

Prise en compte des dispositifs antisismiques dans les calculs ouvrages d'art sous séisme

Aurélie Vivier⁽¹⁾, Denis Davi⁽²⁾

1. - Introduction

L'Eurocode 8 relatif au calcul des structures pour leur résistance aux séismes exige que les structures répondent aux exigences de non-effondrement, de fonctionnalité d'urgence et de réparabilité sous l'effet d'un séisme de référence. Pour répondre à ces exigences, l'Eurocode 8-2 spécifique aux ponts propose trois types de conception des ouvrages d'art : la conception élastique, la conception ductile ou la conception basée sur les principes d'isolation sismique et d'amortissement. Avant de présenter en détail le troisième type de conception qui fait l'objet de cet article, ce chapitre introductif rappelle sommairement les avantages et inconvénients des différentes conceptions parasismiques.

La conception élastique consiste à dimensionner la structure de façon à ce que les matériaux constitutifs restent dans leur domaine de comportement élastique. Aucune réparation post-sismique n'est en principe à prévoir. Avantageuse dans les zones peu sismiques, cette conception s'avère généralement techniquement impossible ou d'un coût prohibitif dans les régions où le risque sismique est plus élevé. La notion de ductilité limitée élargit cette conception au delà du comportement idéalement élastique en autorisant des incursions limitées dans le domaine plastique des matériaux (typiquement, on observe que ces incursions limitées correspondent à peu près aux limites conventionnelles ELU au sens du BAEL, soit 3,5% pour le béton et 10% pour l'acier).

La conception ductile consiste au contraire à autoriser de larges incursions répétées et alternées (phénomène cyclique) dans le domaine plastique des matériaux dans certaines parties de l'ouvrage afin de dissiper de l'énergie et diminuer les niveaux d'efforts transmis au reste de la structure. Cela conduit à mettre en œuvre des dispositions constructives contraignantes dans les zones de dissipation d'énergie. Il convient de noter qu'un certain niveau d'endommagement est ici admis, car il optimise la réponse dynamique de la structure (par assouplissement et mécanisme dissipatif par hystérésis), mais peut conduire à des travaux de réparation suite à un tremblement de terre majeur.

Enfin, le troisième type de conception est basé sur le principe d'isolation sismique et l'utilisation de dispositifs antisismiques dissipateurs d'énergie. La quasi-totalité de l'énergie du tremblement de terre est filtrée par les isolateurs ou absorbée dans des dispositifs dissipateurs tandis que les

¹ Sétra/CTOA/DGO

² CETE Méditerranée/DCEDI/DOA

éléments structuraux de l'ouvrage ne subissent en théorie aucun dégât, les matériaux constitutifs restant dans leur domaine élastique de comportement. En cas de séisme majeur, les dispositifs sont facilement inspectés et remplacés si nécessaire. En contrepartie, les calculs de dimensionnement sont complexes. Enfin, le coût et l'entretien des dispositifs antisismiques et la difficulté des calculs associés réservent généralement leur utilisation aux zones où l'aléa sismique est important et/ou aux ouvrages à caractère exceptionnel en termes de dimensions ou d'enjeu socio-économiques.

Dans cet article, nous présenterons les différents types de dispositifs antisismiques ainsi que les méthodes d'analyse correspondantes, issues de l'EC8-2 ou extraites de la littérature scientifique spécialisée. Nous insisterons notamment sur les méthodes de calcul simplifiées et de prédimensionnement et nous effectuerons une comparaison avec des méthodes plus sophistiquées. Enfin nous donnerons quelques recommandations pour la mise en œuvre pratique des dispositifs antisismiques sur les ouvrages. Cet article ne présente que les méthodes relatives au dimensionnement des dispositifs. Pour l'analyse globale des ouvrages, il conviendra de se référer aux guides Sétra à paraître «Ponts en zone sismique – Guide de conception» pour les ouvrages neufs et «Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants» pour les ouvrages existants ou encore au guide Sétra/AFPS, également à paraître, « Dispositifs antisismiques pour les ponts ».

2. - Dispositifs courants

Les dispositifs antisismiques ont pour but d'absorber une partie de l'énergie transmise par le séisme à la structure. Ainsi, la part transmise aux éléments structurels et dissipée sous forme d'endommagement s'en trouve réduite, les matériaux restant dans leur domaine élastique de comportement. Il existe différents types de dispositifs antisismiques utilisables en ouvrages d'art, que ce soit pour la conception des ouvrages neufs ou le renforcement des ouvrages existants. Ces dispositifs peuvent avoir des comportements bien distincts, mais leur objectif est généralement similaire, et consiste d'une part à filtrer la transmission des efforts horizontaux entre le tablier et les appuis (isolation sismique), et d'autre part à amortir les vibrations et déplacements sismiques engendrés. Les principaux types de dispositifs antisismiques sont décrits dans ce chapitre.

Nous rappelons que pour assurer le bon fonctionnement dans le temps de ces dispositifs, il convient de procéder à des opérations d'inspection et de maintenance périodiquement. Leurs caractéristiques mécaniques sont définies et garanties par des essais en laboratoire, selon les recommandations de la norme EN15129 «Dispositifs antisismiques». Quant aux éléments de dimensionnement, ils sont fournis à la fois dans l'Eurocode 8-2 et dans la norme EN15129.

2.1. - Dispositifs et lois de comportement

Un dispositif dissipateur est caractérisé dans le cas le plus général par la loi de comportement suivante :

$$F = F_0 + K \cdot X + C \cdot V^\alpha$$

avec :

F_0 : force seuil de déclenchement (effet fusible)

$K \cdot X$: fonction ressort pur : aucune dissipation d'énergie

$C \cdot V^\alpha$: fonction amortisseur pur : dissipation d'énergie sans rigidité

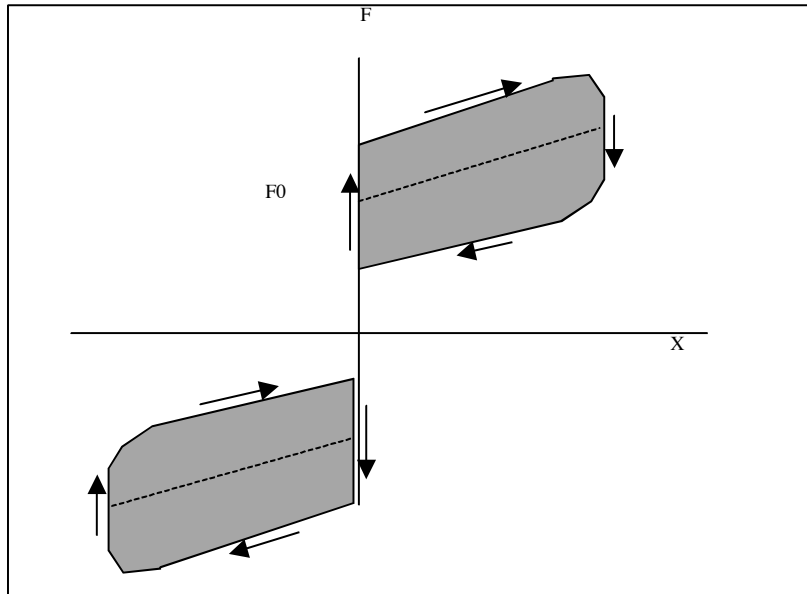
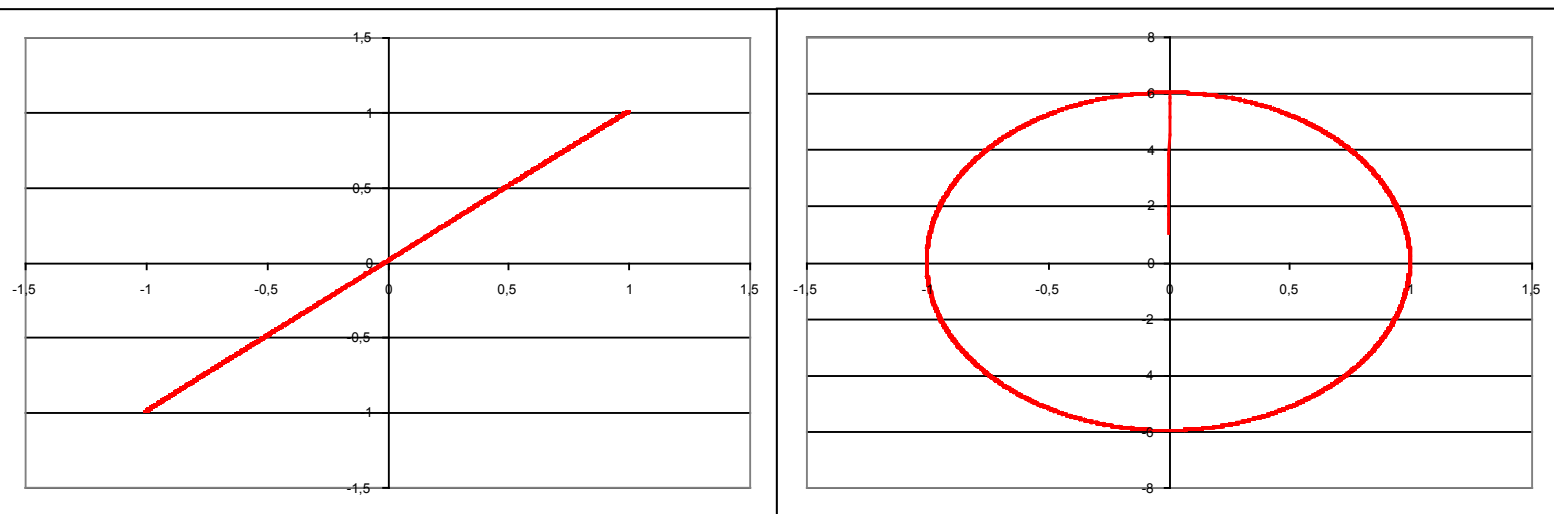


Figure 1 : Principe de fonctionnement des dispositifs sous sollicitations harmoniques



Effet de K seul : rigidité mais pas de dissipation d'énergie

Effet de C seul : dissipation d'énergie sans rigidité

Figure 2 : Loi de comportement des dispositifs sous sollicitations harmoniques

2.1.1. - Les appareils d'appui en élastomère

Les appareils d'appui en élastomère fretté sont composés de couches d'élastomère, renforcé par des frettes en acier. Il existe deux familles d'appareils d'appui en élastomère :

- les appareils d'appui à faible amortissement ($\xi \leq 0,06$), pour lesquels on ne tient compte que de leur raideur et non de leur fonction amortissement (appareils d'appui classiquement utilisés en situation non sismique).
- les appareils d'appui à fort amortissement ($\xi = 0,10$ à $0,20$), qui possèdent quant-à-eux un fort pouvoir amortissant.



