

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

Exemples de calculs sismiques : *Cas d'un pont portique*

Arnold BALLIERE
CETE Méditerranée



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

- **Méthode générale de calculs**
- Exemple d'un portique



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Généralités

- **Portiques** (et ponts-cadres) :
 - fonctionnement mécanique faisant intervenir une *forte interaction sol/structure*
 - *OA peu sensibles aux séismes*
 - OA souples
 - suivent la déformation du massif
- justification parasismique néanmoins nécessaire
- Méthode du guide EC8-Sétra (à paraître) « similaire » au guide « rouge » (Ponts courants en zone sismique – guide conception – Sétra-SNCF – janvier 2000)
- utilisation d'une **analyse pseudo-statique**
 - hypothèses simplistes mais en accord avec les EC et les publications sur le sujet



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Méthode générale

1- Données du projet :

- zone de sismicité → **a_{gr}**
- catégorie d'ouvrage → γ
- classe de sol → **S**
- coefficient de comportement → **q=1** (la plupart des cas : remblais adjacents considérés comme raides du fait du compactage)
 - pas d'amplification spectrale
- coefficient d'amplification topographique **S_T** (éventuellement)
- durée de vie de l'ouvrage



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Méthode générale

2- Représentation de l'action sismique :

- forces statiques horizontales et verticales égales au produit des forces gravitaires par un coefficient sismique : k_h et k_v (concomitant)

→ valeurs de l'EC8-5 (OA de soutènements non déplaçables) :

$$k_h = \frac{a_g S}{g} \quad \text{et} \quad k_v = 0,5k_h$$

(prise en compte du coefficient d'amplification topographique S_T éventuellement)

Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Méthode générale

3- Combinaisons d'actions :

- format de la combinaison sismique :

$$G_k + E_{Ed} + \Psi_{21} Q_{1k}$$

G_k : charges permanentes (poids propre et poussée statique des terres)

E_{Ed} : action sismique (forces d'inertie et poussée dynamique des terres)

Q_{1k} : action variable des charges d'exploitation

Ψ_{21} : coefficient de combinaison



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Méthode générale

3- Combinaisons d'actions (suite) :

- coefficient de combinaison Ψ_{21} :
 - 0 : la plupart des cas (OA peu sollicités)
 - 0,2 : charges routières (OA urbains à trafic intense = classe 1 de l'EC1-2)
 - 0,3 charges ferroviaires

- composantes de l'action sismique E_{Ed} :

$$E = \pm E_1 \pm 0,3 E_2 \pm 0,3 E_3$$

où E1, E2 et E3 représentent alternativement chacune des 2 composantes horizontales perpendiculaires (longitudinale et transversale) et la composante verticale du mouvement sismique

Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Méthode générale

4- Vérifications :

4.1- vérification de la **résistance des sections** :

- Sollicitations normales (flexion) :

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \left(\frac{f_{ck}}{1,3}, \frac{f_{yk}}{1,0} \right)$$

- Sollicitations tangentes :

$$q \cdot V_{Ed} \leq \frac{1}{\gamma_{Bd1}} V_{Rd} \left(\frac{f_{ck}}{1,3}, \frac{f_{yk}}{1,0} \right)$$

$\gamma_{Bd1} = 1,25$

4.2- vérification du **sol de fondations**

4.3- **dispositions constructives** parasismiques

Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

Sollicitations verticales :

- Application aux parties de l'ouvrage, et aux masses solidaires, de l'accélération verticale

→ force d'inertie par unité de volume (pour un élt de poids vol. γ) :

$$f_i = \pm \gamma k_v$$

- Frottement des terres en contact avec les pénédroits négligé



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

Sollicitations horizontales :

→ 2 méthodes (EC8-2 [6.7.4]) :

