

3. LES DISPOSITIFS PARASISMIQUES ET LEUR UTILISATION SUR LES PONTS

3.1 TECHNOLOGIE ET MODÈLES ASSOCIÉS

3.1.1 LES APPAREILS D'APPUI ÉLASTIQUES EN ÉLASTOMÈRE FRETTÉ

3.1.1.1 Généralités

Ces dispositifs sont le plus souvent des appareils d'appui en élastomère fretté tels que ceux habituellement utilisés pour reprendre les charges verticales des ouvrages de génie civil et des bâtiments. Le comportement statique de ces appareils permet de transmettre des charges élevées perpendiculairement à leur plan de frettage tout en acceptant des mouvements dans ce plan par déformation. Ces appareils permettent de surcroît l'adaptation aux rotations autour d'un axe absolument quelconque.

Selon la nature de l'élastomère les déformations présentent une hystérésis plus ou moins prononcée. Cette propriété sans effet en comportement purement statique influence le comportement dynamique de ces appareils d'appui. Résultant de la composition chimique de l'élastomère, le taux d'amortissement interne peut modifier très sensiblement la réponse du système en fonction du type de sollicitations dynamiques susceptibles d'agir.

A titre d'exemple, les appareils d'appui d'une machine fonctionnant continuellement en générant des vibrations devront être constitués d'un élastomère à très faible amortissement interne afin que la dissipation d'énergie sous forme de chaleur soit limitée à un niveau acceptable pour la durabilité du système. A l'inverse il sera avantageux de recourir à des matériaux de plus haut amortissement interne pour des applications où les sollicitations dynamiques sont de durée très limitée, comme c'est le cas des séismes. Dans ce dernier cas, les appareils d'appui en élastomère fretté auront simultanément la fonction de transmettre les charges verticales, celle d'exercer un effort de rappel (horizontal) dans leur plan et enfin, celle de dissiper une certaine quantité d'énergie.

Pour fixer quelques ordres de grandeur, on pourra considérer qu'un ensemble d'appareils d'appui en élastomère fretté confère à une structure un taux d'amortissement interne de l'ordre de :

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • 1 à 3% (NR, caoutchouc naturel), • 6 à 8% (CR, polychloroprène), • 10 à 20% (mélanges mis au point spécialement) | } < 6% : Appareils d'appui en élastomère à faible amortissement (LBDP) au sens de la norme NF EN 15129 |
| | } 10 à 20% : Appareils d'appui en élastomère à fort amortissement (HBDP) au sens de la norme NF EN 15129 |

En général, pour éviter tout échappement d'appui, il est conseillé d'associer les appareils d'appui en élastomère à des butées de sécurité (cf. §3.2.1). A défaut, les déplacements sismiques de calcul doivent être majorés de 50% et il convient de vérifier les repos d'appui avec une marge de sécurité suffisante.

3.1.1.2 Spécifications particulières

Les dispositifs en élastomère fretté restent avant tout des appareils d'appui permanents pour la structure et doivent donc satisfaire les spécifications essentielles des normes NF EN 1337-1 à NF EN 1337-11 "Appareils d'appui structuraux". Toutefois, certaines caractéristiques requises sont modifiées pour tenir compte du fonctionnement dynamique recherché. Ces éléments sont précisés dans l'Eurocode 8 [5] et dans la norme NF EN 15129 [6]

La nature des sollicitations sismiques impose une bonne tenue en distorsion, laquelle peut atteindre deux fois et demi la valeur maximale généralement admise en fonctionnement quasi-statique en service. Les appareils d'appuis en élastomère fretté devront donc pouvoir subir sans dommage (c'est-à-dire ni déchirement ni perte d'adhérence entre frettes métalliques et élastomère) plusieurs cycles de distorsion alternée.

Il convient de rappeler que les appareils d'appui en élastomère fretté n'ont pas d'effet positif dans la direction verticale, tant pour les effets directs de la composante verticale que pour les éventuels effets verticaux induits par la composante transversale du séisme. En zone de forte sismicité il existe donc des risques de perte d'adhérence (glissement en l'absence de taquets...), voire de soulèvement.

La norme NF EN 15129 fixe les différents critères de justification des appareils d'appui en élastomère fretté sous combinaisons sismiques :

- Distorsion totale : identique au cas statique avec $K_L=1$:

$$\varepsilon_{t,d} = K_L (\varepsilon_{c,E} + \varepsilon_{q,\max} + \varepsilon_{a,d}) \leq \frac{7}{\gamma_m}$$

$\varepsilon_{c,E}$: déformation en compression correspondant à la charge maximale $N_{Ed,\max}$

$\varepsilon_{q,\max}$: déformation due au déplacement maximum sous séisme

$\varepsilon_{a,d}$: déformation due à la rotation de l'appareil d'appui

K_L : coefficient de charge type

γ_m : coefficient partiel relatif à une propriété de matériau pour les élastomères ($\gamma_m=1$)

$$\leq \frac{7,0}{\gamma_m}$$

où les déformations doivent être évaluées à partir des **déplacements sismiques de calcul multipliés par un coefficient dit « de fiabilité » γ_x (noté γ_{1s} dans l'Eurocode 8-2)**, sauf si des butées de sécurité complètent le dispositif en assurant une deuxième ligne de défense.

- Distorsion due aux efforts horizontaux (seuls et autorisés sous séismes) :

$$\varepsilon_{q,\max} \leq 2,5 \quad (\text{ou } \varepsilon_{q,\max} \leq 2,0 \text{ dans le cas des appareils d'appui en élastomère à faible amortissement soumis à une faible action sismique})$$

- Flambement :

$$N_{Ed,\max} < \frac{P_{cr}}{2}$$

Pour $\frac{P_{cr}}{2} \geq N_{Ed,\max} \geq \frac{P_{cr}}{4}$, la condition suivante doit être remplie :

$$1 - \frac{2N_{Ed,\max}}{P_{cr}} \geq 0.7\delta$$

et pour $N_{Ed,\max} < \frac{P_{cr}}{4}$, la condition suivante doit être remplie :

$$\delta \leq 0.7$$

avec

P_{cr} la charge de flambement

δ égal au déplacement sismique de calcul divisé par la largeur efficace du dispositif

- Glissement : vérification identique au cas statique avec la combinaison sismique la plus défavorable et le coefficient de frottement ELS :

$$F_{xy,d} \leq \left(0.1 + \frac{K_f}{\sigma_m} \right) N_{Ed,\min}$$

Avec K_f un coefficient dépendant du matériau sur lequel est posé l'appareil d'appui et σ_m la pression sur l'appareil d'appui

- o Roulement : si des isolateurs encastrés ou à liaison par goujons sont utilisés au lieu des méthodes standards de fixation, le roulement doit être vérifié

$$d_{Ed} \leq \left(\frac{1}{\gamma_r} \frac{N_{Ed, \min} a'}{K_h T_b + N_{Ed, \min}} \right) N_{Ed, \min}$$

où γ_R est un coefficient partiel dont la valeur recommandée est 1,5, K_h la rigidité en cisaillement horizontal, T_b la hauteur totale du dispositif,

Ces deux dernières conditions ne sont en général pas vérifiées et conduisent à mettre en place des dispositifs anti-cheminement.

A noter que les notations des différents coefficients et les valeurs correspondantes utilisées pour les différents critères de justification peuvent varier d'une norme à l'autre (NF EN 15129, NF EN 1998-2 et NF EN 1998-2/NA). Dans la hiérarchie des normes applicables en France, la **norme produit NF EN 15129 s'impose devant la norme de calcul nationale NF EN 1998-2/NA (annexe nationale de Eurocode 8-2) qui elle-même s'impose devant la norme de calcul européenne NF EN 1998-2 (Eurocode 8-2)**. En outre, les appareils d'appui doivent bien sûr également être dimensionnés selon la norme NF EN 1337-3 vis-à-vis des charges non-sismiques (« statiques »).

Le tableau ci-dessous récapitule de manière synthétique les différents critères et coefficients avec leurs différentes notations et valeurs indiquées dans les différentes normes. **En gras figurent les valeurs à adopter sous sollicitations sismiques :**

Coefficient ou critère	Norme	Situation de calcul	Notation	Valeur (dispositif à faible amortissement soumis à une faible action sismique)		Valeur (autres cas)
Coefficient de sécurité partiel matériau élastomère	NF EN 1337	Statique	γ_m	1,0		
	NF EN 15129	Sismique		1,0		
	NF EN 1998-2			1,15		
	NF EN 1998-2/NA			1,0		
Coefficient de fiabilité	NF EN 1337	Statique	Sans objet	Sans objet		
	NF EN 15129	Sismique	γ_x	1,0	1,5	
	NF EN 1998-2		γ_{is}	1,5		
	NF EN 1998-2/NA					
Distorsion maximale due aux efforts horizontaux	NF EN 1337	Statique	$\epsilon_{q, \max}$	1,0		
	NF EN 15129	Sismique		2,0		
	NF EN 1998-2			2,0		
	NF EN 1998-2/NA			2,0		

Tableau 5 : Coefficients et critères de justification des dispositifs selon les différentes normes en vigueur

Concernant les attaches des dispositifs et les éléments structuraux auxquels ils sont connectés (piles, culées...), ceux-ci doivent être dimensionnés en appliquant le principe du dimensionnement en capacité, avec comme valeur du coefficient de sur-résistance $\gamma_{Rd} = 1,1$ (cf. NF EN 15129 § 4.3.2). Conformément à ce principe, ce coefficient s'applique à la capacité résistante maximale du dispositif, intégrant le cas échéant le prise en compte du coefficient de fiabilité γ_{is} .

Des dispositions constructives spécifiques sont également à vérifier, comme le repos minimum d'appui ou l'association à des dispositifs de blocage et butées.

Des éléments complets sur les propriétés et caractéristiques, de dimensionnement, et sur les essais de fabrications sont également fournis dans la partie 8 de la norme NF EN 15129 et dans la norme NF EN 1337-3.

Pour procéder à ces vérifications, il faut connaître le module de cisaillement dynamique G_b . Sous séisme, l'Eurocode propose pour les appareils d'appui courants d'utiliser un module de cisaillement $G_b = 1.1 G_g$ (NF EN 1998-2, § 7.5.2.3(5)), où G_g est la valeur du module de cisaillement conventionnel apparent (cf. 4.3.1.1 de la norme NF EN 1337-3) évalué à 0,9 MPa dans le cas de dispositifs à faible amortissement (LBDP). On peut également évaluer la valeur de ce module de cisaillement aux travers d'essais, à partir de sa raideur et de ses dimensions. Cette vérification se fait à fréquence fixée, et est évaluée au 3^{ème} cycle. La procédure pour déterminer la valeur du module dynamique est définie en 8.2.2.1.3 et 8.2.4.2.5.2 de la norme NF EN 15129.

Remarques :

- On observe sous fortes distorsions un raidissement des appareils d'appui en élastomère fretté. Néanmoins, compte tenu de la faible valeur relative de ce raidissement (inférieur à 20%) et du fait qu'un modèle à deux pentes complexifierait fortement l'analyse, cet aspect n'est généralement pas pris en compte dans les calculs. En outre, le coefficient de sécurité γ_{IS} pris sur les déplacements calculés conduit à considérer que ce raidissement est rarement atteint sous séisme de calcul.

- Dans tous les cas, le concepteur doit s'assurer que :

* Les dispositifs parasismiques sont utilisés dans leur domaine de fonctionnement qui a bien été établi par des essais de types, c'est-à-dire que les déplacements sismiques attendus (éventuellement les vitesses) sont inférieurs à ceux effectivement testés,

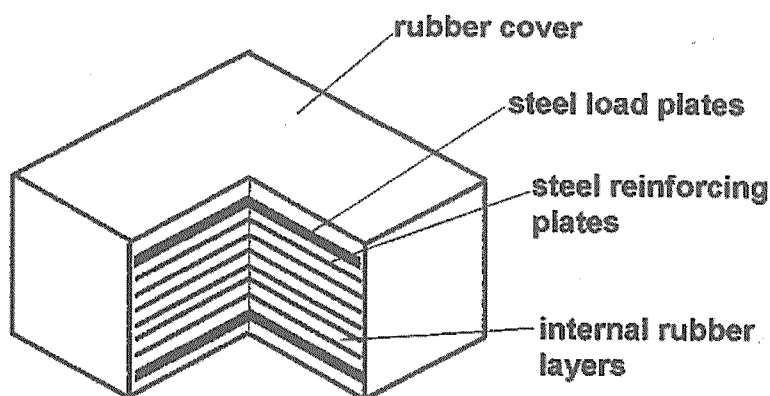
* les paramètres de la loi de comportement prise en compte dans le calcul (raideur et amortissement) sont bien calés sur les caractéristiques des dispositifs mesurées lors des essais, pour le niveau de déplacement sismique attendu.

- Dans le cas de cheminements différentiels entre appuis, ceux-ci peuvent conduire à des concentrations de charges sur certains appuis, par exemple si un glissement libère la totalité de la distorsion sur un appui et pas sur l'autre.