Figure 3 : Exemple d'appareil d'appui en élastomère

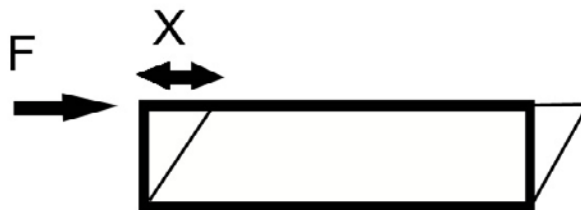
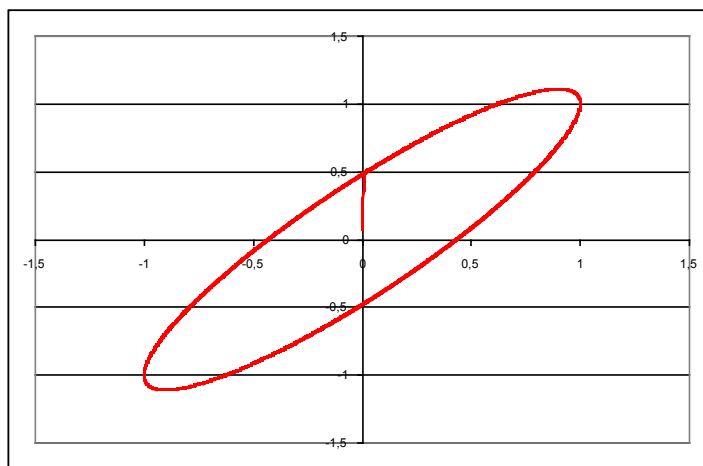


Figure 4 : Principe de fonctionnement des dispositifs



$$F = K \cdot x + C \cdot V$$

Figure 5 : Loi de comportement des appareils d'appui en élastomère sous sollicitations harmoniques

2.1.2. - Les dispositifs élastoplastiques

Ces dispositifs dissipateurs comportent une ou plusieurs pièces métalliques dont le rôle est d'absorber les efforts sismiques horizontaux et de dissiper l'énergie par plastification alternée du matériau. Ces éléments peuvent être combinés avec un appareil d'appui classique destiné à transmettre uniquement les charges verticales. Les appareils d'appui en élastomère fretté avec noyau de plomb entrent également dans cette catégorie.

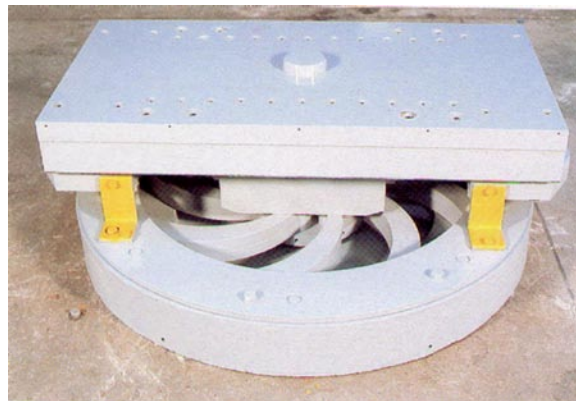
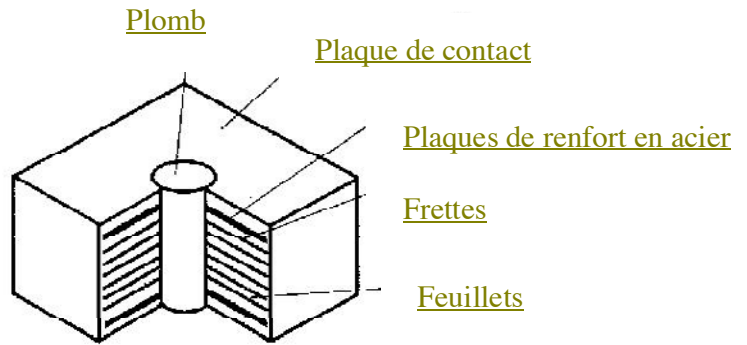
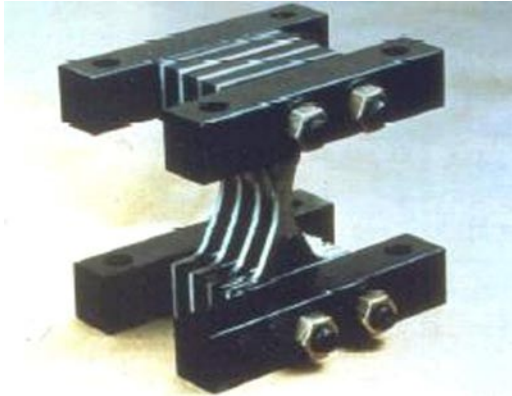
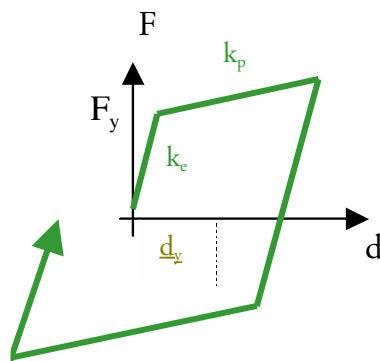


Figure 6 : Exemples de dispositifs élastoplastiques



$$F = -\text{signe}(V) Kx$$

avec $K = k_s$ si $F < F_y$
 $K = k_p$ si $F > F_y$

Figure 8 : Loi de comportement des dispositifs élastoplastiques
 Sources : Bechtel Corporation, FIP Industriale, Priestley et al.



Figure 9 : Exemple de dispositif à frottement

2.1.3. - Les dispositifs à frottement

Les dispositifs à frottement comportent deux surfaces de frottement en vis-à-vis soumises à un effort normal. Ils sont généralement combinés à un appareil d'appui disposant d'une raideur horizontale de façon à assurer le rôle de point fixe et un effet de recentrage. Les appareils d'appui glissants téflon-inox, largement utilisés dans le domaine des ponts pour libérer les déplacements de longue durée du tablier, sont des dispositifs isolateurs peu frottants.

Compte tenu du comportement non linéaire du système d'une part et de l'incertitude sur la valeur du coefficient de frottement en situation dynamique associée à des vibrations verticales d'autre part, la résistance horizontale des appareils glissants classiques est souvent négligée dans l'analyse. En revanche, certains dispositifs à coefficients de frottement volontairement élevés peuvent être utilisés en conception parasismique. La surface de contact peut en outre être incurvée de façon à augmenter la rigidité latérale et assurer la fonction de recentrage. Le glissement intervient lorsque la force sismique dépasse la résistance maximale développée par le frottement, ainsi une partie de l'énergie du séisme est dissipée sous forme de chaleur par phénomène de friction.

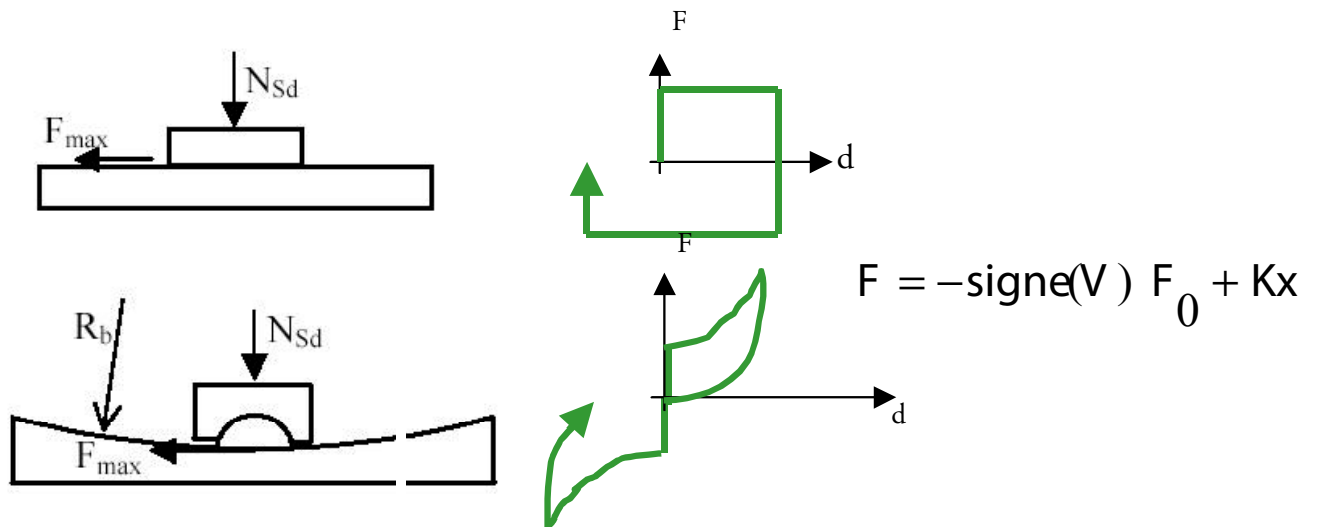


Figure 10 : Principe de fonctionnement des dispositifs

2.1.4. - Les amortisseurs visqueux

Ces dispositifs sont assimilables à des vérins «hydrauliques» à double effet et à forte capacité de dissipation d'énergie. Ils comportent couramment deux chambres remplies d'un fluide (huile hydraulique ou pâte silicone). Celles-ci sont reliées l'une à l'autre par des «soupapes» calibrées de façon à permettre des déplacements lents et une dissipation d'énergie générée par frottement visqueux du fluide sous l'effet du mouvement sismique (rapide).