1- **Approche en déformation** : ouvrages enterrés

2- **Approche en force** : ouvrages proches de la surface



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

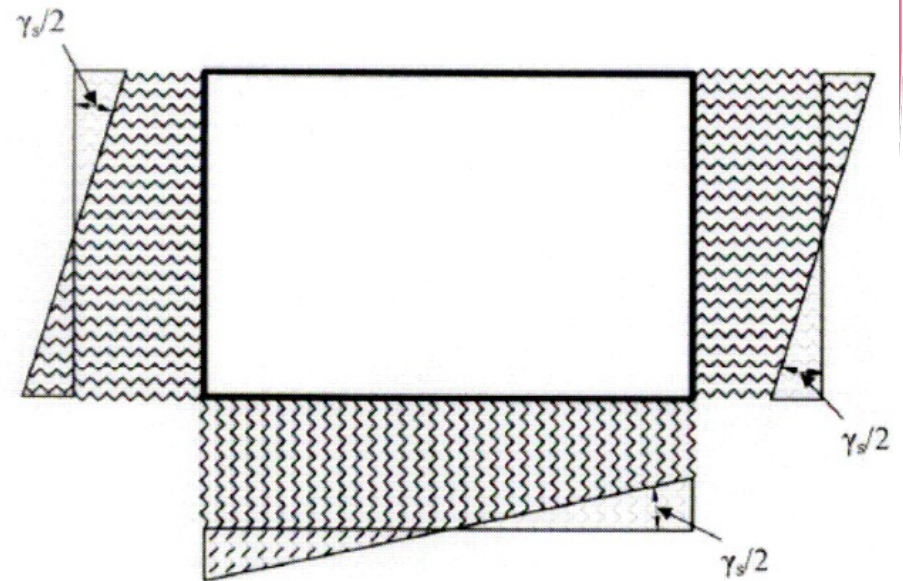
Sollicitations horizontales :

1- Approche en déformation :

Déformation de l'OA = déformation sismique du sol en champ libre

$$\gamma_s = \frac{v_g}{v_s} = \frac{ST_c a_g}{2\pi v_s}$$

- T_c : période du spectre
- V_g : vitesse maximale du sol
- V_s : célérité de l'onde de cisaillement dans le sol (peut être évaluée à partir de $V_{s,max}$ mesurée pour les faibles déformations)



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

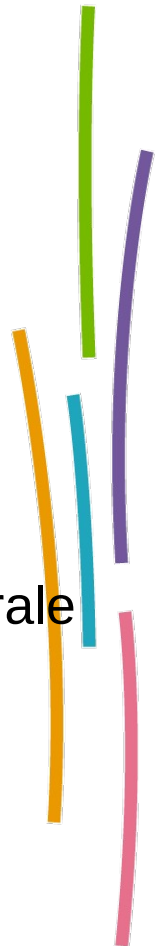
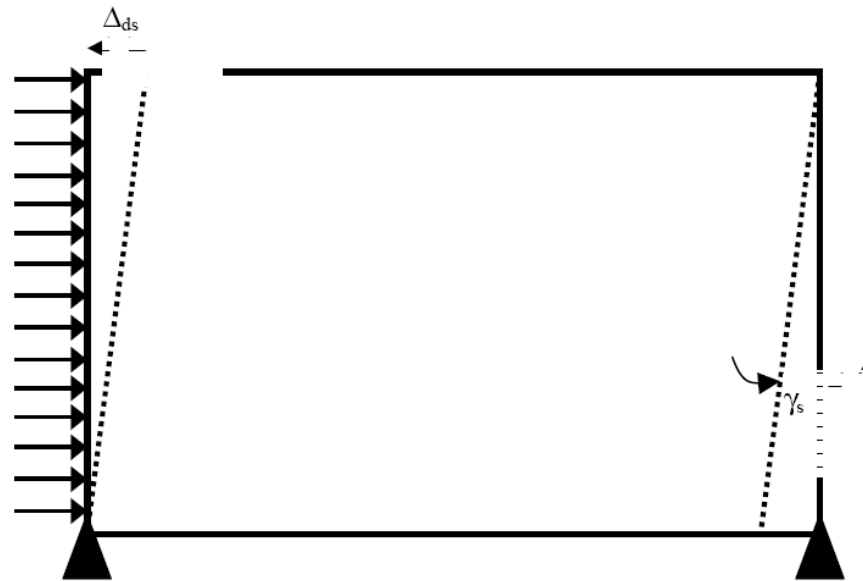
Sollicitations dues au séisme

Sollicitations horizontales :