3.1.1.3 Description des appareils d'appui en élastomère fretté

On se reportera aux normes NF EN 1337 et NF EN 15129. L'utilisation de ces appareils d'appui en site sismique impose des règles plus contraignantes que dans les cas courants, notamment concernant les propriétés, le dimensionnement et les dispositions constructives. De plus, les fixations doivent reprendre la totalité (sauf dimensionnement spécial du dispositif) de l'effort horizontal de calcul, sans prise en compte possible d'une éventuelle contribution du frottement. Des dispositifs de fixation sont définis dans la norme NF EN 15129.

Des dispositifs anti-cheminement sont généralement à prévoir sous sollicitations sismiques pour éviter le glissement du dispositif.



a)

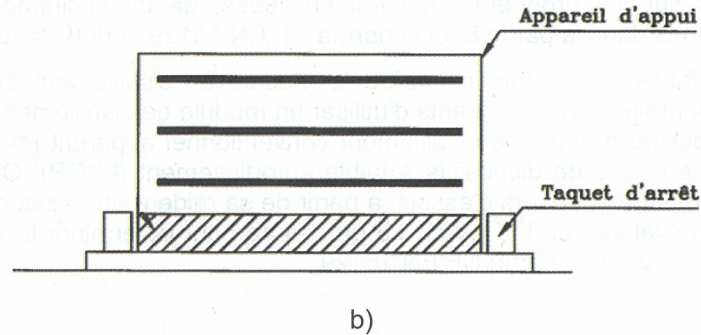


Figure 19 : a) Appui type en élastomère fretté, représenté sans fixation ; b) Appui type en élastomère fretté, avec taquets

L'insertion d'un matériau à déformation plastique, par exemple du plomb, est un moyen permettant d'accroître le taux d'amortissement interne d'un appareil d'appui en élastomère fretté (Figure 20 ; Photo 4), sous la condition que les raideurs verticale et horizontale ne soient pas affectées de manière sensible vis à vis de la structure portée sous l'effet des actions quasi-statiques.

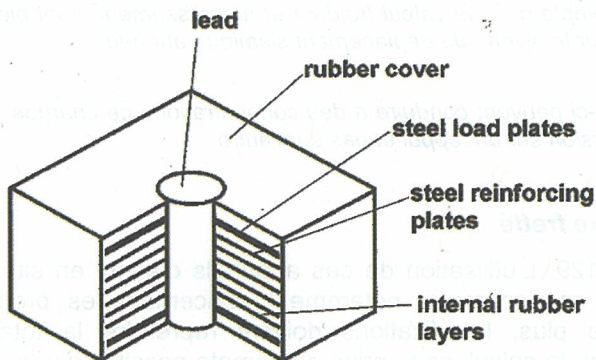


Figure 20 : Appareil d'appui en élastomère fretté à noyau de plomb (coupe schématique)



Photo 4: Appareil d'appui en élastomère fretté à noyau de plomb (exemple d'utilisation au Japon sur le viaduc Uchimaki)

Dans ce cas, il convient dans l'application du principe de dimensionnement en capacité, pour les attaches et les éléments supports, de prendre en compte une majoration forfaitaire de 30% de la rigidité du dispositif (cf. NF EN 1998-2 §5.3(8)P).

3.1.1.4 Modélisation

Les appareils d'appui en élastomère classiques (sans noyau de plomb) présentent un comportement légèrement non linéaire, que ce soit en statique ou en dynamique. Ceci ne pose aucune difficulté particulière. Malgré leur relative complexité à être représentés mathématiquement, les dispositifs constitués à partir de ces matériaux s'accrochent de descriptions à l'aide de modèles simples qui permettent une étude satisfaisante des structures dans lesquelles ils sont incorporés.

La prise en compte d'appareils d'appui en élastomère fretté dans un modèle de calcul de structure est généralement faite de manière linéaire, aussi bien pour la fonction ressort que celle d'amortisseur idéal. Les valeurs à retenir résultent de l'interprétation d'essais standardisés. Il est à noter que les valeurs obtenues sont alors considérées constantes quelles que soient les caractéristiques des sollicitations et ne permettent pas de tirer le meilleur parti des propriétés spécifiques des élastomères car l'amortissement interne est largement sous-estimé. Pour les appareils d'appui à fort amortissement, il est donc conseillé de procéder à un calcul plus sophistiqué, pour exploiter pleinement la capacité de ces dispositifs.

L'expression généralement retenue par la simplicité qu'elle apporte dans les calculs, est de la forme : $F = K \cdot x + C \cdot \dot{x}$ et est associée au schéma représenté par la Figure 21.

L'allure des courbes réelles de réponse présentées est évidemment loin de la représentation linéaire idéalisée de la Figure 21, qui ne rend pas compte notamment de l'influence de la vitesse de déformation.

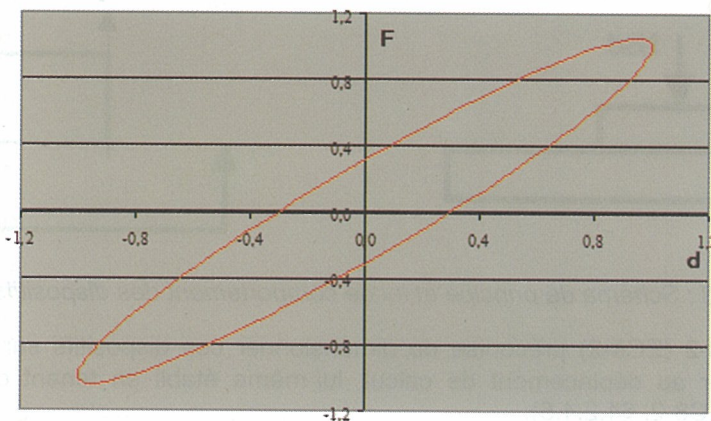


Figure 21: Modèle conventionnel de l'appui en élastomère fretté

Une modélisation plus précise peut être obtenue. La Figure 22 donne un exemple de modèle mathématique plus proche de la réalité.

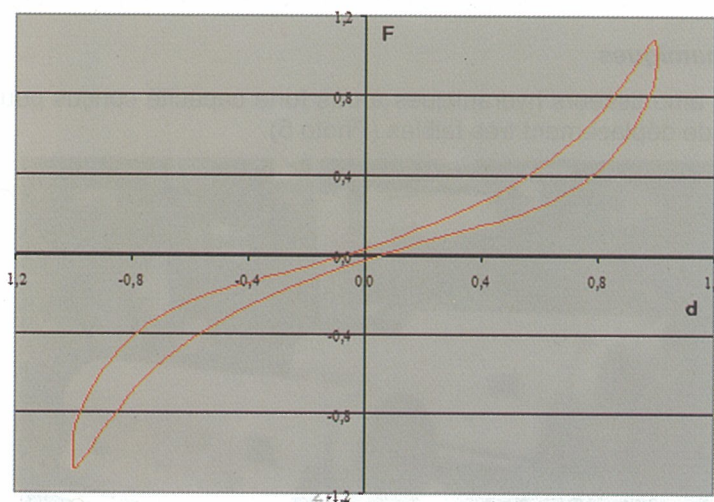


Figure 22 : Modèle plus précis : $F = C \cdot \dot{x}^\alpha (1 + \mu x^2) + K \cdot x(1 + \lambda x^4)$

3.1.2 LES DISPOSITIFS À COMPORTEMENT NON LINÉAIRE INDÉPENDANT DE LA VITESSE

Certains dispositifs ont un comportement pratiquement indépendant de la vitesse du mouvement qui leur est imposé. Leur fonctionnement peut donc être décrit par une relation entre la force appliquée et la variation de longueur de l'appareil (Figure 23 à Figure 29). Les exigences sur ces dispositifs sont décrites dans les normes NF EN 1998-2; NF EN 1337 et NF EN 15129.

Les technologies suivantes peuvent être rangées dans cette catégorie.

3.1.2.1 Les dispositifs à frottement

Le dispositif comporte deux surfaces de frottement en vis à vis, soumises à un effort normal N , généralement combinées à un appareil d'appui, l'effort normal provenant alors des charges supportées.

Le dispositif est bloqué jusqu'à ce que la force atteigne le seuil de glissement. Au-delà, la déformation s'effectue sous une force $H = N \tan(\varphi)$, φ représentant l'angle de frottement. A la fin de la sollicitation, un déplacement résiduel demeure, pouvant nécessiter un recalage du tablier sur ses appuis. Dans le cas où la force N ne varie pas ou très peu

en fonction du temps, H peut être considérée comme constante (Figure 23). Cependant, dans le cas le plus général, la force H n'est pas constante puisque N peut varier en fonction du temps...

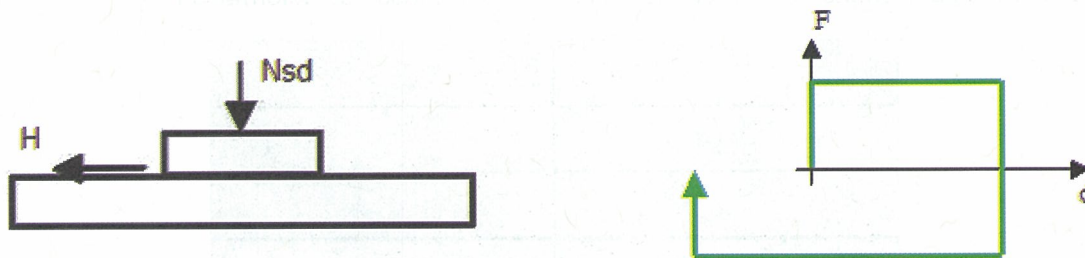


Figure 23 : Schéma de principe et loi de comportement des dispositifs à frottement

La norme NF EN 1998-2 (EC8-2) préconise de dimensionner ces dispositifs sur la base d'un coefficient de fiabilité $\gamma_{IS} = 1,50$ à appliquer au déplacement de calcul, lui-même établi en tenant compte de la variabilité des propriétés des dispositifs (cf. EC8-2, §4.2.4.5).

Concernant les attaches des dispositifs et les éléments structuraux auxquels ils sont connectés (piles, culées...), ceux-ci doivent être dimensionnés en appliquant le principe du dimensionnement en capacité, avec comme valeur du coefficient de sur-résistance $\gamma_{Rd} = 1,1$ (cf. NF EN 15129 § 4.3.2). Conformément à ce principe, ce coefficient s'applique à la force de frottement maximale du dispositif, en considérant en outre un coefficient supplémentaire γ_{of} d'amplification pour le frottement dû aux effets du vieillissement (cf. NF EN 1998-2 §5.3(7)P).

3.1.2.2 Les connecteurs dynamiques

Ces dispositifs sont des amortisseurs hydrauliques à très forte capacité conçus pour ne se déplacer de manière notable que pour des vitesses de déplacement très faibles (Photo 5).

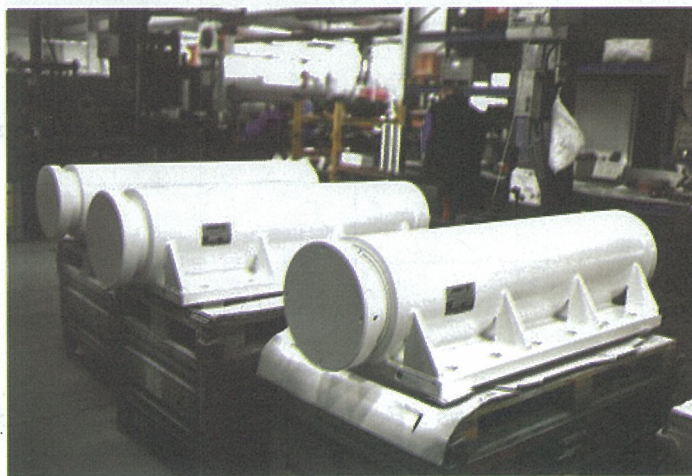


Photo 5 : Exemple de connecteurs dynamiques prévus sur des ouvrages de la ligne TGV Perpignan – Figuéras

On peut donc considérer deux types de fonctionnement :

- en service, sous chargement à variation lente, le dispositif se déplace quasi librement ;
- en cas de chargement dynamique (freinage, choc, vent, séisme...), le dispositif se comporte de manière élastique avec une grande rigidité et restreint donc le mouvement relatif des deux éléments de structure auquel il est relié.

Dans ce dernier cas, le diagramme force/déplacement est indépendant de la vitesse (Figure 24).

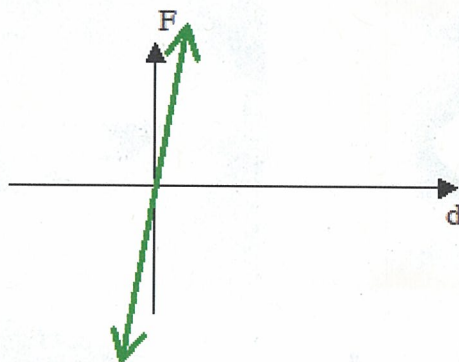


Figure 24 : Loi de comportement des connecteurs dynamiques sous sollicitations dynamiques rapides

Ce type de dispositifs, difficilement classable dans l'une ou l'autre des deux catégories (loi de comportement dépendant ou non de la vitesse) est décrit plus en détails au paragraphe 3.1.3.3.