Figure 12 : Exemples de dispositifs amortisseurs
Source : Jarret

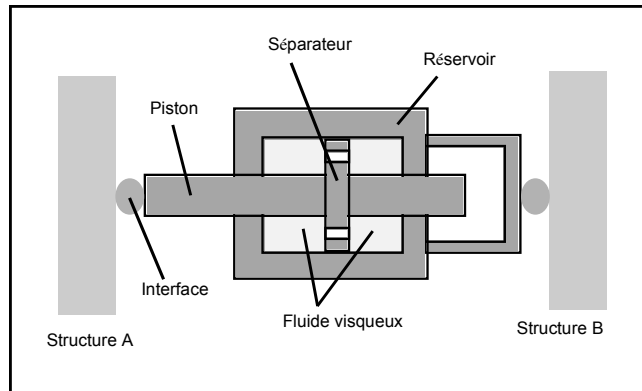


Figure 13 : Principe de fonctionnement des dispositifs
Source : Jarret

Réaction Amortisseur / Déplacement relatif du tablier

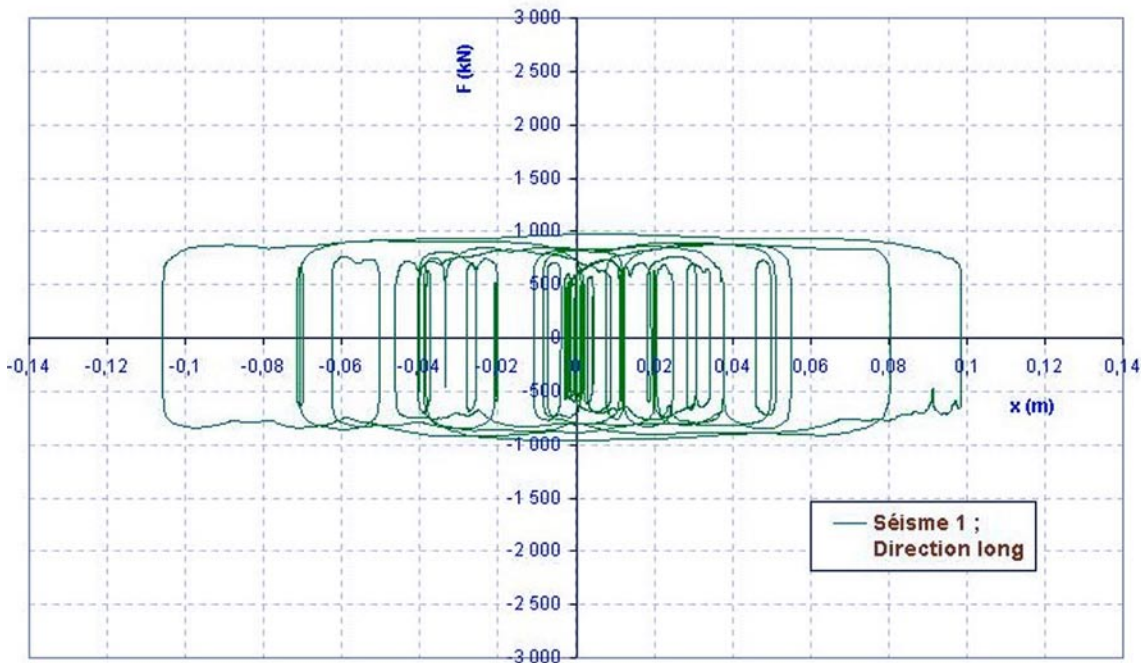


Figure 14 : Loi de comportement des amortisseurs visqueux



La relation entre la force d'amortissement F et la vitesse relative V peut s'écrire $F = CV^\alpha$, où C et α sont des paramètres qui dépendent de la loi de comportement du fluide.

La figure 15 montre les courbes des lois de comportement de ces amortisseurs soumis à une excitation sinusoïdale. La courbe elliptique correspond à celle de l'amortissement visqueux linéaire ($\alpha = 1$) et le rectangle à celle de l'amortissement non linéaire rectangulaire ($\alpha = 0$). Pour des valeurs de α intermédiaires (comprises entre 0 et 1, les courbes, en réalité légèrement déformées, se trouvent dans la zone comprise entre l'ellipse et le rectangle.

L'énergie dissipée par cycle correspond à l'aire du diagramme «Force-Déplacement». Par conséquent, plus la valeur de α est petite, plus l'énergie dissipée, pour une même valeur de force maximale d'amortissement, est élevée.

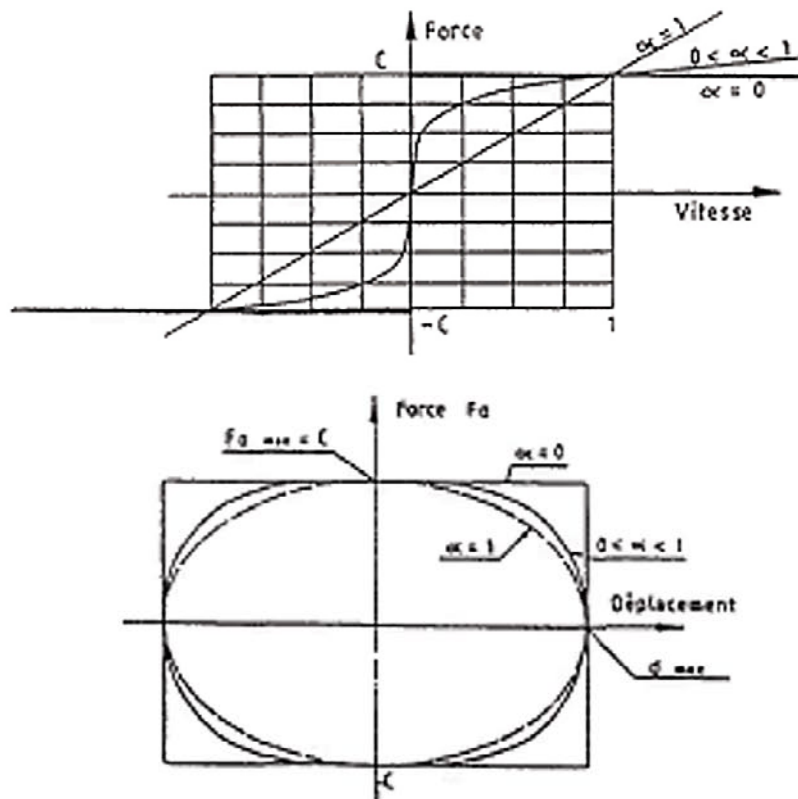


Figure 15 : Énergie dissipée par cycle sous sollicitation harmonique

2.1.5. - Les amortisseurs à ressort précontraint



Figure 16 : Exemples de dispositifs amortisseurs à ressort précontraint

Ces amortisseurs sont composés d'un ressort et d'un amortisseur pur de type visqueux. Le ressort est précontraint, c'est à dire qu'il ne se déclenche que pour une valeur seuil de l'effort appliqué. Les dispositifs de ce type présentent deux avantages majeurs :

- ils bloquent les mouvements en service (point fixe sous dilatations thermiques ou reprise des efforts de vent ou de freinage par exemple) et ne se déclenchent que sous sollicitations sismiques, lorsqu'elles atteignent le seuil de déclenchement (ou seuil fusible) ;
- ils repositionnent l'ouvrage dans sa position "d'origine" après un séisme.