1- Approche **en déformation** :

Modélisation : application d'une pression uniforme sur la paroi latérale telle que

$$\Delta d_s : H. \gamma_s$$

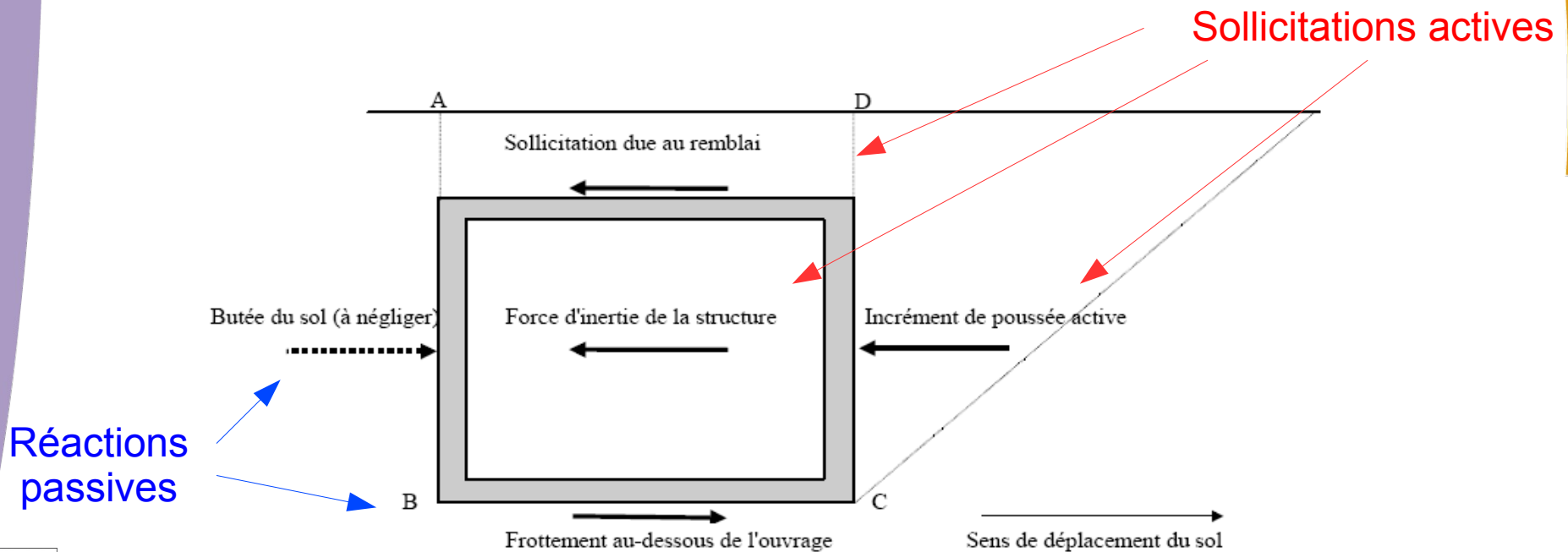


Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

Sollicitations horizontales :

2- Approche **en force** : ouvrages proches de la surface



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

Sollicitations horizontales :

2- Approche **en force** : ouvrages proches de la surface

- **Force d'inertie** de la structure : $f_i = \gamma k_h$ (force par unité de vol.)
- **Force dynamique** agissant sur l'ouvrage

→ incrément dyn. de poussée active sur un écran de hauteur H

$$\Delta E_d = E_d - E_0 = \frac{1}{2} \gamma^* H^2 [(1 \pm k_v) K_{ad}] + E_{ws} + E_{wd} - \frac{1}{2} \gamma^* K_{as} H^2$$

(Mononobe-Okabe)

γ^* poids volumique du sol tenant compte des conditions hydrauliques

K_{ad} coefficient de poussée des terres sous situations de projet sismiques

K_{as} coefficient de poussée des terres sous charges statiques

E_{ws} poussée statique de l'eau

E_{wd} poussée hydrodynamique de l'eau

Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

Sollicitations horizontales :