3.1.2.3 Les amortisseurs hydrauliques à soupape

Ces dispositifs comportent un vérin hydraulique à double effet, la circulation d'huile d'une chambre à l'autre étant contrôlée par des soupapes ou par des orifices percés dans la tête du piston.

Le dispositif a un comportement élastique jusqu'au seuil fixé par le calibrage des soupapes. Au-delà de ce seuil le déplacement s'effectue sous force constante (Figure 25). A la fin de la sollicitation, on peut s'attendre à un déplacement relatif résiduel du dispositif pouvant nécessiter un recalage du tablier sur ses appuis.

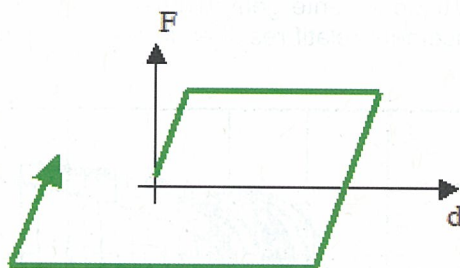


Figure 25 : Loi de comportement des amortisseurs hydrauliques à soupape

La norme NF EN 1998-2 (EC8-2) préconise de dimensionner ces dispositifs sur la base d'un coefficient de fiabilité $\gamma_{IS} = 1,50$ à appliquer au déplacement de calcul, lui-même établi en tenant compte de la variabilité des propriétés des dispositifs (cf. EC 8-2, §4.2.4.5). Pour les amortisseurs visqueux hydrauliques, la majoration correspondante de l'effort transmis est $\gamma_{IS}^{\alpha/2}$ (cf. EC 8-2 §7.6.2(4)NOTE).

Le reste de la structure (attaches des dispositifs et éléments structuraux de l'ouvrage) doit être dimensionné en appliquant le principe du dimensionnement en capacité en prenant comme valeur du coefficient de sur-résistance $\gamma_{Rd} = 1,1$ (cf. NF EN 15129 §4.3.2), qui se cumule au coefficient de majoration de l'effort $\gamma_{IS}^{\alpha/2}$ correspondant à la réaction maximale du dispositif sous l'effet du déplacement majoré par γ_{IS} .

3.1.2.4 Les dispositifs métalliques plastifiables

Ces dispositifs comportent une ou plusieurs pièces métalliques travaillant en flexion ou en torsion (Photo 6).

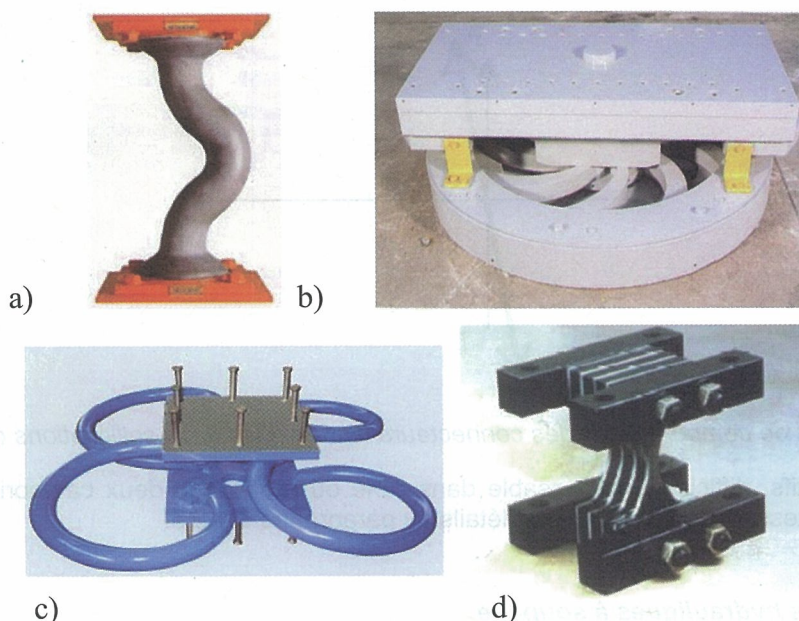


Photo 6 : Différents types de dispositifs métalliques plastifiables

Pour les cas de service, le métal de ces pièces reste dans le domaine élastique. En cas de sollicitations exceptionnelles (choc, séisme...) le métal se plastifie.

La courbe représentative est quasi-identique à celle du cas précédent (cf. Figure 25). Elle se compose donc d'une partie élastique et d'une partie plastique à pente généralement beaucoup plus faible (Figure 26). A la fin de la sollicitation, on peut s'attendre à un déplacement relatif résiduel du dispositif pouvant nécessiter un recalage du tablier sur ses appuis.

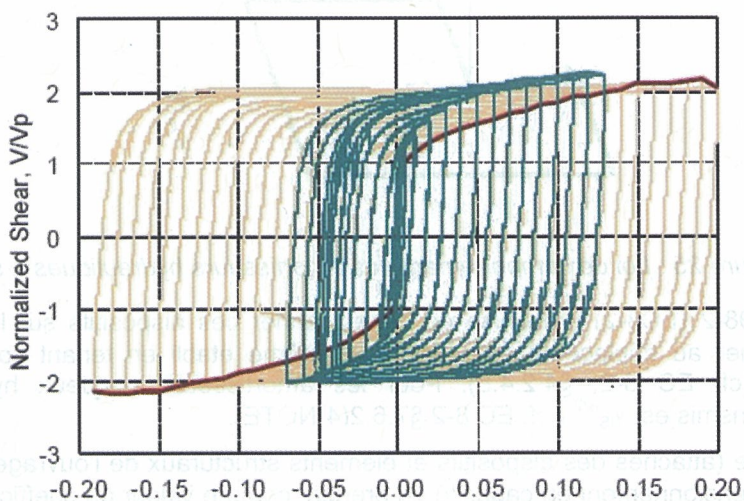


Figure 26 : Comportement des dispositifs métalliques plastifiables sous fortes sollicitations

On peut aussi ranger dans cette catégorie les appareils d'appui en élastomère fretté munis d'un noyau de plomb (cf. § 3.1.1.3 et Figure 27).

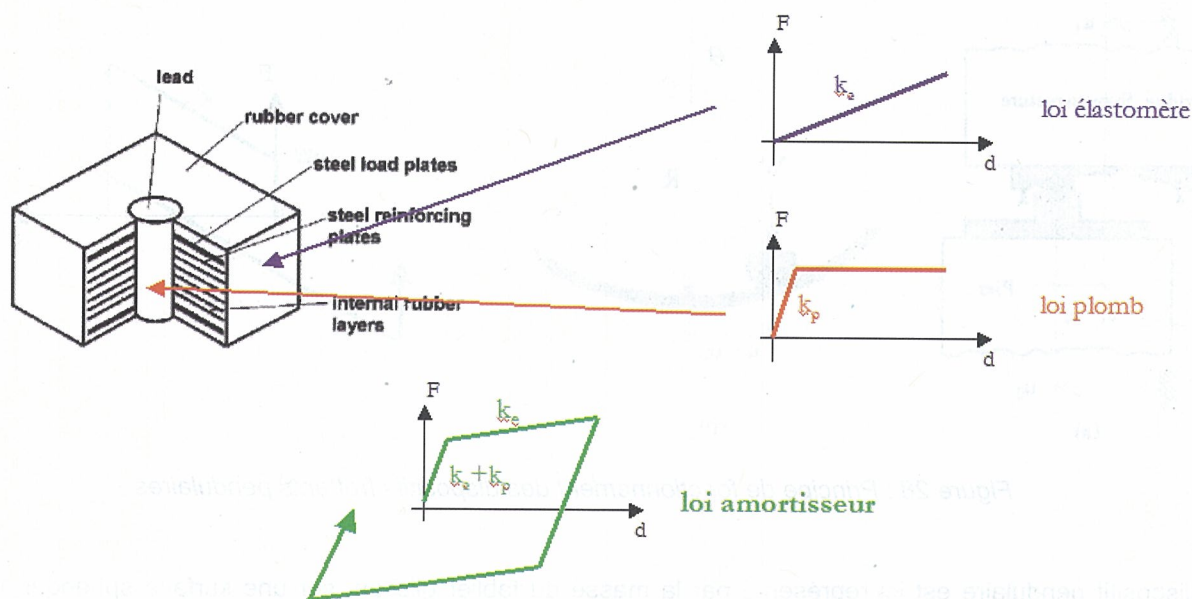


Figure 27 : Loi de comportement des appareils d'appui en élastomère à noyau de plomb

La norme NF EN 1998-2 (EC8-2) préconise de dimensionner ces dispositifs sur la base d'un coefficient de fiabilité $\gamma_{IS} = 1,50$ à appliquer au déplacement de calcul, lui-même établi en tenant compte de la variabilité des propriétés des dispositifs (cf. EC 8-2, §4.2.4.5).

Le reste de la structure (attaches des dispositifs et éléments structuraux de l'ouvrage) doit être dimensionné en appliquant le principe du dimensionnement en capacité en prenant comme valeur du coefficient de sur-résistance $\gamma_{Rd} = 1,1$ (cf. NF EN 15129 §4.3.2), qui se cumule à une majoration forfaitaire de 30% de la rigidité du dispositif (cf. NF EN 1998-2 §5.3(8)P) sous l'effet du déplacement majoré par γ_{IS} .

3.1.2.5 Les dispositifs "frottants pendulaires"

Le principe des dispositifs frottants pendulaires consiste à utiliser la gravité comme force de recentrement. Pour un pendule réel de masse M et de rayon R (Figure 28b), la période de vibration est indépendante de M . Elle est donnée par l'équation :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

La raideur horizontale du système est donc :

$$K = \pm \frac{M(g \pm a_v)}{R} = \frac{W'}{R}$$

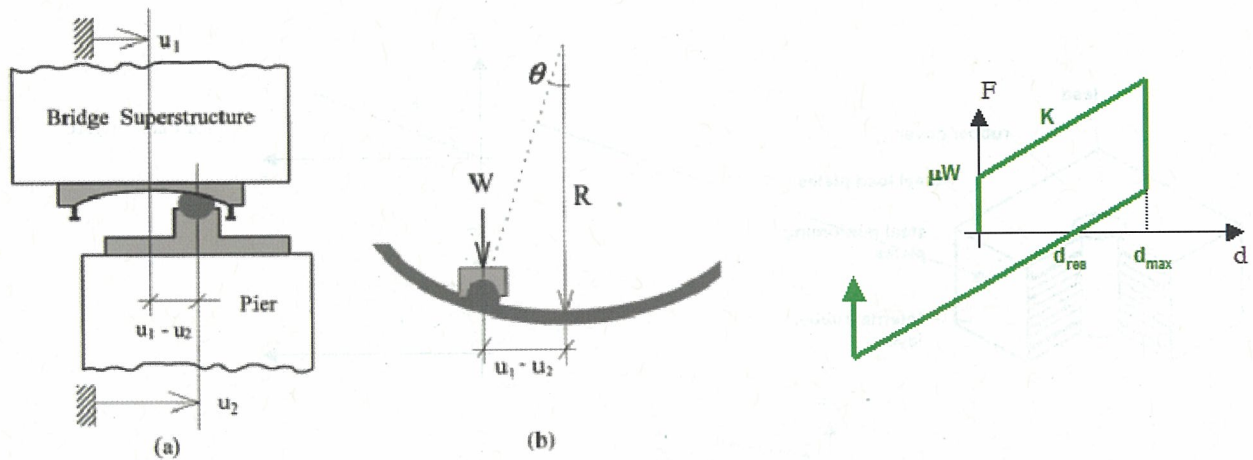


Figure 28 : Principe de fonctionnement des dispositifs frottants pendulaires

Le dispositif pendulaire est ici représenté par la masse du tablier glissant sur une surface sphérique en acier recouverte d'une couche de PTFE à coefficient de frottement μ plus ou moins élevé.

Le système est bloqué tant que la sollicitation horizontale est inférieure à la force d'adhérence μW . Au-delà, son comportement est décrit par la relation :

$$F = \frac{W}{R} d + \mu \cdot W \cdot \text{sign}(d)$$

Le déplacement résiduel d_{res} à la fin de la sollicitation est donc égal à μR .

Le choix des dimensions des dispositifs frottants pendulaires est relativement simple. Il s'agit de :

Déterminer la période T requise pour la structure ;

En déduire à partir de l'équation $T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$, le rayon de l'appareil ;

Déterminer les dimensions du dispositif, de telle sorte que $d_{\text{max}} < 0,25 R$ (condition de validité de l'équation générale du comportement du dispositif).

Ce type de dispositifs peut être petit ou très grand (jusqu'à 5 m de diamètre), en fonction de la masse du tablier (Photo 7).