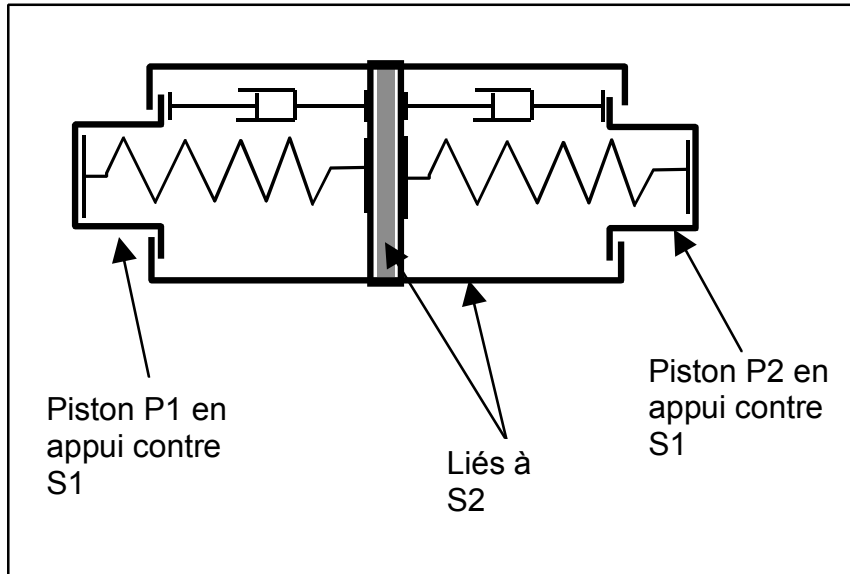


Figure 17 : Principe de fonctionnement des dispositifs - Source : Jarret

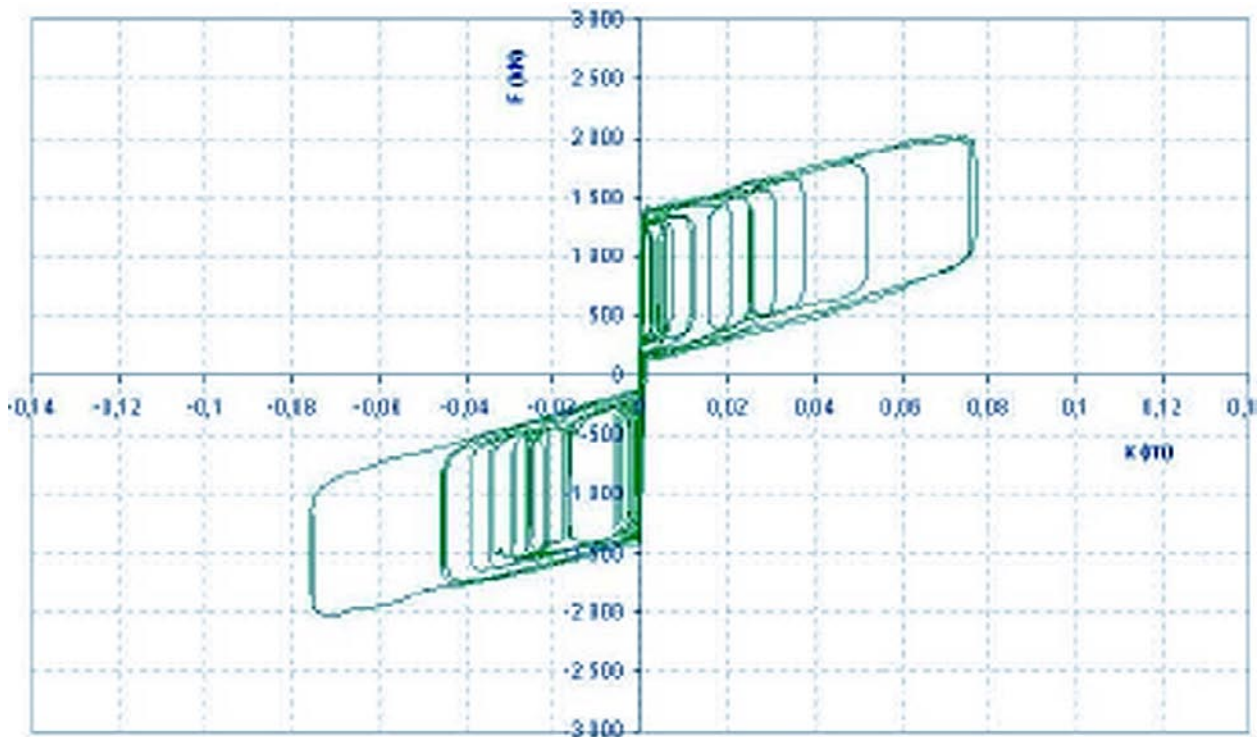


Figure 18 : Loi de comportement des amortisseurs à ressort précontraint

3. - Méthodes d'analyse et domaine d'emploi

Comme le montrent les courbes de comportement du paragraphe précédent, le fonctionnement des dispositifs antisismiques peut s'avérer relativement complexe à modéliser. Leur comportement est non-linéaire et peut varier en fonction des vitesses de sollicitation, comme dans le cas des amortisseurs visqueux. Du fait de cette dépendance, seul un calcul temporel non-linéaire permet de modéliser de façon exacte leur comportement sous séisme. Néanmoins, des méthodes simplifiées existent et permettent leur prédimensionnement.

Les dispositifs amortisseurs étant les plus employés, nous avons retenu cet exemple dans ce chapitre.

3.1. - Calcul monomodal équivalent

3.1.1. - Analyse spectrale par le mode fondamental (Eurocode 8-2 §7.5.4)

L'Eurocode 8-2 (§7.5.4) propose une méthode de calcul simplifiée basée sur les caractéristiques linéaires équivalentes des dispositifs, et sur une approche spectrale monomodale. En général, cette méthode est utilisée en prédimensionnement, pour le choix des gammes de dispositifs ou pour fixer les ordres de grandeur des efforts et déplacements obtenus.

Elle peut être décrite de la façon suivante :

a- La raideur équivalente du dispositif est évaluée comme le rapport $K_{\text{eff}} = F_{\text{max}} / d_{\text{bd}}$, obtenu en divisant la force maximale F_{max} associée au déplacement de calcul d_{cd} , du système complet (structure complète équipée d'amortisseurs), par le déplacement d_{bd} obtenu dans l'amortisseur correspondant à ce même déplacement d_{cd} du système complet (figure 19) :

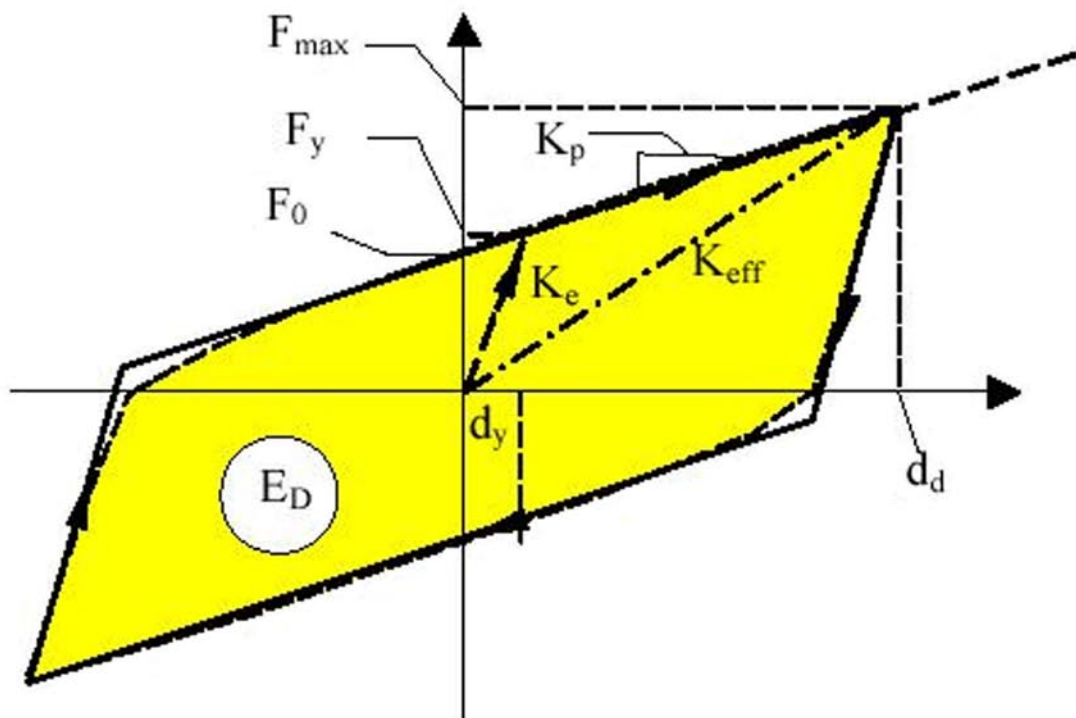


Figure 19 : Caractéristiques équivalentes des dispositifs amortisseurs (EC8-2)

b- La raideur équivalente globale du système est donnée par la somme des raideurs équivalentes des éléments participant à la reprise de l'effort sismique dans la direction considérée : $K_{\text{eff}} = \sum K_{\text{eff},i}$; où $K_{\text{eff},i}$ représente la raideur équivalente (en série) de l'amortisseur i et de l'appui (pile) qui le supporte.

c- Le coefficient d'amortissement global équivalent ξ_{eff} est évalué à partir de la somme des énergies $E_{D,i}$ dissipées par tous les amortisseurs i dans un cycle complet de déformation au déplacement de calcul d_{cd} :

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_{D,i}}{K_{\text{eff}} \cdot d_{\text{cd}}^2} \right]$$
 où $E_{D,i}$ représente la surface balayée par la courbe de comportement du dispositif au cours d'un cycle (surface jaune sur la figure 19).

Ceci revient à modéliser l'amortissement local comme une augmentation de l'amortissement global.

d- À partir des caractéristiques équivalentes K_{eff} et ξ_{eff} , on peut alors calculer la période équivalente et le coefficient de modification spectrale lié à l'amortissement, permettant de réaliser le calcul spectral monomodal :

$$T_{\text{eff}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{\text{tab}}}{K_{\text{eff}}}} \quad \text{et} \quad \eta_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{0,10}{0,05 + \xi_{\text{eff}}}}$$

e- À partir des caractéristiques équivalentes T_{eff} et η_{eff} , on peut alors déterminer la valeur de l'accélération spectrale et du déplacement de calcul sur les spectres élastiques en accélération et en déplacement intégrant le cas échéant le coefficient d'amplification topographique τ et caractérisés à partir des équations suivantes :

T_{eff}	s_e	d_{cd}
$T_C \leq T_{\text{eff}} < T_D$	$2,5 \frac{T_C}{T_{\text{eff}}} \eta_{\text{eff}} a_g s$	$\frac{T_{\text{eff}}}{T_C} d_c$
$T_D \leq T_{\text{eff}} \leq 4s$	$2,5 \frac{T_C T_D}{T_{\text{eff}}} s \eta_{\text{eff}} a_g$	$\frac{T_D}{T_C} d_c$

avec :

a_g , l'accélération de calcul, fonction du coefficient d'importance γ_I de l'ouvrage et de l'accélération au rocher de référence, $a_{g,R}$:

$$a_g = \gamma_I a_{g,R}$$

S , le coefficient de sol

T_C , et T_D , les périodes caractérisant le spectre de calcul dépendant du type de sol

d_c , le déplacement à la période T_C :

$$d_c = \frac{0.625}{\pi^2} a_g S \eta_{\text{eff}} T_C^2$$

En pratique, cette méthode nécessite quelques itérations sur la valeur du déplacement de calcul d_{cd} .

Généralement, dans le cas d'une conception parasismique basée sur l'utilisation de dispositifs amortisseurs, un coefficient d'amortissement global ξ_{eff} de l'ordre de 20 à 30% peut être visé, ce qui conduit à une réduction globale des efforts et des déplacements d'environ 50%.

3.1.2. - Méthode de prédimensionnement pour les amortisseurs en cv^α , développée par Michel Kahan

Cette méthode est explicitée dans le guide AFPS "Dispositifs antisismiques pour les ponts" à paraître.

Dans le cas d'un tablier rigide, les mouvements de la structure se réduisent à ceux d'un oscillateur simple. A partir de la période de la structure non amortie, on en déduit le déplacement élastique, que l'on réduit par un coefficient de réduction pour obtenir le déplacement cible. On calcule alors l'amortissement équivalent total, puis l'amortissement structurel provenant des amortisseurs seuls. Cela permet de déterminer le paramètre c de l'amortisseur ainsi que la force maximale F qu'il reprend.

M : Masse de la structure

K : Raideur de la structure

T : Période de la structure $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$

a_g : Accélération de calcul

$S_e(T)$: Spectre élastique de calcul pour un amortissement de 5% (ou amplification spectrale élastique à la période T)

$d_{élastique}$: Déplacement élastique $d_{élastique} = a_g \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_e(T)$

ρ : Coefficient de réduction des déplacements $\xi_{eq} = \frac{0.1}{\rho^2} - 0.05$

ξ_{eq} : Taux d'amortissement global équivalent

ξ : Taux d'amortissement des amortisseurs uniquement $\xi = \xi_{eq} - 0.05$

α : Exposant dans la relation $F = cv^\alpha$

c : Paramètre de l'amortisseur $c = m \frac{4\pi}{T} \xi \frac{1}{h(\alpha)} \left[a_g \rho \frac{T}{2\pi} S_e(T) \right]^{1-\alpha}$ avec $h(\alpha)$ donné par le tableau suivant.