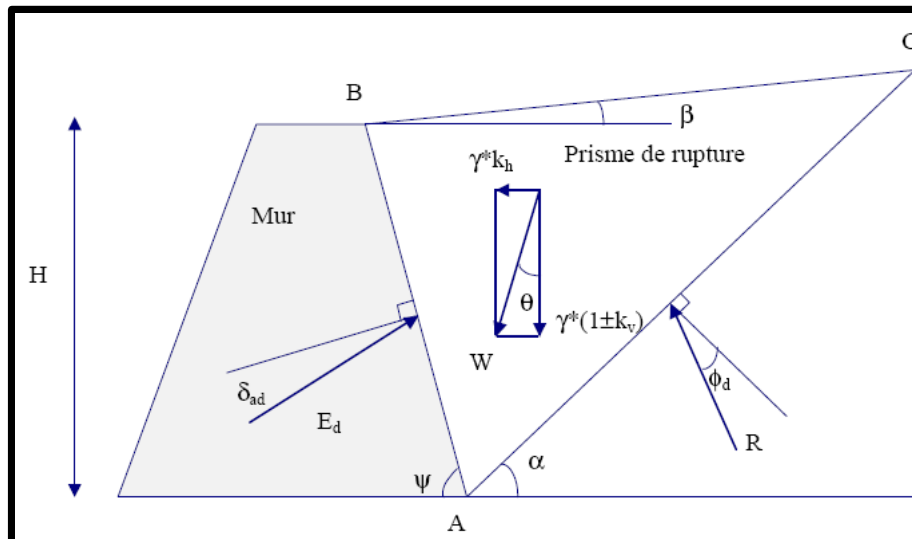
2- Approche **en force** : ouvrages proches de la surface

si $\beta \leq \phi_d - \theta$:

$$K_{ad} = \frac{\sin^2(\psi + \phi_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_{ad}) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_d + \delta_{ad}) \sin((\phi_d - \beta - \theta))}{\sin(\psi - \theta - \delta_{ad}) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

et si $\beta > \phi_d - \theta$:

$$K_{ad} = \frac{\sin^2(\psi + \phi_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_{ad})}$$



$$\phi_d = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{1,25}\right)$$

$$\delta_{ad} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \delta_a}{\gamma_\phi}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \delta_a}{1,25}\right)$$

Nappe au-dessous du mur	Sol sous nappe imperméable	Sol sous nappe très perméable
$\gamma^* = \gamma$	$\gamma^* = \gamma_{sat} - \gamma_w$	$\gamma^* = \gamma_{sat} - \gamma_w$
$\tan \theta = \frac{k_h}{1 \pm k_v}$	$\tan \theta = \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} \frac{k_h}{1 \pm k_v}$	$\tan \theta = \frac{\gamma_d}{\gamma - \gamma_w} \frac{k_h}{1 \pm k_v}$
$E_{wd} = 0$	$E_{wd} = 0$	$E_{wd} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H^2$

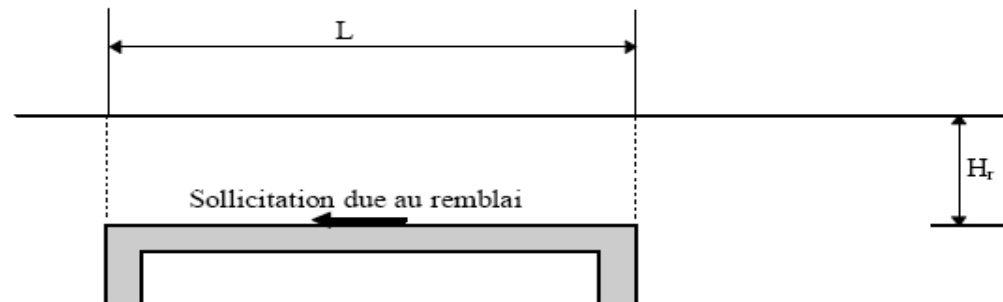
Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

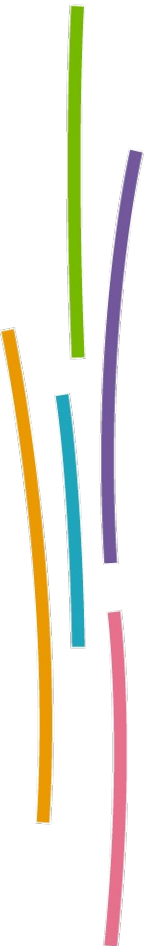
Sollicitations horizontales :