Photo 7 : Dispositifs frottants pendulaires de grandes dimensions utilisés en Californie pour le renforcement parasismique des ponts

La norme NF EN 1998-2 (EC8-2) préconise de dimensionner ces dispositifs sur la base d'un coefficient de fiabilité $\gamma_{IS} = 1,50$ à appliquer au déplacement de calcul, lui-même établi en tenant compte de la variabilité des propriétés des dispositifs (cf. EC 8-2, §4.2.4.5).

Concernant les attaches des dispositifs et les éléments structuraux auxquels ils sont connectés (piles, culées...), ceux-ci doivent être dimensionnés en appliquant le principe du dimensionnement en capacité, avec comme valeur du coefficient de sur-résistance $\gamma_{Rd} = 1,1$ (cf. NF EN 15129 § 4.3.2). Conformément à ce principe, ce coefficient s'applique à la force de frottement maximale du dispositif, en considérant en outre un coefficient supplémentaire γ_{of} d'amplification pour le frottement dû aux effets du vieillissement (cf. NF EN 1998-2 §5.3(7)P). A noter qu'en pratique, l'analyse du comportement dynamique global d'un système équipé de tels dispositifs et intégrant l'effet de la composante verticale (potentiellement différente d'un appui à l'autre en fonction des modes verticaux sollicités) peut soulever des questions théoriques complexes à résoudre et nécessitant le recours à des moyens logiciels très sophistiqués.

3.1.2.6 Les butées parasismiques

Les butées parasismiques ne sont que brièvement évoquées ici car il s'agit généralement d'éléments faisant partie intégrante de la structure (tenons métalliques ou en béton solidaires des chevêtres ou des entretoises de tablier) –cf. Photo 8 et Photo 9.

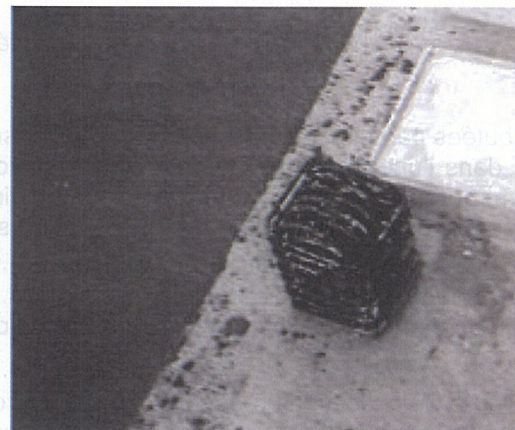
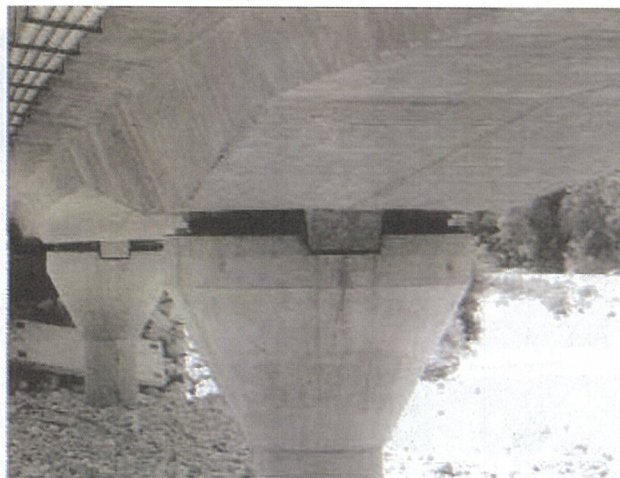


Photo 8 : Exemples de butées béton/béton

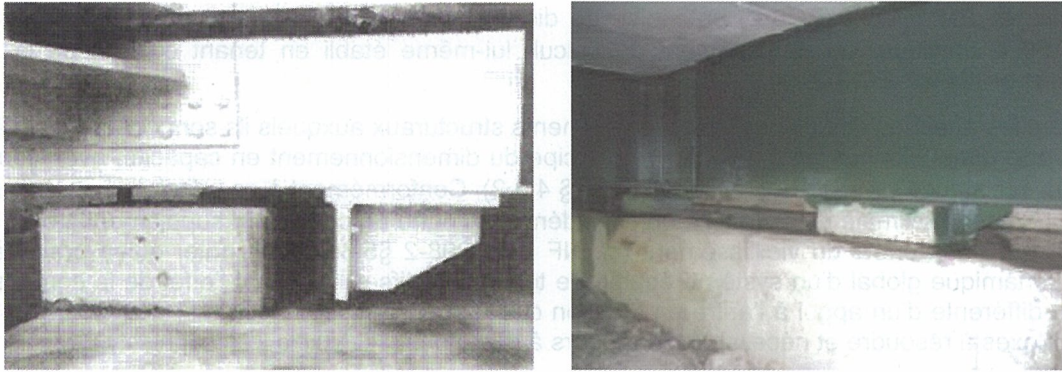


Photo 9 : Exemples de butées métal/béton

Pour des raisons d'optimisation des dimensions, les butées parasismiques peuvent également être constituées d'éléments spécifiques (généralement métalliques) conçus sur mesure et connectés à la structure par une plaque boulonnée (cf. Photo 10).

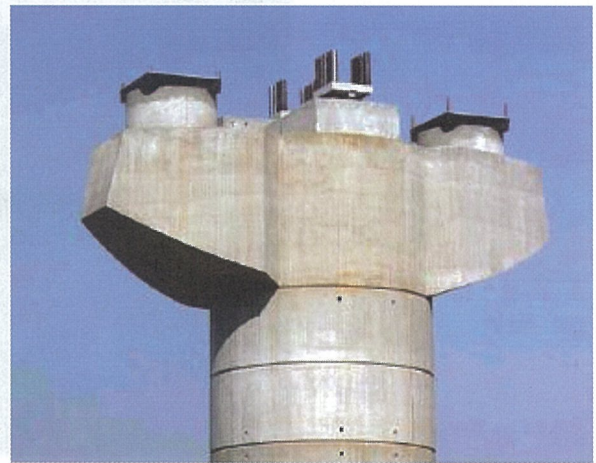


Photo 10 : Exemple de butée en profilé métallique conçu « sur mesure »

Les butées parasismiques sont destinées à assurer un blocage complet du tablier sur ses appuis sous conditions sismiques, dans l'une ou l'autre des directions horizontales longitudinale ou transversale. Ce blocage peut intervenir immédiatement (butées dites « de blocage ») ou en fin de course (butées dites « de sécurité ») d'autres dispositifs tels que les appareils d'appui en élastomère ou les amortisseurs visqueux par exemple [9].

Les butées doivent être disposées avec un jeu minimum de l'ordre de 15 mm permettant de ne pas entraver les libres déplacements du tablier en service (dilatations thermiques, retrait, fluage...) tout en limitant les effets de chocs sous séisme en étant compatible avec les tolérances de réalisation sur chantier.

La Figure 29 ci-dessous présente une disposition possible. La butée est obtenue par des tenons en béton armé solidaires de l'appui ou du tablier et se recouvrant sur une hauteur minimale de 10 cm (afin d'assurer une diffusion suffisante des efforts transmis et réduire les risques de décollement sous séisme vertical). La butée de sécurité ainsi constituée fonctionne dans le sens transversal uniquement. Une autre disposition possible consiste à intégrer les butées dans les murs caches qui reposent sur les chevêtres des culées et jouxtent le tablier.

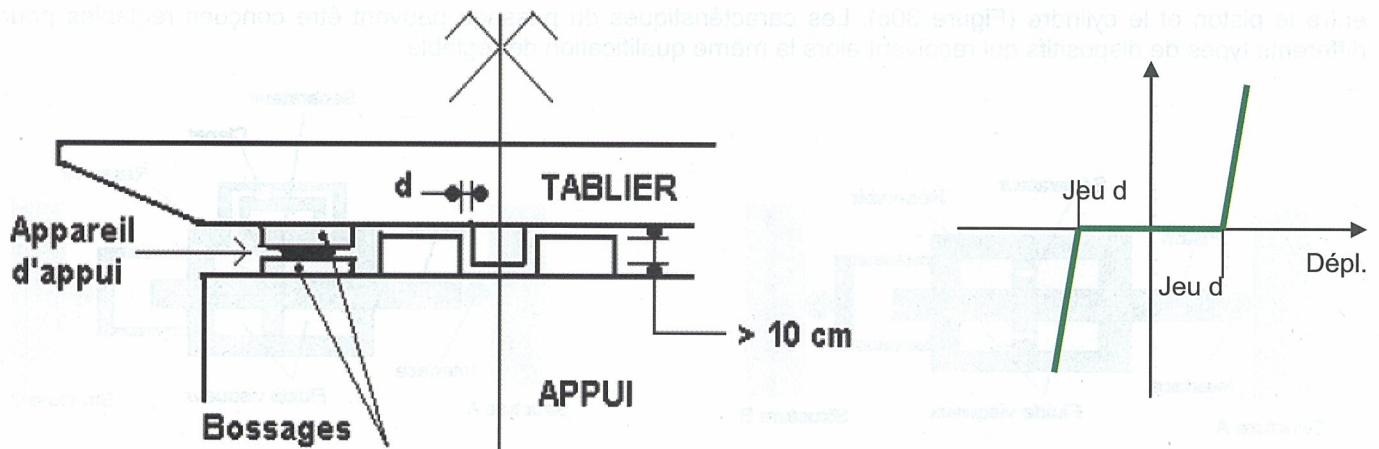


Figure 29 : Exemple de disposition de butée de sécurité transversale et principe de fonctionnement

Il doit enfin être vérifié que les butées n'amènent pas de dispositions préjudiciables à la durabilité des appareils d'appui (évacuation des eaux, possibilités de vérynage, gêne dans les dilatations thermiques...).

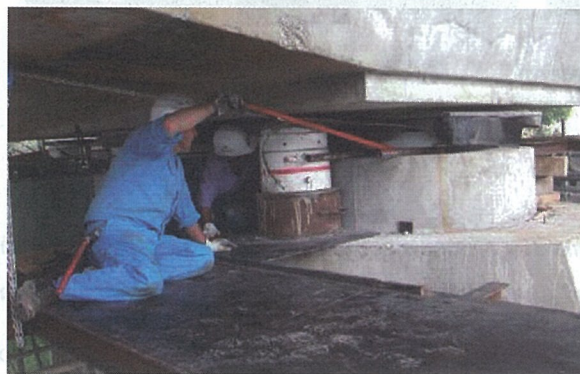


Photo 11 : Contraintes de vérynage et d'accès aux appareils d'appui

3.1.3 LES DISPOSITIFS À COMPORTEMENT NON LINÉAIRE DÉPENDANT DE LA VITESSE

3.1.3.1 Les amortisseurs à fluide visqueux

3.1.3.1.1 Définition

Un dispositif amortisseur interposé entre deux structures a pour but principal de dissiper de l'énergie sous forme de chaleur lorsque ces dites structures se déplacent l'une par rapport à l'autre sous l'action d'un séisme.

Pour assurer la protection parasismique d'ouvrages d'art ou de bâtiments, un amortisseur efficace doit remplir les deux fonctions suivantes :

a) il doit opposer une résistance négligeable au mouvement relatif entre les deux structures résultant des déplacements lents imposés tels que ceux dus à la variation de température, au retrait, au fluage, etc.,

b) sous des sollicitations dynamiques importantes, telles que chocs, vents violents, séismes, etc., il doit réagir en dissipant une énergie suffisante pour en réduire les effets à des valeurs acceptables, tout en opposant une réaction admissible pour les structures à protéger.

3.1.3.1.2 Description des amortisseurs-type

Les amortisseurs à fluide visqueux se présentent généralement sous la forme d'un cylindre rempli de fluide visqueux à l'intérieur duquel coulisse un piston dont la tige traverse les deux extrémités du cylindre (Figure 30). Le cylindre est fixé à l'une des structures et la tige à l'autre. Le piston est muni d'un séparateur qui divise le cylindre en deux chambres distinctes. Le passage du fluide d'une chambre à l'autre est assuré soit par un ou plusieurs orifices dans la tête du piston (Figure 30a), soit par un circuit extérieur au cylindre (Figure 30b), soit encore par un jeu calibré

entre le piston et le cylindre (Figure 30c). Les caractéristiques du passage peuvent être conçues réglables pour les différents types de dispositifs qui reçoivent alors la même qualification de réglable.