α	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$h(\alpha)$	1,273	1,236	1,201	1,170	1,140	1,113	1,087	1,063	1,041	1,020	1,000

F_{max} : Force maximum dans l'amortisseur $F_{max} \approx c \left[\frac{T}{2\pi} \rho a_g S_e(T) \right]^\alpha$

3.1.3. - Méthode basée sur l'énergie dissipée par les amortisseurs

Cette méthode est basée sur le calcul de l'énergie dissipée par les amortisseurs. En définissant les caractéristiques du système ainsi que le déplacement correspondant à un amortissement modal de 30%, on calcule l'énergie dissipée. On en déduit le paramètre c ainsi que le déplacement maximum, d_{\max} , qui permet de calculer la force maximum dans l'amortisseur, F_{\max} .

m : masse

f : fréquence

ω : pulsation propre

k : raideur : $k = \omega^2 \cdot m$

d_{\max} = déplacement cible

T : période propre $T = 1/f$

ξ : amortissement

α : paramètre de l'amortisseur

V_{\max} : vitesse maximum : $V = d_{\max} \cdot \omega$

F_{\max} : force maximale dans l'amortisseur : $F_{\max} = \frac{\pi \cdot k \cdot d_{\max} \cdot \xi}{2}$

E : énergie dissipée : $E = 4 \cdot F_{\max} \cdot d_{\max}$

$d(t)$: déplacement en fonction du temps : $d(t) = d_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$

$v(t)$: vitesse en fonction du temps : $V(t) = V_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$

$F(v)$: force maximale dans l'amortisseur en fonction de la vitesse :

$$F(v) = F_{\max} \left(\left| \frac{v}{V_{\max}} \right| \right)^{\alpha} \frac{v}{|v|}$$

$Ft(t)$: force maximale dans l'amortisseur en fonction du temps : $Ft(t) = F(V(t))$

E_{reel} : énergie réellement dissipée : $E_{\text{reel}} = \int_0^T Ft(t) V(t) dt$ que l'on compare à l'énergie dissipée calculée précédemment.

$\checkmark(t)$ c : constante de l'amortisseur : $c = F_{\max} / V_{\max}^{\alpha}$

ξ_{reel} : amortissement réel : $\xi_{\text{reel}} = \frac{E_{\text{reel}}}{\omega \cdot m \cdot V_{\max}^2 \cdot T}$

3.2. - Analyse dynamique temporelle

Dans le cas des dispositifs antisismiques, l'analyse temporelle est assez simple à réaliser puisque la structure doit rester élastique, et que toutes les non-linéarités sont concentrées dans les dispositifs. Il faut néanmoins faire appel à des logiciels capables de modéliser ces dispositifs, avec suffisamment de souplesse pour pouvoir intégrer n'importe quelle loi de comportement, y compris lorsque la force dépend du signe du déplacement (un tel comportement peut créer des problèmes de convergence numérique).

La seconde difficulté est de bien choisir le pas de temps, qui doit être suffisamment faible pour que l'analyse soit valable, sans pour autant augmenter inutilement les temps de calculs. Le pas de temps maximal dépend du type de schéma d'intégration utilisé, du maillage de la structure, mais aussi du comportement non-linéaire proprement dit, et de la façon dont il s'écarte du comportement linéaire.

A défaut de logiciel adapté, une programmation « à la main » peut être utilisée lorsque le nombre de degrés de liberté est faible, ce qui est souvent le cas lorsqu'on utilise ce type de dispositifs qui permettent découplage quasi parfait entre la réponse du tablier (qui se comporte alors comme un bloc rigide) et celle des appuis. Dans le cas particulier à un seul degré de liberté, l'équation de la dynamique peut se discrétiser, par exemple, par l'expression de Newmark :

$$m \left(\frac{x(t + \Delta t) - 2x(t) + x(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \right) = -kx(t) + F \left[x(t), \left(\frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} \right) \right] + m\ddot{u}(t)$$

avec :

$F(x(t), \dot{x}(t))$ représente la force exercée par l'amortisseur, qui dépend du déplacement et de la vitesse relative, et $\ddot{u}(t)$ l'accélération du sol (connue par l'accélérogramme).

m est la masse du tablier, associée à la demi-masse des piles encastrées, le cas échéant

k est la raideur du système d'appui (piles et appareils d'appui)

Cette expression permet, connaissant le déplacement aux instants t et $t - \Delta t$, de le déterminer à l'instant $t + \Delta t$.

Il faut noter que d'autres algorithmes que le schéma de Newmark sont disponibles dans la littérature pour résoudre l'équation de la dynamique.

Cette programmation «à la main» peut être généralisée à un système à plusieurs degrés de liberté à condition d'écrire correctement le système mécanique.

4. - Comparaison des méthodes

4.1. - Comparaison des méthodes de prédimensionnement

Afin d'évaluer la pertinence des méthodes exposées précédemment, il semble pertinent de les comparer sur un exemple simple.

Hypothèses de calcul :

Ouvrage 3 travées (10m-16m-10m)

2 piles, chacune composée de 2 fûts de section 2,50x0,80m, hauteur 5,50m

Appareils d'appui glissants sur culées, 2 néoprènes 400x400x5(10+3) par fût, soit 8 appareils d'appui au total

Masse tablier : $M_{\text{tab}} = 850 \text{ t}$

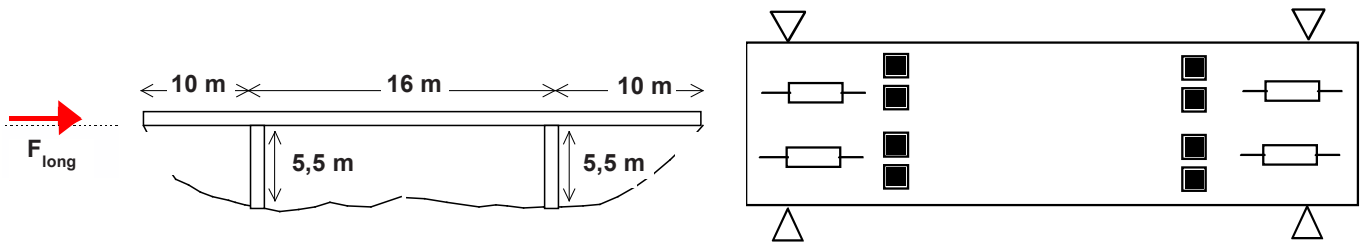
Raideur du système d'appui : $K_{\text{appuis}} = 23400 \text{ kN/m}$

Béton : $f_{\text{ck}} = 35 \text{ MPa}$; $E_c = 36\,000 \text{ MPa}$; $\rho = 2,5 \text{ t/m}^3$

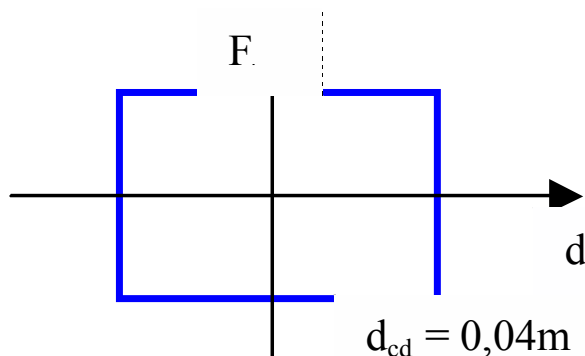
Néoprène : $G = 1 \text{ Mpa}$

Données sismiques : zone Z4 (Métropole sismicité moyenne), catégorie d'importance III, sol de catégorie C

=> $A_{\text{Ed}} = 2,24 \text{ m/s}^2$, $S=1,5$, $T_B=0,06$, $T_C=0,40 \text{ s}$ et $T_D=2 \text{ s}$



On dispose longitudinalement 2 amortisseurs visqueux $F=C.V^{0,10}$ sur chacune des culées. L'objectif étant de limiter les déplacements sous séisme longitudinal à 4 cm.