- 2- Approche **en force** : ouvrages proches de la surface
- **Effet du remblai** sur la traverse

- $H_r < 1 \text{ m}$:



$$S_r = H_r L \gamma k_h \quad (\text{Force d'inertie du remblai appliquée à la traverse})$$



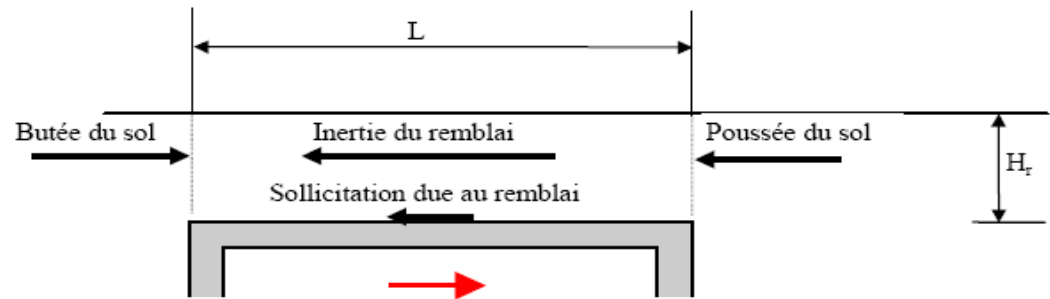
Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

Sollicitations horizontales :

- 2- Approche **en force** : ouvrages proches de la surface
- **Effet du remblai** sur la traverse

- H_r > 1 m :



$$S_r = \frac{1}{2} \gamma H_r^2 (K_{ad} - K_{pd}) + \gamma k_h H_r L \quad (\text{Sollicitation de l'ouvrage provenant du remblai})$$

Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

Sollicitations dues au séisme

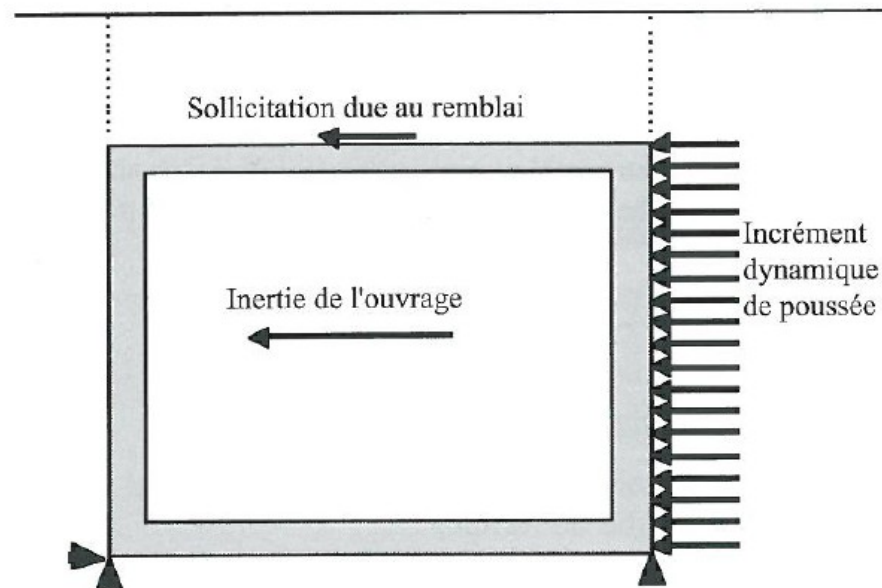
Sollicitations horizontales :

2- Approche **en force** : ouvrages proches de la surface

- **Butée** (Incrément dynamique de poussée passive)
- **Frottement** sol/semelles

Négligés !