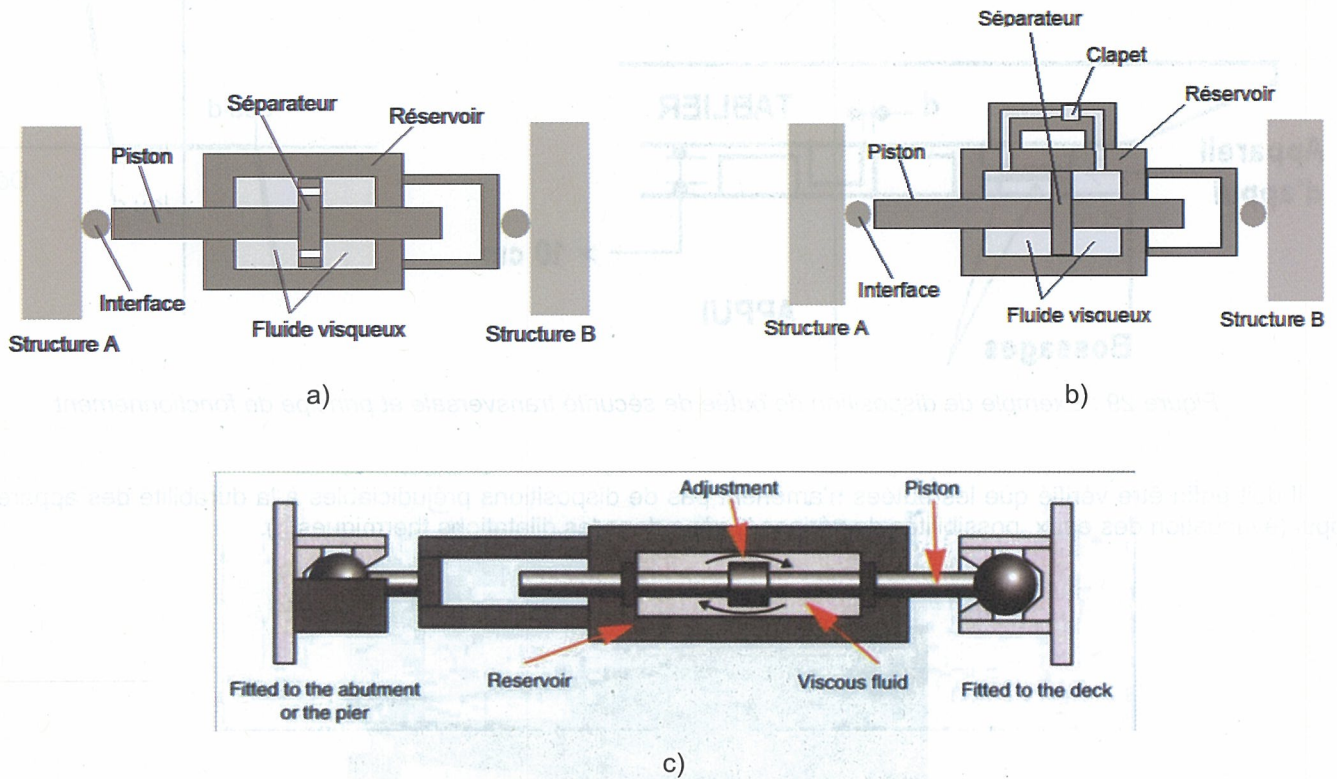


Figure 30 : Coupes schématiques des amortisseurs à fluide visqueux

- a) passage assuré par des orifices percés dans la tête du piston
- b) passage assuré par un circuit extérieur
- c) passage assuré par un jeu calibré entre le piston et le cylindre

Généralement, les cylindres et les pistons sont en acier ou en inox et le fluide peut être une huile de synthèse ou un fluide silicone très visqueux. Des systèmes de liaison articulés relient l'amortisseur aux structures. Les tailles de ces dispositifs peuvent être extrêmement variables (Photo 12 et Photo 13).



Photo 12 : Amortisseur à fluide visqueux de dimension modeste articulé aux extrémités



Photo 13 : Amortisseurs à fluide visqueux de grande dimension

Des dispositifs complémentaires sont également prévus pour limiter dans les chambres les surpressions dues à l'élévation de température (différence des coefficients de dilatation thermique du fluide et de l'acier).

3.1.3.1.3 Principe de fonctionnement

En désignant par:

- S , la section efficace du séparateur (piston ou diaphragme selon type)
- V_1 et V_2 , les volumes respectifs des chambres gauche et droite,
- P_1 et P_2 , les pressions respectives dans les chambres gauche et droite,
- P_0 , la pression commune de V_1 et V_2 lorsque l'amortisseur est au repos,

le fonctionnement d'un amortisseur se résume comme suit :

Au repos, $P_1 = P_2 = P_0$ (éventuellement non nulle). Lors d'un déplacement vers la droite du piston dans le réservoir, P_2 tend à augmenter et P_1 à diminuer le cas échéant ($P_0 > 0$ pression initiale non nulle) et il en résulte une réaction normale $F = S \cdot (P_2 - P_1)$ du fluide sur le piston qui s'oppose au mouvement.

En l'absence d'échange de fluide entre V_1 et V_2 , l'amortisseur agirait en ressort de raideur K , fonction de V_1 , V_2 , de la compressibilité du fluide et de la déformabilité du cylindre.

Nota : Contrairement aux huiles de synthèse, les fluides silicone présentent une compressibilité variant avec la pression et il en résulte un comportement différent selon les conditions de pression initiale. La Figure 31 illustre le phénomène.

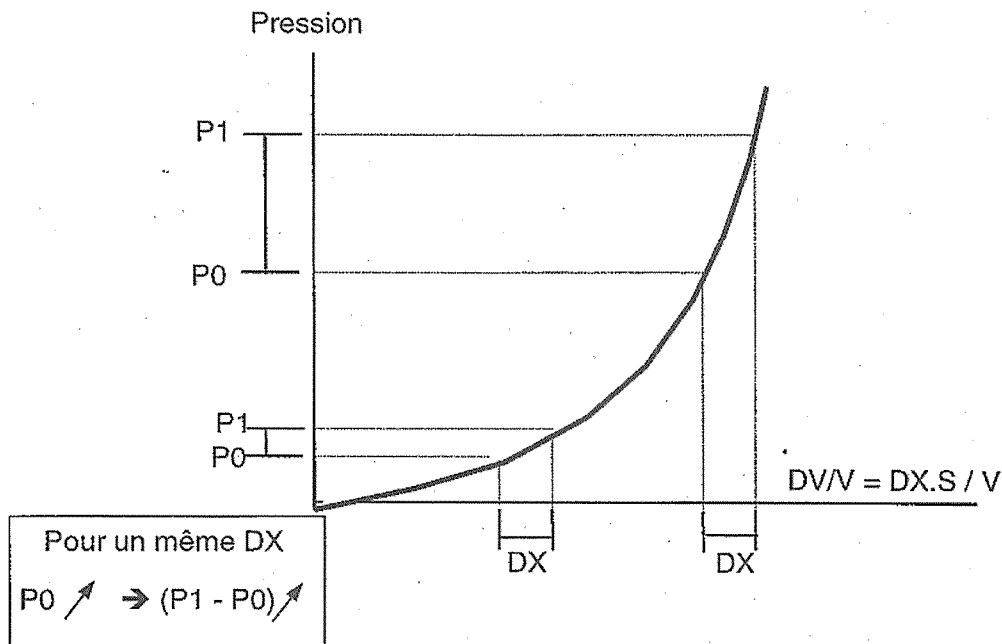


Figure 31 : Compressibilité d'un fluide à base de silicone

La communication de V_1 et V_2 lors du mouvement relatif des deux structures provoque l'écoulement du fluide de V_2 à V_1 et influe sur l'accroissement de la quantité $(P_2 - P_1)$ en fonction de la viscosité du fluide, des caractéristiques du passage et de la vitesse du mouvement relatif des structures. L'écoulement forcé entraîne la dissipation d'énergie recherchée et la quantité $F = S \cdot (P_2 - P_1)$ mesure la résistance exercée par l'amortisseur au mouvement relatif.

3.1.3.1.4 Modélisation

La prise en compte d'amortisseurs visqueux dans un modèle de calcul de structure peut rendre utile le recours à une modélisation mathématique simplifiée des amortisseurs.

L'expression généralement retenue est de la forme: $F = K \cdot x_1 = C \cdot \dot{x}_2^\alpha$ et est associée au schéma représenté par la Figure 32.

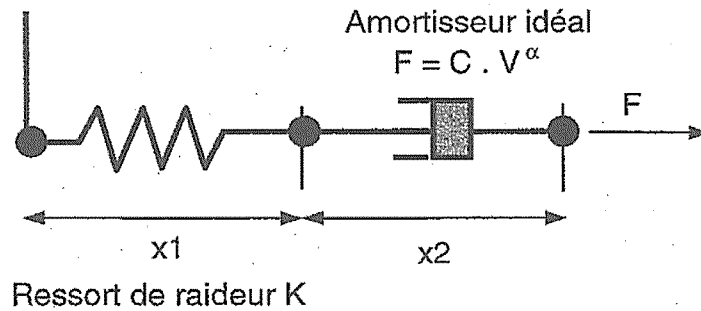


Figure 32 : Schéma représentant le modèle $F = K \cdot x_1 = C \cdot \dot{x}_2^\alpha$

$x_{1,0}$ et $x_{2,0}$ sont les longueurs initiales du système ressort-amortisseur en série.

x est la variation de distance entre les deux structures, x_1 et x_2 les variations de longueur respectivement de la fonction « ressort pur » et de la fonction « amortisseur pur ».

\dot{x} est la vitesse du mouvement relatif des deux structures, \dot{x}_2 celle du mouvement de la fonction « amortisseur pur ».

Nota: Pour certains amortisseurs, le modèle se ramène à $F = C \cdot \dot{x}^\alpha$, ce qui revient à considérer infinie la rigidité de la fonction ressort (Figure 33).

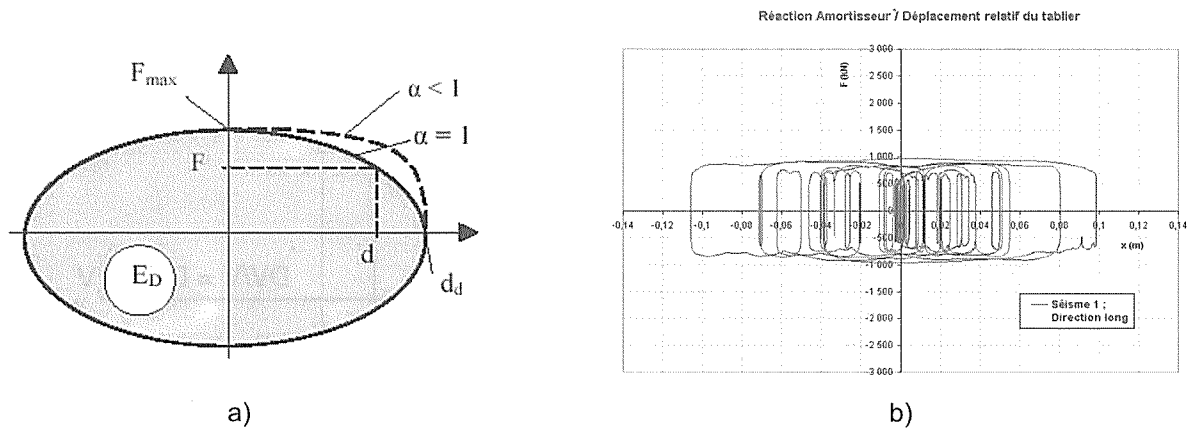


Figure 33 : Loi de comportement des amortisseurs purs ($F = C \cdot V^\alpha$)

- a) théorique
- b) temporelle

Les paramètres de ces expressions doivent être définis en fonction du fluide visqueux utilisé, de la section effective de passage et de la rigidité du cylindre. Pour cela, des essais de tout ou partie de l'amortisseur sont nécessaires (cf. § 5).

La norme NF EN 1998-2 (EC8-2) préconise de dimensionner ces dispositifs sur la base d'un coefficient de fiabilité $\gamma_{IS} = 1,50$ à appliquer au déplacement de calcul, lui-même établi en tenant compte de la variabilité des

propriétés des dispositifs (cf. EC 8-2, §4.2.4.5). Pour les amortisseurs visqueux $F=C.V^\alpha$, la majoration correspondante de l'effort transmis est $\gamma_{IS}^{\alpha/2}$ (cf. EC 8-2 §7.6.2(4)NOTE).

Le reste de la structure (attaches des dispositifs et éléments structuraux de l'ouvrage) doit être dimensionné en appliquant le principe du dimensionnement en capacité en prenant comme valeur du coefficient de sur-résistance $\gamma_{Rd} = 1,1$ (cf. NF EN 15129 §4.3.2), qui se cumule à une majoration forfaitaire de 30% de la rigidité du dispositif (cf. NF EN 1998-2 §5.3(8)P) sous l'effet du déplacement majoré par γ_{IS} .

