans alvéoles (non percé), dont les feuilletts sont d'épaisseur constante  $t_i$ , l'épaisseur minimale  $t_s$  des frettes s'obtient à partir de la formule :

$$t_s = \gamma_m \frac{2,6 \cdot F_Z \cdot t_i}{A_r \cdot f_y} \quad \& \quad t_s \geq 2 \text{ mm} \quad (\text{NF EN 1337-3, §5.3.3.5})$$

### ✓ Condition limite en rotation :

La stabilité en rotation de l'appareil d'appui est vérifiée si :

$$\sum v_z \geq \frac{a' \cdot |\alpha_y| + b' \cdot |\alpha_x|}{K_r} \quad (\text{NF EN 1337-3, §5.3.3.6})$$

Avec :  $K_r = 3$  (NF EN 1337-3, Annexe B)



# Vérfications sous séisme

## Appareils d'appui

### ✓ *Stabilité au flambement :*

La justification de la stabilité au flambement exige de vérifier la condition :

$$\frac{F_Z}{A_r} \leq \frac{2 \cdot G \cdot a' \cdot S_1}{3 \cdot T_e}$$

### ✓ *Condition de non-glissement :*

On doit vérifier que :

$$\begin{cases} F_{XY} \leq \mu_e \cdot F_Z \\ \sigma_m \geq 3 \text{ MPa} \quad \text{avec} \quad \sigma_m = \frac{F_Z}{A'} \end{cases}$$

(NF EN 1337-3, §5.3.3.6 et remarque suivante)

Contrairement à ce qui est indiqué dans la NF EN 1337-3, la seconde vérification n'est pas à vérifier avec les charges permanentes seules mais avec la combinaison sismique la plus défavorable (NF EN 1998-2, §7.6.2(5)).

Avec :  $\mu_e = 0,1 + \frac{K_f}{\sigma_m} \quad \text{avec} \quad \sigma_m = \frac{F_Z}{A_r}$

où :  $K_f = 0,6$  pour un contact de l'appareil d'appui avec du béton

# Vérfications sous séisme

## Appareils d'appui

### ✓ *Stabilité au flambement :*

La justification de la stabilité au flambement exige de vérifier la condition :

$$\frac{F_Z}{A_r} \leq \frac{2 \cdot G \cdot a' \cdot S_1}{3 \cdot T_e}$$

### ✓ *Condition de non-glissement :*

On doit vérifier que :

$$\begin{cases} F_{XY} \leq \mu_e \cdot F_Z \\ \sigma_m \geq 3 \text{ MPa} \quad \text{avec} \quad \sigma_m = \frac{F_Z}{A'} \end{cases}$$

(NF EN 1337-3, §5.3.3.6 et remarque suivante)

Contrairement à ce qui est indiqué dans la NF EN 1337-3, la seconde vérification n'est pas à vérifier avec les charges permanentes seules mais avec la combinaison sismique la plus défavorable (NF EN 1998-2, §7.6.2(5)).

Avec :  $\mu_e = 0,1 + \frac{K_f}{\sigma_m} \quad \text{avec} \quad \sigma_m = \frac{F_Z}{A_r}$

où :  $K_f = 0,6$  pour un contact de l'appareil d'appui avec du béton

# Vérifications sous séisme

## Joint de chaussée

Le souffle des joints de chaussée peut être déterminé de telle manière à respecter la relation fournie à l'article 2.3.6.3 de la NF EN 1998-2 :

$$d_{Ed} = d_E + d_G + \psi_2 \cdot d_T$$

Où :

$d_E$  est le déplacement sismique de calcul,

$d_G$  est le déplacement différé dû aux actions permanentes et quasi-permanentes,

$d_T$  est le déplacement dû aux mouvements thermiques,

$\psi_2 = 0,5$  (Tableau A2.1 de la NF EN 1990/A1)

Le déplacement sismique longitudinal obtenu en tenant compte de la fissuration des fûts des appuis est :

$$d_E = \pm 9,0 \text{ cm}$$

En négligeant les effets des déformations différées et de retrait, on obtient un souffle sismique total de :

$$d_{Ed} = 18,0 + 0,5 \times 7,7 = 21,9 \text{ cm}$$

# Vérifications sous séisme

## Butées parasismiques

La justification des appareils d'appui a montré que sous séisme transversal et avec application du coefficient  $\gamma_{IS}=1,5$ , les appareils d'appui dimensionnés en service résistaient aux sollicitations sismiques, **il n'est donc pas indispensable de recourir à des butées parasismiques de sécurité.**

Néanmoins, si ces dernières s'avéraient utiles, il conviendrait de déterminer leur position de telle manière à **profiter au maximum de l'isolation conférée par les appareils d'appui en exploitant leur capacité maximale de déformation.**

Ainsi, le jeu disponible au niveau des butées est déterminé en fonction des appareils d'appui en veillant à ne pas le surestimer de manière inutile afin de limiter les effets de choc provenant de la mise en mouvement du tablier.

*Merci de votre attention*

---

Des questions ?