Modélisation :



Exemples de calculs sismiques : cas d'un pont portique

- Méthode générale de calculs
- **Exemple d'un portique**





Mardi 27 mars 2012
Lundi 2 et mardi 3 avril 2012

CETE Méditerranée, Aix-en-Provence

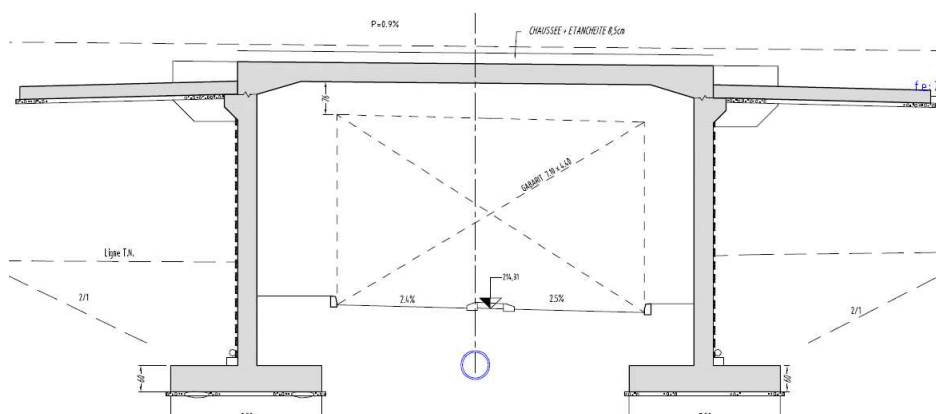
Journées techniques
organisées avec l'appui du Sétra
et sous l'égide de la CoTITA

PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

Exemples de calculs sismiques Cas d'un portique (corrigé)

A. Ballière

I- OUVRAGE SUPPORT



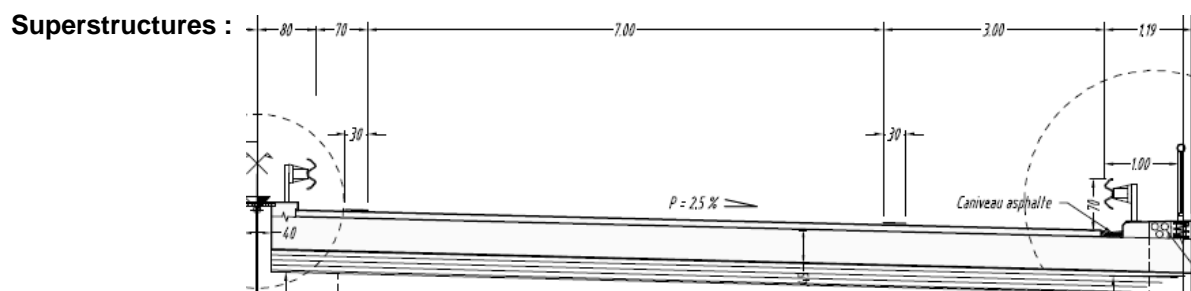
PIPO construit dans le département de l'Allier (03)
Franchissement d'une voie communale par une RN à 2x2 voies

Biais : 100 gr

Géométrie :

- semelles : 3,5 x 0,6
- piédroits : 6,55 x 0,45
- traverse : 10,40 (ouverture) x 0,45
- largeur : 12,5 m

- h_terre_int : 1,80 m



- chape : 0,03 m
- enrobés : 0,08 m
- longrine + GS en TPC
- longrine + GS + GC8 en rive soit **54 kN/ml**

Surcharges : - classe 2 au sens de l'EC1-2 W = 10,7 m
- Mc120

Sol de fondation : - calcaire (contrainte de rupture = 4,95 MPa ; $E_m = 300 \text{ MPa}$)
- classe de sol : B
- module surfacique $K_v = 802 \text{ MPa}$ ($K_i = 2 \times K_v$)

(Ouvrage calculé en statique avec Chamois)

II- OBJECTIFS

1. Définir les données sismiques de l'étude
2. Définir et déterminer les actions appliquées à la structure en cas de séisme
(on se limite aux actions longitudinales et verticales)