3.1.3.2 Les dispositifs ressorts-amortisseurs précontraints (RAP)

3.1.3.2.1 Définition

Un ressort amortisseurs précontraint, désigné par la suite par les initiales RAP, a pour but d'assurer, dans un sens d'action donné et lorsqu'il est interposé entre deux structures, trois fonctions :

- en service, se comporter comme une liaison rigide entre les deux structures dans le sens d'action. (Figure 36a)

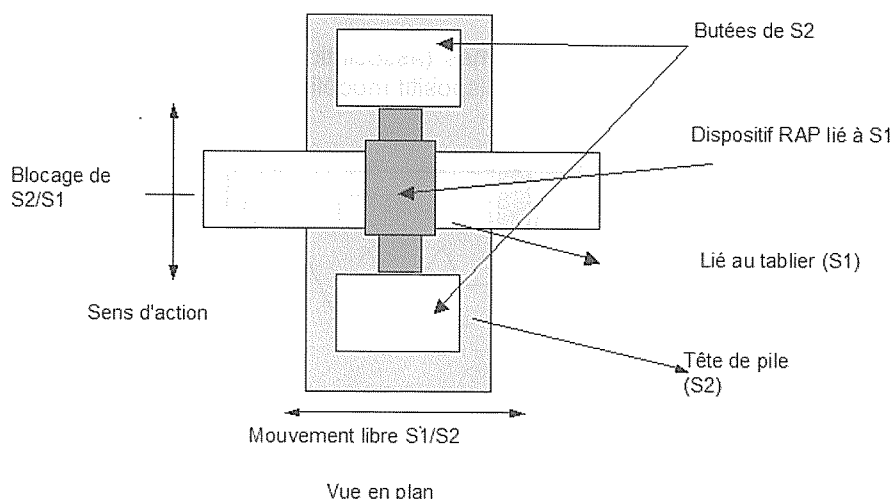


Figure 34 : Exemple d'installation d'un RAP entre 2 structures S1 et S2

- sous des sollicitations dynamiques importantes, telles que chocs, vents violents, séismes, etc., il doit se comporter comme l'association en parallèle d'un ressort et d'un amortisseur dissipateur d'énergie dans le sens d'action. (Figure 36b).

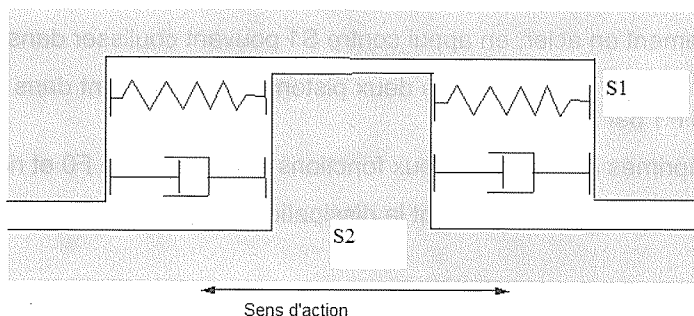


Figure 35 : Autre exemple d'installation de RAP en opposition

Après la fin de la sollicitation dynamique précédente, les deux structures S1 et S2 peuvent ne pas être repositionnées comme avant la-dite sollicitation, alors le dispositif RAP devra assurer automatiquement ce repositionnement par lui-même (Figure 36c). De plus, le dispositif RAP devra assurer ces mêmes fonctions avec des caractéristiques non-dégradées.

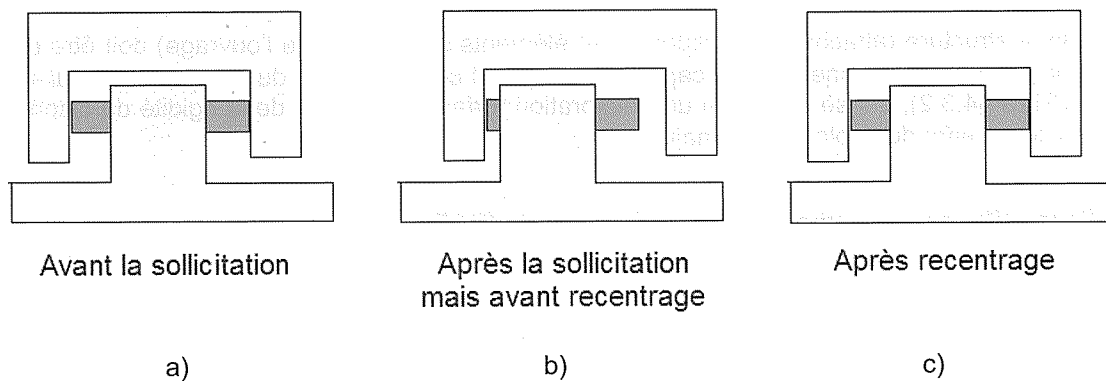


Figure 36 : Fonctionnement d'un RAP au cours d'un séisme

3.1.3.2.2 Description

Le RAP peut se présenter sous de multiples formes (association de produits à fonctions uniques, à base de fluide compressible et visqueux, etc.), nous décrivons le dispositif modélisé par la Figure 37.

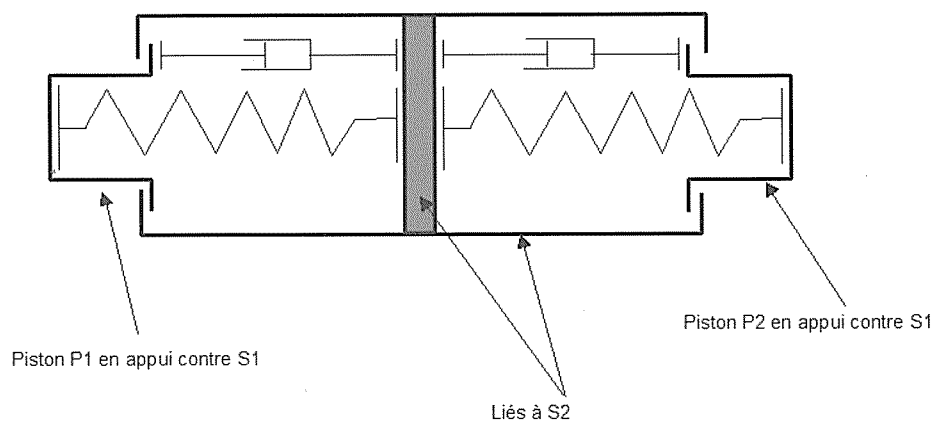


Figure 37 : Schéma de fonctionnement d'un RAP entre deux structures S1 et S2

Il se compose de :

- deux pistons généralement en acier, en appui contre S1 pouvant coulisser dans un guide lié à S2 ;
- un cylindre extérieur, guidant axialement les deux pistons et les bloquant dans le sens de la détente (vers la gauche pour le piston P1 par exemple) ;
- deux ressorts précomprimés assurant les deux fonctions : précontrainte F_0 et rigidité K ;
- deux amortisseurs à fluide visqueux assurant la dissipation d'énergie.

3.1.3.2.3 Principe de fonctionnement

Supposons une force d'action F de S1 sur S2 vers la droite.

- Si cette force est inférieure à la précontrainte F_0 du ressort, P1 ne bouge pas, il n'y a pas de mouvement relatif entre S1 et S2.
- Si $F > F_0$, S1 déplace P1 vers la droite en comprimant le ressort et l'amortisseur de la chambre de gauche.
- Si le piston est dans un état comprimé après l'action dynamique et que l'effort exercé par S1 sur S2 est inférieur à F_0 , alors le dispositif repositionne S1 par rapport à S2 comme avant la sollicitation.

3.1.3.2.4 Modélisation

La prise en compte de ressorts amortisseurs précontraints dans un modèle de calcul de structure peut rendre utile le recours à une modélisation mathématique simplifiée de ces dispositifs.

L'expression généralement retenue est de la forme : $F = F_0 + K \cdot x + C \cdot v^\alpha$ et est associée au schéma représenté par la Figure 38 ci-dessous, dans lequel :

- F_0 et K sont la précontrainte et la raideur du ressort,
- x et v sont les abscisses et vitesses axiales d'un des 2 pistons
- α est l'exposant de la vitesse dans le cas d'un amortisseur à fluide visqueux.

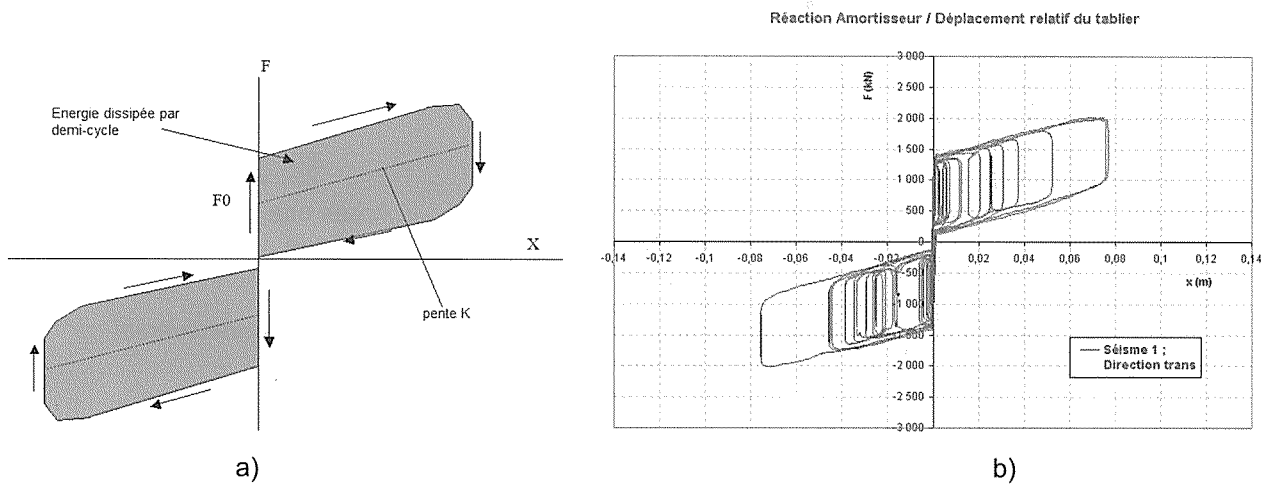


Figure 38 : Diagramme Effort/Course d'un ressort amortisseur précontraint soumis à une action cyclique

a) Diagramme théorique

b) Représentation temporelle

L'application du principe de dimensionnement en capacité est identique au cas précédent.

3.1.3.2.5 Exemple d'application

L'exemple suivant explique l'intérêt, tant du point de vue conception que du point de vue économique, de l'utilisation des RAP.

Considérons un tablier bloqué transversalement sur les têtes de piles et culées.

Si le pont est construit en zone sismique, lors d'un tremblement de terre transversal, la colonne de pile entraîne l'ensemble chevêtre en tête de pile + travée de tablier, rigidement liés par hypothèse, dans son mouvement oscillatoire (Figure 39).

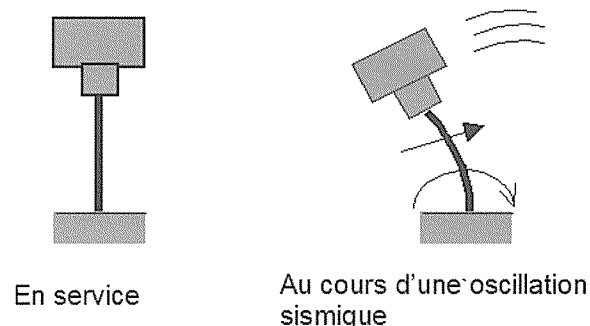


Figure 39 : Réponse d'un ensemble pile-tablier au cours d'un séisme transversal
(cas d'une liaison parfaitement rigide)

Ce mouvement « forcé » induit un effort tranchant **T** et donc un moment **M** en pied de pile très élevé. Si **T** et/ou **M** sont inacceptables, une autre solution est à envisager. Cependant, même si **T** et/ou **M** sont acceptables, une solution réduisant ces valeurs permettrait automatiquement de décroître le ferrailage des piles et les dimensions des fondations.

Une solution qui permet de décroître **T** et **M** consiste à garder la liaison rigide en service du tablier à la tête de pile mais d'autoriser, durant l'oscillation sismique, un mouvement relatif élastique et amorti des deux parties (Figure 40).

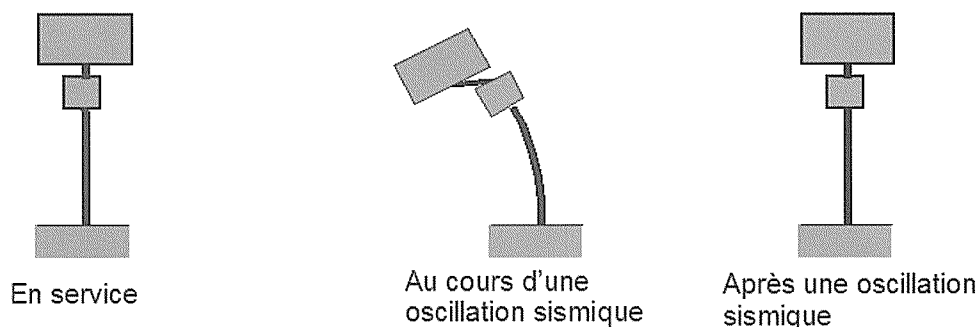


Figure 40 : Réponse d'un ensemble pile-tablier au cours d'un séisme transversal
(cas de l'utilisation d'un RAP)

Il est vrai que la création d'une rotule plastique en base et/ou en tête de pile aboutit au résultat escompté, mais des systèmes mécaniques remplissant la même fonction et qui de plus, sont régénérables (pas de réparation après sollicitation sismique) existent.