Méthode de l'Eurocode 8	Méthode M. Kahan	Méthode sur l'énergie dissipée
<p>On retient un amortissement de 30% : $\xi_{\text{eff}} = 0.30$</p> <p>Soit un coefficient de modification spectral de :</p> $\eta_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{0.1}{0.05 + \xi_{\text{eff}}}} = 0.53$ <p>on en déduit donc le déplacement d_c, à la période T_c :</p> $d_c = \frac{0.625}{\pi^2} a_g S \eta_{\text{eff}} T_c^2 = 0.2 \text{ m}$ <p>puis la période efficace cible :</p> $T_{\text{eff}} = \frac{T_c d_{dc}}{d_c} = 0.88 \text{ s}$ <p>et la raideur efficace cible :</p> $K_{\text{eff}} = \frac{4\pi^2 M_{\text{tot}}}{T_{\text{eff}}^2} = 43406 \text{ kN/m}$ <p>Connaissant la raideur des appuis, nous en déduisons la raideur apportée par les amortisseurs :</p> $K_{\text{amort}} = \frac{K_{\text{eff}} - K_{\text{appuis}}}{n} = 5001 \text{ kN/m}$ <p>et ensuite la force dans l'amortisseur :</p> $F_{\text{amort}} = K_{\text{amort}} * d_{\text{cd}} = 200 \text{ kN}$ <p>L'énergie dissipée vaut alors :</p> $E = 4 * F_{\text{max}} * d_{\text{max}} = 128.0 \text{ kNm}$	<p>Connaissant la masse et la raideur de l'ouvrage, on calcule la période :</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 1.20 \text{ s}$ <p>On en déduit la valeur du spectre de calcul :</p> $S_e(T) = \frac{2.5ST_c}{T} = 1.25$ <p>On calcule alors le déplacement élastique</p> $d_{\text{élastique}} = a_g \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_e(T) = 0.10 \text{ m}$ <p>Sachant, que le déplacement cible est de 0.04m, on en déduit que le coefficient de réduction des déplacements, ρ, qui vaut 0.39 ($d_{\text{cd}}/d_{\text{élastique}}$)</p> <p>On calcule alors le taux d'amortissement équivalent :</p> $\xi_{\text{eq}} = \frac{0.1}{\rho} - 0.05 = 0.61$ <p>Et le taux d'amortissement structurel :</p> $\xi = \xi_{\text{eq}} - 0.05 = 0.56$ <p>Le paramètre de l'amortisseur, c, vaut alors :</p> $c = m \frac{4\pi}{T} \xi \frac{1}{h(\alpha)} \left[a_g \rho \frac{T}{2\pi} S_e(T) \right]^{1-\alpha} = 981 \text{ kN/m}^2$ <p>Et la force dans les amortisseurs :</p> $F_{\text{max}} \approx c \left[\frac{T}{2\pi} \rho a_g S_e(T) \right]^\alpha = 839 \text{ kN}$ <p>Soit 209 kN par amortisseurs</p> <p>L'énergie dissipée vaut alors :</p> $E = 4 * F_{\text{max}} * d_{\text{max}} = 134.2 \text{ kNm}$	<p>Connaissant la masse et la raideur de l'ouvrage, on calcule la période :</p> $T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 1.20 \text{ s}$ <p>on en déduit la pulsation propre : $\omega = 2\pi/T = 5.25 \text{ s}^{-1}$</p> <p>On retient un amortissement de 61% : $\xi = 0.61$, correspondant à la réduction des déplacements de 0.10m à 0.04m.</p> <p>On calcule alors la vitesse maximum $V = d_{\text{max}} * \omega = 0.20 \text{ m/s}$</p> <p>On en déduit la force maximale dans les amortisseurs :</p> $F_{\text{max}} = \frac{\pi * k * d_{\text{max}} * \xi}{2} = 896 \text{ kN}$ <p>Soit 209 kN par amortisseurs</p> <p>La constante d'amortissement vaut donc : $c = F_{\text{max}} / V_{\text{max}} = 1048 \text{ kN/m}^2$</p> <p>Vérification :</p> <p>On calcule l'énergie dissipée :</p> $E = 4 * F_{\text{max}} * d_{\text{max}} = 143.1 \text{ kNm}$ <p>Connaissant le déplacement en fonction du temps :</p> $d(t) = d_{\text{max}} * \cos(\omega * t)$ <p>La vitesse en fonction du temps :</p> $V(t) = V_{\text{max}} * \sin(\omega * t)$ <p>et la force maximale dans l'amortisseur en fonction de la vitesse :</p> $F(v) = F_{\text{max}} \left(\frac{v}{V_{\text{max}}} \right)^\alpha \frac{v}{ v }$ <p>On en déduit la force maximale dans l'amortisseur en fonction du temps :</p> $F(t) = F(v(t))$ <p>On calcule alors l'énergie réellement dissipée :</p> $E_{\text{réel}} = \int_0^T F(t) V(t) dt = 138.9 \text{ kNm}$ <p>que l'on compare à l'énergie dissipée calculée précédemment, soit 143.1 kNm. On note une bonne corrélation, on a donc convergé.</p> <p>On calcule alors l'amortissement réel :</p> $\xi_{\text{réel}} = \frac{E_{\text{réel}}}{\omega * m * V_{\text{max}}^2 * T} = 0.592$ <p>qui correspond bien à l'hypothèse de départ d'un amortissement de 0.61.</p>

Nous constatons donc que les trois méthodes simplifiées convergent vers le même résultat, soit quatre amortisseurs avec une force de 200kN et une constante d'amortissement d'environ 1000kN/m/s².

En revanche, une certaine divergence apparaît entre les différentes méthodes en ce qui concerne la valeur du pourcentage d'amortissement critique ξ . Il convient de noter que l'Eurocode 8-2 limite réglementairement cette valeur à 30% dans le cadre d'une approche par une analyse modale équivalente. En effet, au delà de cette limite, la pseudo-période du système s'écarte sensiblement de sa période réelle. Par conséquent, la justification des structures pour lesquelles le pourcentage d'amortissement critique ξ dépasse 30% nécessite le recours à des approches plus sophistiquées, en analyse dynamique temporelle.

4.2. - Comparaison des méthodes simplifiées avec l'analyse dynamique temporelle

Pour réaliser l'analyse dynamique temporelle, nous avons réalisé un programme sous Visual Basic, basé sur la résolution des équations de la dynamique à l'aide d'un schéma de Newmark. L'exemple du chapitre précédent a été repris, l'ouvrage a donc été modélisé comme un système masse-ressort-amortisseur à un degré de liberté, la masse correspondant à la masse du tablier, le ressort à la raideur du système d'appui et l'amortisseur aux dispositifs amortisseurs dont les caractéristiques ont été déterminées par le prédimensionnement.

L'analyse étant temporelle, nous avons également généré un accélérogramme artificiel, correspondant au spectre élastique, à l'aide des fonctions suivantes :

- la fonction amplification : elle dépend de la fréquence excitatrice, $f_{\text{excitatrice}}$, (gamme de fréquence du spectre allant de f_0 à f_1), de la fréquence propre f_p (fréquence $f_p(i)$ associée à chaque itération i de calcul) et de l'amortissement ξ :

$$A(f_{\text{excitatrice}}, f_p, \xi) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{(i * f_{\text{excitatrice}})^2}{f_p(i)^2} + 4\xi \left(\frac{i * f_{\text{excitatrice}}}{f_p(i)} \right)^2 \right]}}$$

- la fonction SRSS

elle dépend de la fréquence propre, f_p , de la gamme de fréquence du spectre allant de f_0 à f_1 du pas de discrétisation choisi, nbre_freq :

$$\text{SRSS}(f_p, f_0, f_1, \text{nbre_freq}) = \sqrt{\sum_{\text{fréquence}} A(i * (f_1 - f_0), f_p(i), \xi)^2}$$

- la fonction sinusoïdale

Elle dépend du temps, t , et de l'intervalle de temps, $temps_total$:

$$E(t, temps_total) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{temps_total} \right) \right)$$

L'accélérogramme est donc construit comme une succession de sinusoïdes en itérant sur le temps t et sur la fréquence pour chaque pas de temps :

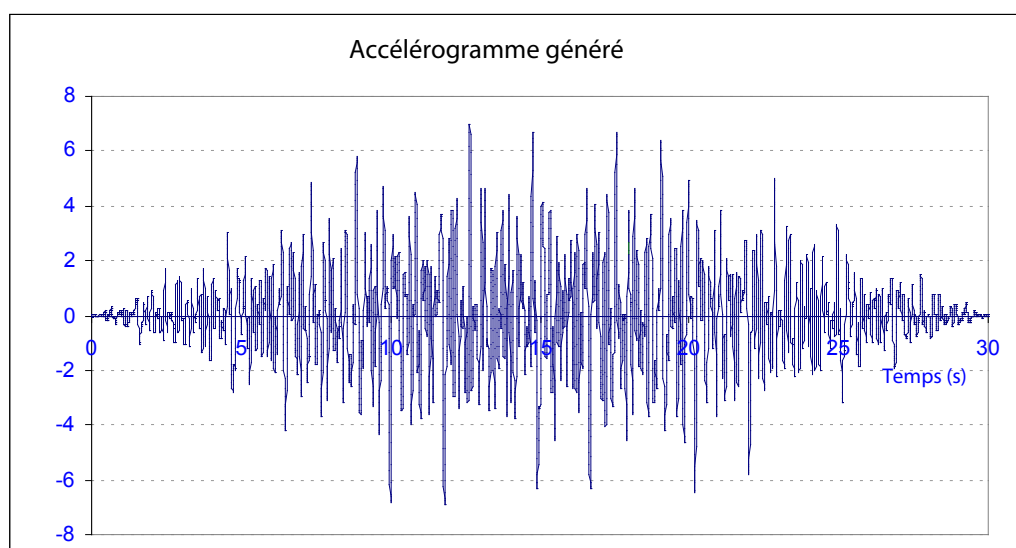
$$sp(f) = \frac{valeur_spectre(f, site)}{SRSS(f, f0, f1, nombre_freq)}$$

$$phase(f) = 2\pi * fonction_aléatoire$$

$$acc(f) = \sum_t sp(f) * \sin(2\pi f * temps + phase(f))$$

$$acc(t) = acc(f) * E(t, temps_total)$$

Nous avons donc obtenu l'accélérogramme suivant, qui correspond bien au spectre élastique réglementaire (figure 20). D'autres méthodes sont disponibles dans la littérature pour générer des accélérogrammes artificiels.