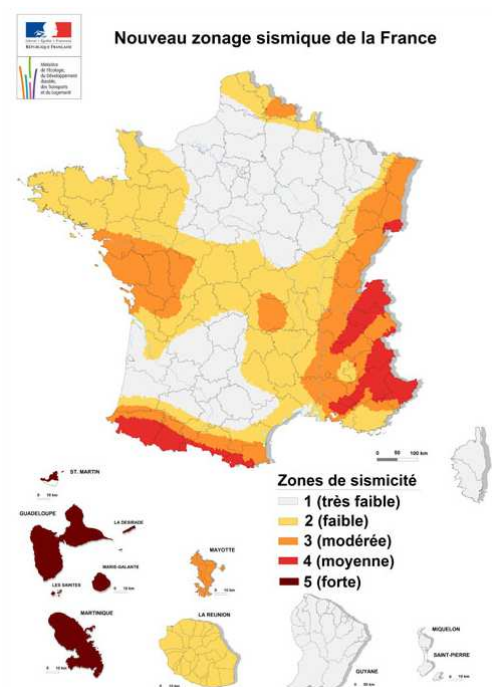
Résultats préalables

- Zone de sismicité :



Département : **Allier**
 Zone de sismicité : **2** (faible)

accélération au rocher, agr = **0,7** m/s²



- Catégorie d'importance :

Catégorie d'importance de l'ouvrage : **II** (pont du domaine public mais ni III, ni IV)

Coefficient d'importance associé, γ_I : **1,0**

- Classe de sol :

Classe de sol : **B**

Paramètre de sol S : **1,35**

- Nature du relief :

Coefficient d'amplification topographique S_T : **1,00**

Représentation de l'action sismique

Accélération horizontale de calcul au rocher, a_g = **0,70** m/s² (agr x γ_I)

Coefficient sismique horizontal, K_h = **0,096** (agr x S x S_T / g)

Coefficient sismique vertical, K_v = **0,048** (0,5 x K_h)

Combinaison d'action et méthode

$$G_k + E_{Ed} + \Psi_{21} Q_{1k}$$

Gk : charges permanentes (P.P + poussée statique des terres) → résultats Chamois

Eed : forces d'inertie + poussée dynamique des terres

$$E = \pm E_1 \pm 0,3 E_2 \pm 0,3 E_3$$

--> on se limite à la recherche des composantes horizontale et verticale (alternativement E1 et E2)

$\Psi_{21} =$ 0,0 (ouvrage routier non urbain à trafic intense)

Ouvrage sans remblai sur la traverse → Approche : En force

Sollicitations verticales

$$\text{Forme générale : } f_i = \pm \gamma k_v$$

Application de l'accélération aux diverses parties de l'ouvrage :

	larg (m)	Ep (m)	long (m)	γ (kN/m ³)	Kv	Ftot (+/-) kN
- Traverse :	12,50	0,45	11,30	25	0,048	76,5
- Piédroit 1	12,50	0,45	6,55	25	0,048	44,4
- Piédroit 2	12,50	0,45	6,55	25	0,048	44,4
- Semelle 1	3,50	0,60	12,50	25	0,048	31,6
- Semelle 2	3,50	0,60	12,50	25	0,048	31,6

Application de l'accélération aux masses solidaires de l'ouvrage :

	larg (m)	Ep (m)	long (m)	γ (kN/m ³)	Kv	Ftot (+/-) kN
- superstr.			11,30	(54 kN/ml)	0,048	29,4
- Terre ext sem1	1,525	7,00	12,50	20	0,048	128,5
- Terre ext sem2	1,525	7,00	12,50	20	0,048	128,5
- Terre int sem1	1,525	1,80	12,50	20	0,048	33,1
- Terre int sem2	1,525	1,80	12,50	20	0,048	33,1

Le frottement des terres avec les piédroits est négligé

Sollicitations horizontales

Force d'inertie de la structure $f_i = \gamma k_h$

	larg (m)	Ep (m)	long (m)	γ (kN/m ³)	Kh	Ftot (+/-) kN
- Traverse :	12,50	0,45	11,30	25	0,096	153,1
- superstr.			11,30	(54 kN/ml)	0,096	58,8
- Piédroit 1	12,50	0,45	6,55	25	0,096	88,7
- Piédroit 2	12,50	0,45	6,55	25	0,096	88,7
- Semelle 1	3,50	0,60	12,50	25	0,096	63,2
- Semelle 2	3,50	0,60	12,50	25	0,096	63,2