Ceux-ci devront assurer une fonction **ressort**, pouvoir **amortir** les vibrations, et de plus être capables de repositionner automatiquement les deux masses après l'action sismique, grâce à la fonction **précontrainte** qui augmente la capacité de retour du ressort tout en assurant le blocage du système en service. Plusieurs types de dispositifs ou systèmes formés de plusieurs dispositifs assurent ces trois fonctions.

3.1.3.3 Les connecteurs dynamiques-transmetteurs d'efforts

3.1.3.3.1 Définition

Un dispositif transmetteur d'effort, placé entre deux structures S1 et S2, a pour but principal de connecter rigidement ces dites structures lors d'un mouvement relatif rapide de S1 par rapport à S2 et d'opposer une résistance faible à un mouvement relatif lent de S1 par rapport à S2.

En ce qui concerne la protection parasismique des ouvrages d'art et des bâtiments, le transmetteur d'effort idéal (le plus efficace) doit remplir les deux fonctions suivantes:

- sous des mouvements de service entre structures (dilatation thermique, retrait, fluage etc.), celui-ci doit résister avec une réaction quasiment nulle ;
- sous des sollicitations dynamiques (séisme, vent, freinage), il doit connecter S1 et S2 avec une certaine raideur que nous définirons par la suite.

Nota : Tous les transmetteurs d'effort n'ont pas les mêmes principes de fonctionnement et descriptifs que celui représenté ci-dessous, mais leurs lois de comportement sont régies par les mêmes facteurs (F_{st} , K_d).

3.1.3.3.2 Description d'un transmetteur d'effort type

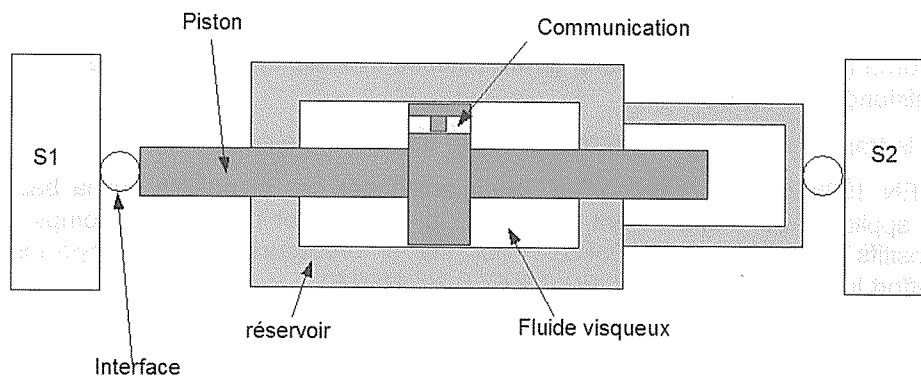


Figure 41 : Schéma descriptif d'un transmetteur d'effort type

Un transmetteur d'effort à fluide visqueux type se compose principalement :

- d'un réservoir métallique indéformable ;
- d'un piston métallique pouvant se mouvoir par coulissement dans le réservoir ; ce piston est pourvu d'une pièce métallique séparant le réservoir en deux chambres ; une communication est établie pour assurer le passage du fluide entre les deux chambres ;
- du fluide visqueux proprement dit, remplissant le volume libre intérieur du réservoir ; des parties annexes (par exemple des vases d'expansion) peuvent s'ajouter pour assurer au fluide une pression initiale non nulle ;
- des interfaces reliant l'amortisseur aux structures.

3.1.3.3.3 Principe de fonctionnement

Soit :

- **S** la section efficace du séparateur
- **V1** et **V2** les noms des chambres gauche et droite
- **P0** la pression commune de V1 et V2 lorsque le transmetteur d'effort est au repos
- **P1** et **P2** respectivement, les pressions, à tout moment, du fluide dans les chambres gauches et droites du réservoir.

Au repos, $P1=P2=P0$.

Lors d'un déplacement lent vers la droite, par exemple, du piston dans le réservoir, la communication reste ouverte le fluide traverse librement cette communication afin d'équilibrer P1 et P2, il en résulte une réaction axiale **Fst** (donnée par $Fst = S.(P2-P1)$) du fluide sur le piston et dirigée vers la gauche très faible (quasiment nulle).

Lors d'un déplacement rapide vers la droite, par exemple, du piston dans le réservoir, la surpression dans V2 obture la communication. P2 et P1 varient en sens inverses, ce qui provoque une augmentation de l'effort axial F (toujours donné par la relation $F = S.(P2-P1)$). Il est bon de noter que F augmente presque proportionnellement au déplacement. Nous en déduisons que dans, ce cas de fonctionnement, le transmetteur d'effort agit comme un ressort de forte raideur.

$Kd = F / X$ (F = effort axial obtenu après un déplacement X).

Kd dépend étroitement de **V1**, **V2**, **P0** et de la **compressibilité** du fluide (cf. § 3.1.3.1 "Les amortisseurs à fluide visqueux").

Un autre paramètre caractérise le transmetteur d'effort, c'est la vitesse limite **V_L** à partir de laquelle la communication se ferme et reste fermée.

Le dernier paramètre qui caractérise le transmetteur d'effort, est l'effort maximal admissible **F_{dmax}** transmis par celui-ci lors de l'action dynamique pour laquelle il a été défini.

3.1.3.3.4 Modélisation

En ce qui concerne le comportement à long terme (vitesse très faible), le transmetteur d'effort est modélisé par un frotteur à faible résistance F_{st} ($F_{st} \approx 0$)

En dynamique, le transmetteur d'effort est modélisé par un ressort de raideur K_d .

La norme NF EN 1998-2 (EC8-2) préconise de dimensionner ces dispositifs sur la base d'un coefficient de fiabilité $\gamma_{IS} = 1,50$ à appliquer au déplacement de calcul, lui-même établi en tenant compte de la variabilité des propriétés des dispositifs (cf. EC 8-2, §4.2.4.5). Pour les amortisseurs visqueux hydrauliques, la majoration correspondante de l'effort transmis est $\gamma_{IS}^{\omega/2}$ (cf. EC 8-2 §7.6.2(4)NOTE).

Le reste de la structure (attaches des dispositifs et éléments structuraux de l'ouvrage) doit être dimensionné en appliquant le principe du dimensionnement en capacité en prenant comme valeur du coefficient de sur-résistance $\gamma_{Rd} = 1,1$ (cf. NF EN 15129 §4.3.2), qui se cumule au coefficient de majoration de l'effort $\gamma_{IS}^{\omega/2}$ correspondant à la réaction maximale du dispositif sous l'effet du déplacement majoré par γ_{IS} .

3.1.3.3.5 Conception (exemple d'application)

Dans la conception parasismique des ponts, le transmetteur est utilisé pour répartir, en longitudinal, l'effort sismique sur plusieurs piles. L'exemple suivant présente un cas concret d'utilisation et explique l'importance de K_d dans le but recherché.

Exemple :

Soit un pont de 4 travées à piles d'égales rigidités longitudinales K_p , fixé en service à la pile centrale.

Séisme longitudinal ($A_{\max \text{ sol}} = A$)

1 - si, seule la pile centrale est fixée au tablier, l'effort tranchant résultant est donné en général (branche descendante du spectre) par une relation du type : $V_1 = A \cdot S \cdot \sqrt{(K_p \cdot M)}$,

avec $A = A_{\max}$, $S = \text{coef dépendant du site}$.

2 - si, les 4 autres piles sont connectées au tablier par des transmetteurs d'effort de raideur K_d , la rigidité K du système tablier et des 5 piles connectées est donnée par $K = K_p + 4 K_{ser}$, avec $1/K_{ser} = 1/K_p + 1/K_d$ (souplesse globale de la pile et du transmetteur d'effort en série).

L'effort tranchant V sur la pile centrale est tel que

$$V_2 = [A \cdot S \cdot \sqrt{(K \cdot M)}] \cdot K_p / K$$

$$\text{si } K_d \gg K_p, \text{ alors } V_2 = V_1 / \sqrt{5} = V_1 / 2,2$$

$$\text{si } K_d = K_p, \text{ alors } K = 3 K_p \text{ et } V_2 = V_1 / \sqrt{3} = V_1 / 1,7$$

$$\text{si } K_d \ll K_p, \text{ alors } V_2 = V_1$$

Nous remarquons donc que le gain en effort dépendra étroitement de K_d .

3.1.3.4 Autres types de dispositifs

3.1.3.4.1 Systèmes de contrôle actifs.

Le terme actif est utilisé pour indiquer que le fonctionnement du système de contrôle demande une quantité d'énergie externe. Les propriétés mécaniques des systèmes actifs s'adaptent en fonction de la réaction de la structure à laquelle ils sont reliés. Les forces de réactions sont généralement créées par des actionneurs électro-hydrauliques qui exigent une source de puissance élevée (de l'ordre de dizaines de kilowatts). Les systèmes actifs peuvent aussi être utilisés comme systèmes de dissipation d'énergie actifs par leur capacité à modifier le niveau d'amortissement

dans une structure avec une modification significative de la rigidité. Cela suppose néanmoins que la source d'énergie sensée adapter en temps réel les caractéristiques du dispositif en fonction de la réponse dynamique de la structure n'est pas elle-même endommagée par le séisme.

3.1.3.4.2 Systèmes de contrôle semi-actifs.

L'utilisation de systèmes de contrôle passifs et actifs représente deux extrêmes pour la dissipation d'énergie en cas de mouvement sismique. Un compromis entre ces deux extrêmes est le système de contrôle semi-actif qui a été développé pour tirer avantages des meilleures caractéristiques des systèmes actifs et passifs. Le terme semi-actif est utilisé pour indiquer que le fonctionnement de ces systèmes demande une faible quantité d'énergie externe (de l'ordre de dizaines de watts). Comme dans un système actif, les propriétés mécaniques s'adaptent en fonction de la réaction de la structure à laquelle le système de contrôle est relié. Comme dans un système passif, le système de contrôle semi-actif utilise le mouvement de la structure pour créer les forces de contrôle. Les forces de contrôle sont développées par un ajustement approprié des caractéristiques d'amortissement ou de rigidité du système de contrôle semi-actif. De plus, les forces de contrôle sont toujours opposées au mouvement de la structure et améliorent ainsi la stabilité. Les systèmes de contrôles semi-actifs sont conçus pour qu'ils puissent garantir les caractéristiques d'amortissement prescrites ou les caractéristiques de rigidité prescrites en cas de coupure totale de la source de puissance.

La Figure 42 ci-dessous montre la conception d'un dispositif de contrôle semi-actif dont le fonctionnement est similaire à un amortisseur à fluide visqueux excepté que, grâce à la vanne de contrôle, il peut fournir soit deux niveaux d'amortissement distincts soit une gamme d'amortissement comprise entre une limite inférieure et une limite supérieure.

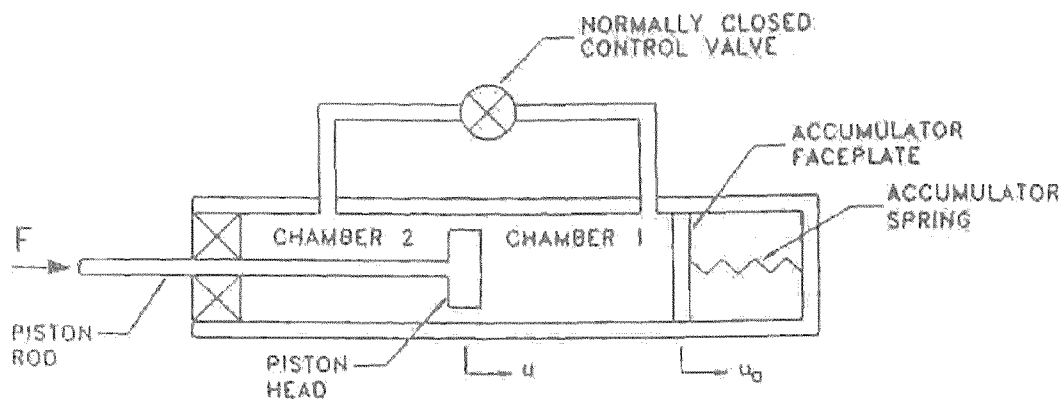


Figure 42 : Schéma de principe d'un dispositif semi-actif

La partie passive d'un amortisseur semi-actif consiste en une tige de piston en inox avec une tête en bronze et un accumulateur. L'amortisseur est rempli de fluide silicone. Le débit du fluide est réglé par un thermostat passif bimétallique qui permet un fonctionnement stable en fonction d'une large gamme de température (-40°C à 70°C). La force créée par l'amortisseur passif est le résultat de la différence de pression à travers la tête de piston. L'orifice dans l'amortisseur passif autorise le passage du fluide à travers des passages de forme spécialement étudiée pour changer les caractéristiques du débit à des vitesses de fluide telles que la force de réaction soit proportionnelle à la vitesse relative de la tête de piston dans le logement de l'amortisseur. Pour convertir l'amortisseur à fluide visqueux passif en un amortisseur à fluide visqueux semi-actif, un by-pass externe est créé pour faire passer une partie du fluide par un tube et une vanne de contrôle (Figure 42). La quantité de fluide qui passe à travers ce chemin externe est déterminée par l'ouverture de l'orifice de la vanne de contrôle. Un amortissement élevé est obtenu lorsque la vanne de contrôle est fermée et un amortissement faible est obtenu lorsque la vanne de contrôle est ouverte. Un niveau d'amortissement intermédiaire peut être obtenu par le positionnement de la vanne de contrôle à une position intermédiaire entre la position fermée et ouverte.