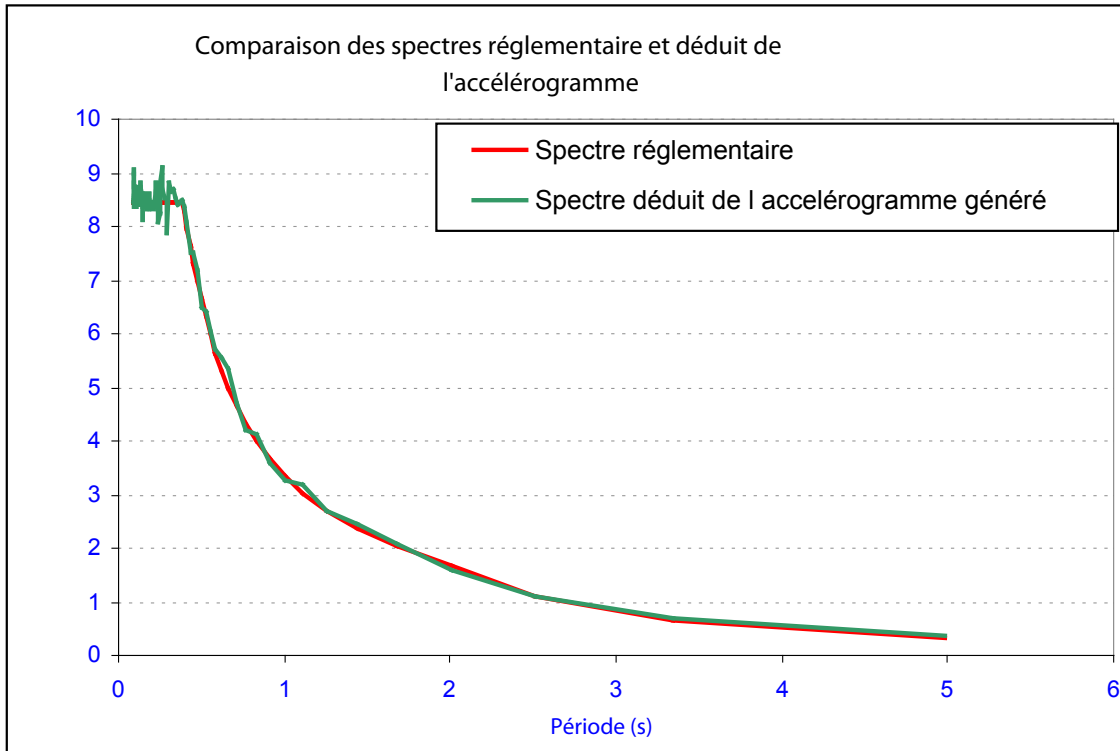
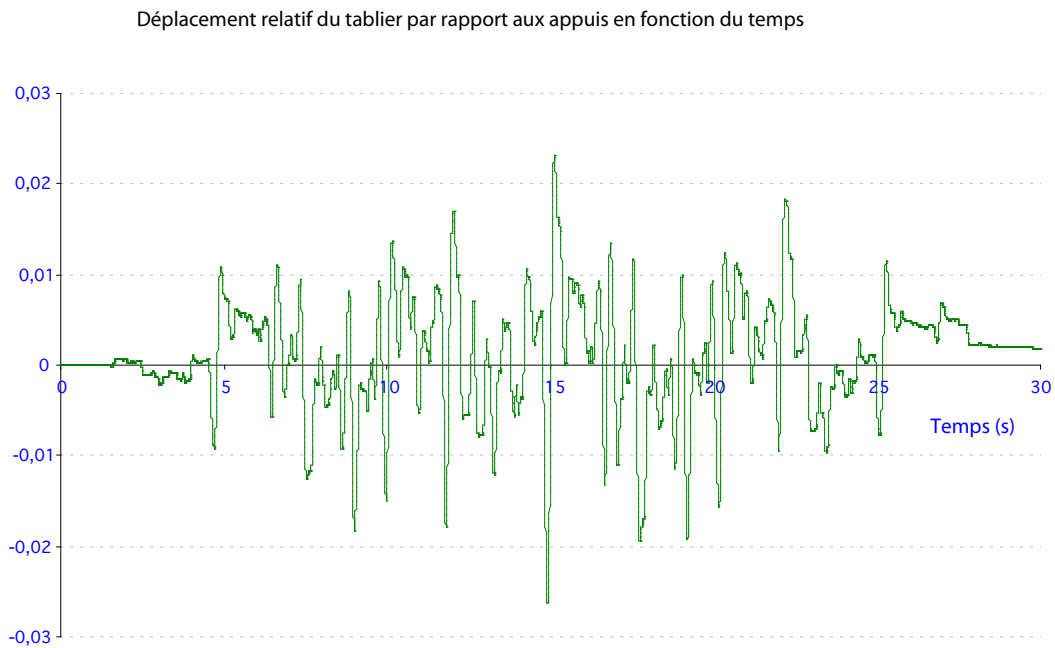


Figure 20 : Accélérogramme artificiel

Comme le montrent les figures suivantes, nous obtenons un déplacement de 0.027m, et une force de 227kN par amortisseur :



Réaction Amortisseur / Déplacement relatif du tablier

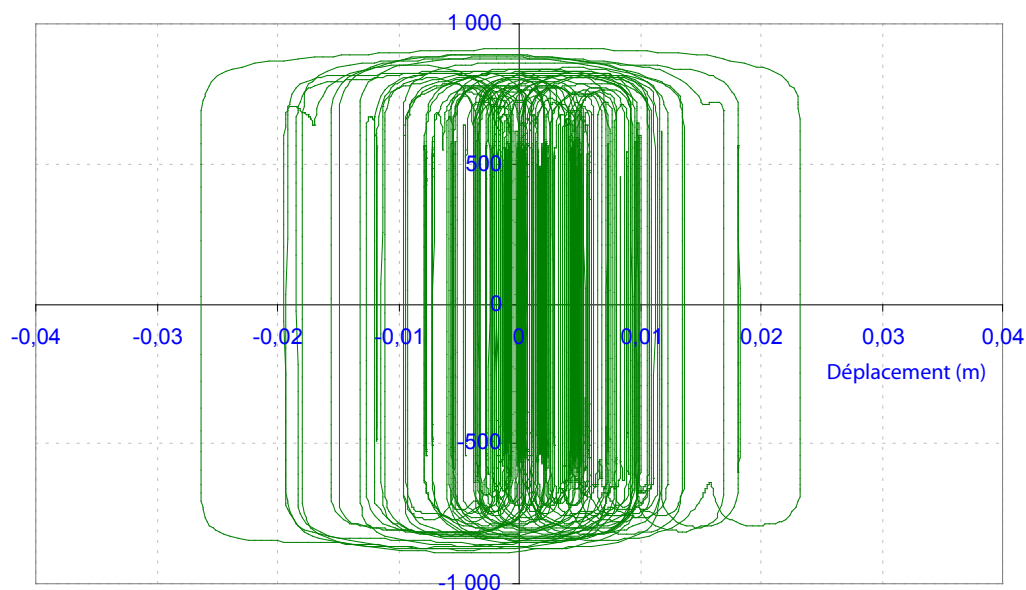


Figure 21 : Réponse de la structure à l'analyse dynamique temporelle

Les méthodes simplifiées sont donc pertinentes car elles sont tout à fait cohérentes avec l'analyse dynamique temporelle : on obtient un déplacement de 2.7cm pour 4.0cm dans le cas de l'analyse simplifiée et une force de 227kN pour 200kN dans le cas de l'analyse simplifiée.

Il convient de garder à l'esprit que l'ouvrage de l'exemple est régulier et simple, la corrélation est donc logique. Dans des cas plus complexes, les méthodes simplifiées peuvent aboutir à des résultats sensiblement plus éloignés du comportement réel de la structure (en particulier lorsque $\xi > 30\%$) et ne sont alors utilisables qu'en prédimensionnement, en vue d'un processus de dimensionnement itératif par l'analyse dynamique temporelle.

5. - Conception

5.1. - Quelques recommandations préalables

Avant d'envisager la mise en place de dispositifs antisismiques, il convient de vérifier que le souffle disponible est suffisant pour assurer leur fonctionnement, ce qui nécessite généralement une visite in-situ dans le cas d'un renforcement d'ouvrage existant.

De même, il doit être vérifié que les déplacements engendrés par le séisme de calcul, ou un dépassement de celui-ci, n'engendrent pas de risque d'échappement d'appui ou de chocs risquant d'endommager des parties sensibles (chocs de poutres précontraintes de tablier sur culées au niveau des ancrages par exemple). Si tel est le cas, des butées de sécurité doivent être envisagées.

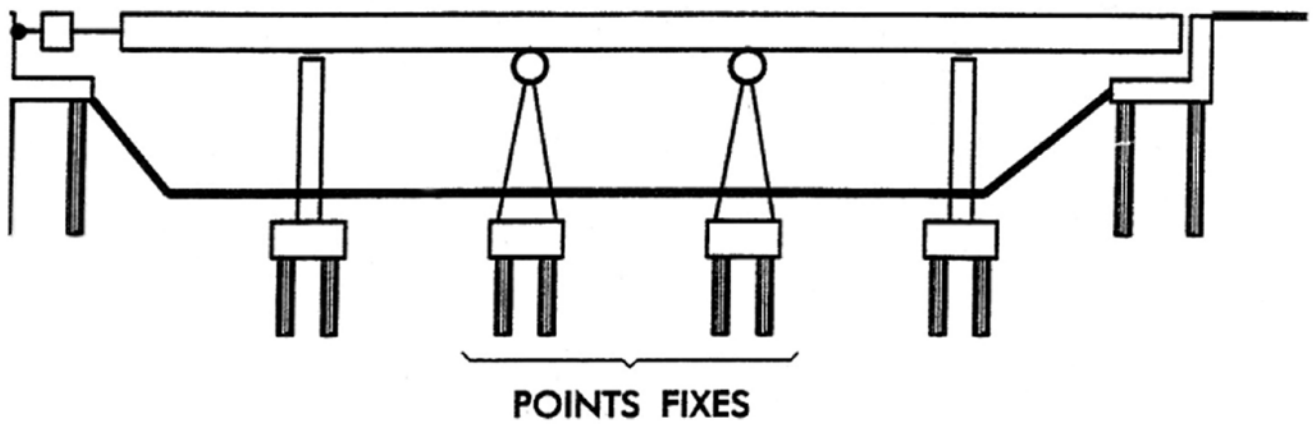
De même, l'utilisation de dispositifs antisismiques peut dans certains cas modifier le schéma statique de l'ouvrage. Il convient donc de vérifier que les déformations de température, retrait, fluage sont toujours possibles et que les points fixes sont bien conservés ou recréés.

5.2. - Exemples de conception

Dans ce chapitre, nous fournissons deux exemples de dispositions de dispositifs amortisseurs visqueux (ceux-ci étant les dispositifs les plus couramment employés).

5.2.1. Ouvrages comportant des amortisseurs disposés en parallèles

Cette disposition, représentée par la figure 22 ci-dessous, est utilisée principalement dans la direction longitudinale (amortisseurs en parallèle sur culée sur l'exemple).



- + Appui à pot multi-directionnel
- Appui élastomère
- ☐ Amortisseur dissipatif
- ☐ Point fixe

Figure 22 : Schéma de principe d'amortisseurs disposés en parallèle

Le tablier est lié à une ou plusieurs piles (points fixes, généralement prévu pour les dilatations thermiques), un ou des amortisseurs relient le tablier à la culée ou à des piles situées de part et d'autre du point fixe. En cas de séisme, les mouvements du sol sont transmis au tablier par les piles bloquées.