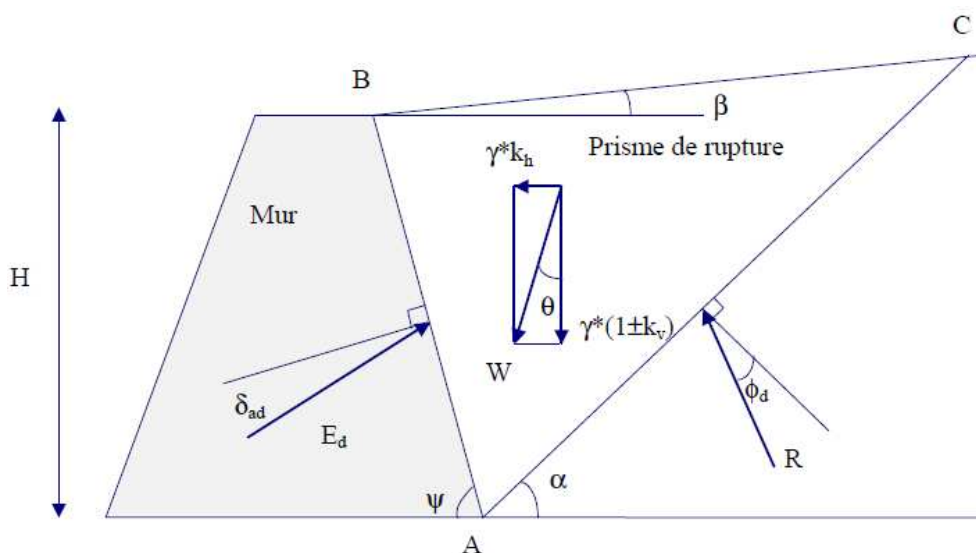
Force dynamique agissant sur l'ouvrage

$$\Delta E_d = E_d - E_0 = \frac{1}{2} \gamma^* H^2 [(1 \pm k_v) K_{ad}] + E_{ws} + E_{wd} - \frac{1}{2} \gamma^* K_{as} H^2$$

Sur-poussée = Poussée dyn globale (statiques + Dyn) - poussée statique

Calcul du coefficient de poussée dynamique active Kad :

$$K_{ad} = \frac{\sin^2(\psi + \phi_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_{ad}) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_d + \delta_{ad}) \sin(\phi_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_{ad}) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$



Hypothèses :

- écran vertical $\Psi = 90^\circ$
- sol horizontal $\beta = 0^\circ$
- angle de frottement sol/écran nul $\delta_{ad} = 0^\circ$

PIPO_Seisme_Corrige

$$\tan \theta = \frac{k_h}{1 \pm k_v} \quad \theta = \boxed{5,3}^\circ \text{ ou } \boxed{5,8}^\circ$$

$$\phi_d = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{1,25}\right) \quad \text{d'où } \Phi_d = \boxed{24,0}^\circ$$

Kad = $\boxed{0,487}$ (séisme descendant)
 $\boxed{0,495}$ (séisme ascendant)

Calcul de la sur-poussée (incrément dynamique)

$(1+Kv).Kad = \boxed{0,518}$ $(1+Kv).Kad - Kas = \boxed{0,185}$
 $(1- Kv).Kad = \boxed{0,511}$ $(1- Kv).Kad - Kas = \boxed{0,178}$

$\gamma^* = \boxed{20}$ kN/m³
 $H = \boxed{7,60}$ m (*hsemelle+hpiédroit+htraverse*)
 $Kas = \boxed{0,333}$ (*poussée des terres sur écran en statique*)
 $L = \boxed{12,5}$ m (*largeur piédroit*)

$\Delta E_d = \boxed{1339}$ kN

Extrait guide EC8 à paraître :

En l'absence d'une étude plus détaillée prenant en compte la rigidité relative du mur, le type de mouvement et la masse relative de l'ouvrage, le point d'application de la « sur-poussée » dynamique des terres (différence entre la poussée dynamique globale et la poussée statique) doit être pris à mi hauteur. Pour les murs qui peuvent tourner librement autour de leur base, le point d'application de la « sur-poussée » dynamique des terres peut être pris égal à celui de la poussée statique des terres ;