En l'absence d'amortisseurs, l'énergie accumulée par la structure se retrouve sous forme d'énergie de déformation structurelle (éventuellement élasto-plastique) des piles. Si des amortisseurs sont prévus, une partie de l'énergie est dissipée dans ceux-ci, l'énergie de déformation de la structure sera par conséquent diminuée, de même que les efforts dans les piles.

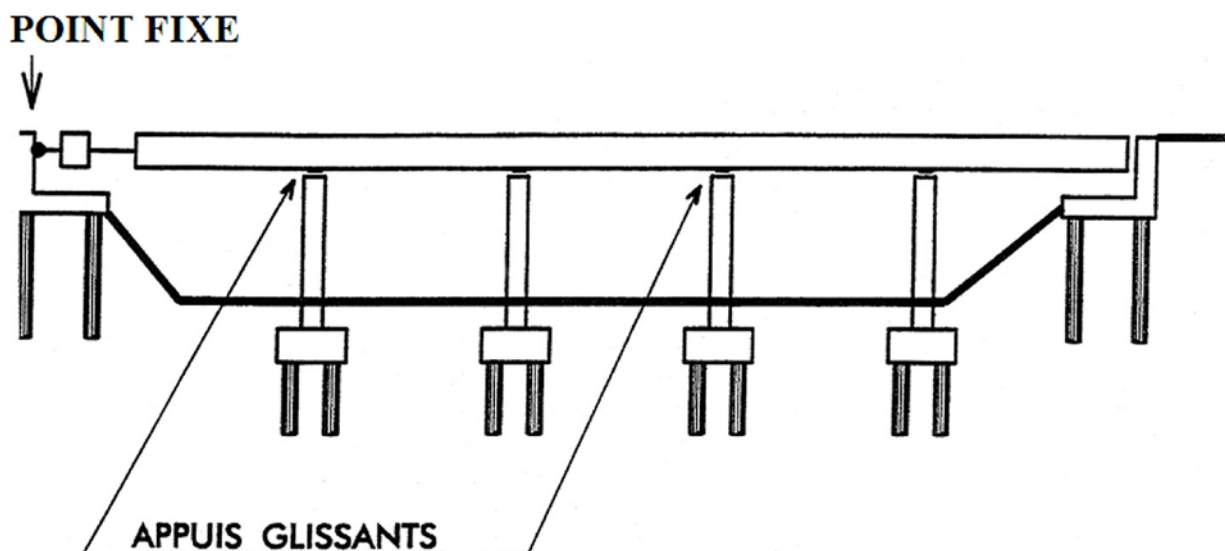
L'intérêt principal de cette solution est de permettre une protection parasismique efficace sans plastification des piles. De plus, les points fixes et la raideur horizontale apportée par les appuis sont conservés. Le tablier revient donc théoriquement à sa position initiale après séisme. Il est à noter que les amortisseurs ne modifient pas le fonctionnement en service de la structure, leur caractère visco-élastique les rendant infiniment souples sous les déformations lentes, telles que les dilatations thermiques. Néanmoins, pour être pleinement efficaces les amortisseurs doivent être disposés sur des appuis suffisamment rigides. Dans le cas contraire ce sont les appuis qui se déforment mais pas les amortisseurs.

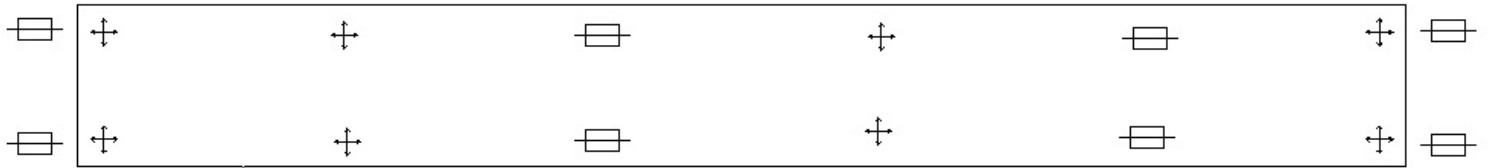
Dans le cas d'une telle conception, la méthode de calcul devra être un calcul temporel à base d'accélérogrammes ou selon une des méthodes simplifiées dans le cas de structures simples, la structure étant supposée élastique.


Le domaine idéal d'application de cette conception est donc le cas où les piles point fixes sont plutôt souples, avec une installation des amortisseurs sur la culée pour les ouvrages courts, ou sur des piles voisines du point fixe suffisamment raides pour les ouvrages longs.

5.2.2. - Ouvrages comportant des amortisseurs disposés en série

Cette disposition, décrite par la figure 23 ci-dessous, peut être utilisée dans les deux directions principales (amortisseurs en série entre les différents appuis).





 Appui à pot multi-directionnel

 Amortisseur dissipatif

Le tablier est disposé sur appuis glissants et relié par des amortisseurs sur certains appuis.

Les amortisseurs fonctionnent comme des ressorts dont la raideur en service peut varier en fonction du système utilisé, et comme des amortisseurs en cas de séisme. Il s'agit donc :

- soit de dispositifs élastoplastiques,
- soit d'amortisseurs hydrauliques équipés d'un fusible,
- soit d'amortisseurs hydrauliques ayant une fonction ressort.

En cas de séisme, les mouvements du sol sont transmis au tablier directement par les amortisseurs. Ceux-ci ont à la fois pour rôle de limiter les déplacements du tablier par rapport aux piles et éviter ainsi le risque d'échappement d'appui ; et de réduire et répartir les efforts sur les appuis les plus résistants. La fonction ressort ou fusible permet par ailleurs de créer un point fixe en service et garantit une certaine raideur horizontale. Les fonctionnements en service et sous séisme sont donc totalement dissociés. Cette solution permet généralement une réduction efficace des efforts sismiques.

5.2.3. - Exemples d'implantation dans les ouvrages

Viaduc d'Aiton (Autoroute A43)

Type d'ouvrage : bi-poutre mixte acier-béton - 2 tabliers courbes (R=950 m)

Année de réalisation : 1994

Maîtrise d'œuvre : Scetauroute

Longueur totale : 300 mètres

Nombre de travées : 6

Masse totale de l'ouvrage : 4000 tonnes

Type appareils d'appui :

- sur piles : élastomères frettés (800x800)
- sur culées : appareils d'appui à pot multidirectionnels 4000 kN

Séisme : site S2, accélération nominale : 2 m/s²

Protection parasismique :

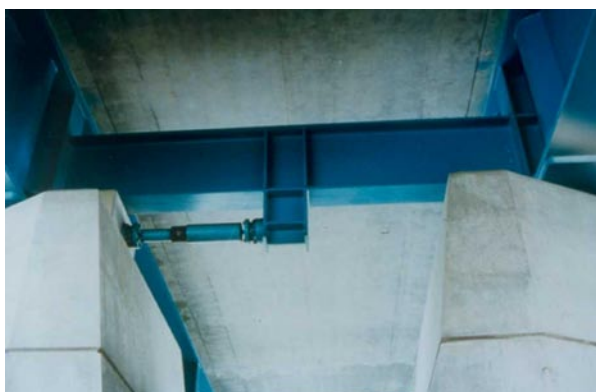
Longitudinale : 2 amortisseurs dissipatifs biais sur chaque culée (amortisseurs en parallèle sur chaque culée et en série en considérant les deux culées).

Transversale : 4 amortisseurs dissipatifs répartis sur les 2x2 piles de rives de chaque tablier (en parallèle).

Figure 2 : Viaduc d'Aiton – schéma statique - sources Jarret



Piles et sous face du tablier



Amortisseur transversal sur pile



Amortisseur longitudinal sur culée

Viaduc de Saint-André (Autoroute A43)

Type d'ouvrage : caisson en béton précontraint construit par encorbellements successifs

Année de réalisation : 1998-99

Maîtrise d'œuvre : Setec

Longueur totale : 900 mètres

Nombre de travées : 11

Masse totale de l'ouvrage : 35 000 tonnes

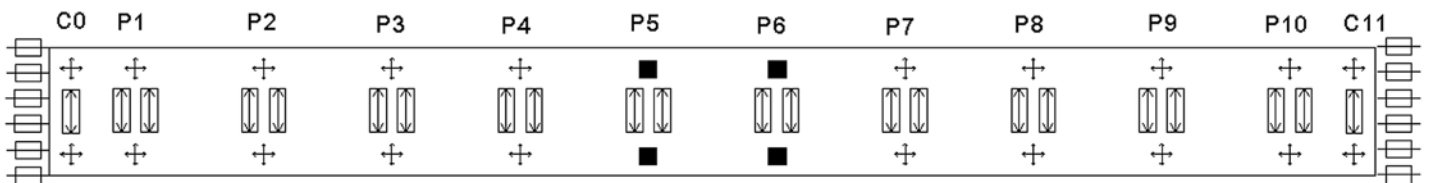
Type appareils d'appui : appareils d'appui à pot multidirectionnels et en élastomère fretté

Séisme : site S2, accélération nominale : 1,5 m/s²

Protection parasismique :

Longitudinale : 2x3 amortisseurs dissipatifs sur chaque culée (amortisseurs en parallèle sur chaque culée et en série en considérant les deux culées)

Transversale : 2 ressorts amortisseur précontraints (RAP) sur toutes les piles et 1 sur culées (amortisseurs en parallèle sur chaque appui et entre appui)



- ⊠ Appui à pot multi-directionnel
- Appui élastomère 800 x 800
- ⊠ Amortisseur dissipatif
- ⊠ Ressort amortisseur précontraint (RAP)



Dispositifs amortisseurs précontraints disposés transversalement sur piles - sources Jarret

6. - Conclusion

Cet article présente les différents dispositifs antisismiques qui peuvent être employés dans le cadre d'un projet neuf, mais également dans le cadre d'un renforcement au séisme d'un ouvrage existant. Les méthodes d'analyse associées, simplifiées ou sophistiquées, sont également présentées et illustrées sur un exemple simple. La comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes simplifiées montre une bonne corrélation entre elles en vue de la pré-évaluation de la gamme des dispositifs à utiliser. La comparaison avec les résultats de l'analyse dynamique temporelle confirme quant à elle leur pertinence pour le dimensionnement des dispositifs sur des ouvrages simples et leur validité dans le cas d'un prédimensionnement pour des ouvrages plus complexes.