En général, la force de réaction du système est donnée par la relation : $F = C(U) \cdot \dot{u}$

où $C(U)$ est le coefficient d'amortissement qui est fonction de la tension de commande U ,
 \dot{u} est la vitesse relative de la tête de piston.

Notons qu'en général, $C(U)$ est limité par une valeur maximale (C_{max}) et une valeur minimum (C_{min}) et peut prendre toute valeur comprise entre ces deux limites.

L'amortisseur semi-actif utilise une servo-vanne à conduite directe qui permet un contrôle électrique des éléments de la vanne sans nécessité d'avoir une source de pression hydraulique. La servo-vanne est normalement fermée et offre les caractéristiques de sécurité en cas de perte de puissance par un fonctionnement dans ce cas de l'amortisseur semi-actif comme un amortisseur passif avec des caractéristiques d'amortissement élevé. De plus, la servo-vanne demande une puissance de pointe de 3,5 W et peut donc fonctionner sur la puissance d'une batterie ce qui est critique pendant un tremblement de terre lorsque la source principale de courant d'une structure peut ne pas fonctionner. La force de réaction d'un amortisseur semi-actif est en première approximation le résultat de la différence de pression à travers la tête de piston et est donnée par la relation :

$$F = P1.A_p - P2.(A_p - A_r) + F_f .\text{sgn}(\dot{u})$$

où P1 et P2 sont les pressions dans la chambre 1 et 2,

A_p est la surface de la tête de piston, A_r est la surface de la tige de piston,

F_f est l'amplitude de la force requise pour être supérieure à la force de friction entre la tige de piston et les joints,

\dot{u} est la vitesse relative de la tête de piston.

Un modèle mathématique détaillé, basé sur le principe de mécanique des fluides et vérifié expérimentalement, a été développé pour prédire de façon adéquate le comportement de l'amortisseur semi-actif.

Ces systèmes ne sont actuellement pas couverts par la norme NF EN 15129. Néanmoins les principes de cette norme applicable aux dispositifs amortisseurs à fluide visqueux (cf. §3.1.3.1) pourront, sous réserve de quelques adaptations, être extrapolés à ce type de dispositifs. En particulier on adoptera les mêmes coefficients de fiabilité γ_{IS} (ou γ_x) et de sur-capacité γ_{Rd} .

3.2 REGLES DE BONNE CONCEPTION

3.2.1 ELÉMENTS DE CONCEPTION GÉNÉRALE

Selon le type de dispositifs employés et leur disposition dans l'ouvrage, différentes préconisations sont détaillées dans le présent chapitre. Il convient dans tous les cas de garder à l'esprit que la prise en compte du séisme et les éventuelles modifications du schéma statique ne doivent pas altérer (sans mesure compensatoire clairement explicitée) le comportement en statique (points fixes par exemple). De plus, il convient de vérifier que les dispositions parasismiques mises en place permettent d'éviter le risque d'échappement d'appui.

3.2.1.1 Ouvrages comportant des connecteurs dynamiques

Les connecteurs dynamiques, transparents en service réagissent en pratique comme des éléments élastiques de forte rigidité en cas de séisme.

On peut donc utiliser les méthodes ordinaires de calcul sismique, par exemple :

- Décomposition modale
- Utilisation d'un spectre de réponse
- Prise en compte d'un coefficient de comportement si on accepte une dégradation des piles en cas de séisme comme autorisé par la norme NF EN 1998-2 (EC8-2).

3.2.1.2 Ouvrages comportant des appareils d'appui en élastomère

Les appareils d'appui en élastomère doivent être placés sur le plus grand nombre de piles possible afin de répartir l'effort sismique et d'assouplir la structure.

On peut donc utiliser les méthodes ordinaires de calcul sismique : décomposition modale et utilisation d'un spectre de réponse (généralement associé à un coefficient de comportement limité à 1, sauf justification spécifique).

3.2.1.3 Ouvrages comportant des amortisseurs disposés en parallèles

Cette disposition, représentée par la Figure 43 ci-dessous, est utilisée principalement dans la direction longitudinale.

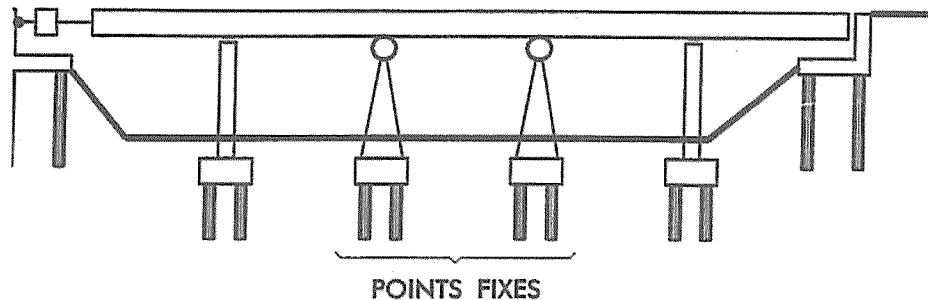


Figure 43 : Schéma de principe d'amortisseurs disposés en parallèle

Le tablier est lié à une ou plusieurs piles (points fixes) ; un ou des amortisseurs relient le tablier à la culée ou à des piles. En cas de séisme les mouvements du sol sont transmis au tablier par les points fixes.

En l'absence d'amortisseurs, l'énergie accumulée par la structure se retrouve sous forme d'énergie de déformation. 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 pour autant que soient probables des dégradations des piles. Si une telle conception est adoptée, on devra utiliser la méthode suivante :

- Calcul temporel à base d'accélérogrammes ou selon méthode simplifiée, la structure étant supposée rester élastique.
- Emploi d'un coefficient de comportement égal à l'unité (le plus souvent).

Comme autre intérêt de la solution on peut citer le maintien en place par les points fixes du tablier qui se retrouve donc théoriquement à sa position initiale après séisme.

L'attention du projeteur est attirée sur les points suivants :

- Pour être pleinement efficaces, les amortisseurs doivent être reliés à des appuis rigides (dans le cas contraire ces appuis se déforment et limitent ainsi le bon fonctionnement des amortisseurs). Il est indispensable de tenir compte dans le modèle de calcul de la raideur de ces appuis.
- Si les amortisseurs sont disposés sur la culée, à une distance trop grande du point fixe, les mouvements du sol ne s'effectuent plus en phase mais peuvent être très dissemblables. L'amortisseur est alors relié à un point du sol mobile par rapport à la fondation du point fixe et son efficacité s'en trouvera réduite. Il est donc indispensable de prendre en compte, dans les calculs, des accélérogrammes différents pour le point fixe et la culée, dès que la distance entre ces appuis dépasse la valeur L_{lim} donnée au §3.3 de l'EC8-2.

Les mouvements réels du sol étant par ailleurs difficilement prédictibles ces accélérogrammes doivent être décorrelés et non simplement déphasés (en tenant compte du temps de propagation des ondes entre les appuis et les conditions géologiques au droit des différents appuis) dès que la distance entre culée et point fixe dépasse la valeur L_g fournie par le tableau 3.1 de l'EC8-2.

Par ailleurs l'efficacité des amortisseurs eux-mêmes dépend de leur raideur qui aura des conséquences d'autant plus importantes que les points fixes seront raides.

En conclusion le domaine idéal d'application de cette technique est :

- Piles point fixes plutôt souples,
- Installation des amortisseurs sur la culée pour les ouvrages courts, sur les piles voisines du point fixe pour les ouvrages longs.

3.2.1.4 Ouvrages comportant des amortisseurs disposés en série

Cette disposition, décrite par la Figure 44 ci-dessous, peut être utilisée dans les deux directions principales.

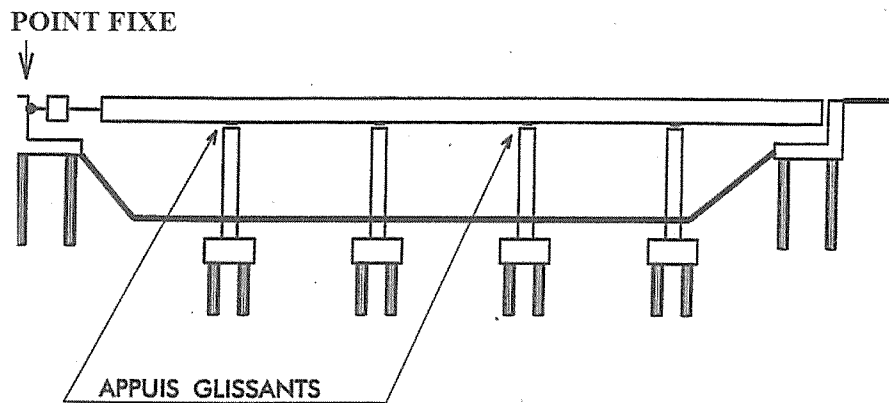


Figure 44 : Schéma de principe d'amortisseurs disposés en série

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

Les amortisseurs fonctionnent comme des ressorts dont la raideur varie considérablement d'un système à l'autre en service, et comme des amortisseurs en cas de séisme. Il s'agit donc :

- Soit d'amortisseurs à base de plastification de métal
- 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 finalement pour rôle de limiter le déplacement du tablier par rapport à la pile pour éviter le risque d'échappement d'appuis et doivent répondre aux critères contradictoires suivants :

- Ne pas fonctionner en service donc rester dans le domaine élastique pour les efforts horizontaux en service.
- Ne pas engendrer de forces d'amortissement trop grandes pour ne pas trop solliciter les appuis
- Engendrer des forces d'amortissement suffisantes pour limiter les déplacements à des valeurs jugées raisonnables

Cette solution doit permettre dans la majorité des cas de réduire les efforts sismiques encore plus que la solution précédente. Elle est a priori moins sensible aux déphasages de mouvement du sol et à la raideur intrinsèque des amortisseurs.

Si des amortisseurs ayant une fonction ressort permanente sont utilisés, le tablier se retrouve après séisme dans sa position théorique.

Si on utilise des amortisseurs élastoplastique cela ne sera pas le cas et de plus, les dispositifs devront bien sûr être changés.

La conception doit se faire comme pour la solution précédente, mais dans le cas des amortisseurs élastoplastiques une intervention après séisme s'avèrera indispensable, il peut être envisagé d'utiliser un coefficient de comportement des piles différent de l'unité sous réserve de prendre en compte le comportement non linéaire des piles et de justifier par le calcul que la plastification des armatures de la pile ne peut survenir avant celle des amortisseurs. Il est à noter que dans cette configuration, l'amortisseur ne peut travailler de façon optimale, une souplesse non négligeable provenant également de la pile qui le supporte. Nous conseillons donc de limiter la valeur de q à 1,5.

3.2.1.5 Ouvrages comportant des butées parasismiques

3.2.1.5.1 Butées de blocage

Les butées de blocage sont destinées, comme leur nom l'indique, à bloquer, dans une direction donnée le déplacement relatif du tablier par rapport à ses appuis sous séisme.

Les butées de blocage reprennent la totalité des efforts sismiques. Elles sont à dimensionner conformément aux règles de l'Eurocode 8-2 en intégrant notamment les coefficients de sécurité partiels matériaux $\gamma_c = 1,3$ et $\gamma_s = 1,0$, le coefficient de sécurité vis-à-vis des ruptures fragiles d'effort tranchant $\gamma_{Bd,0} = 1,25$, ainsi le cas échéant que le coefficient de surcapacité γ_0 résultant du principe de dimensionnement en capacité (efforts résultant de l'atteinte du niveau de plastification dans la pile sous-jacente).

En zone de faible aléa sismique et à condition de pouvoir dimensionner correctement les clavettes, l'ensemble appareils d'appui / butées de blocage pourra éventuellement être avantageusement remplacé par des appareils d'appui fixes ou monodirectionnels.

3.2.1.5.2 Butées de sécurité

Les butées de sécurité entrent dans la famille des attelages sismiques. Elles permettent les libres distorsions des appareils d'appui ou des dispositifs parasismiques sous les actions sismiques de calcul et constituent une deuxième ligne de défense destinée à empêcher le tablier de quitter ses appuis sous l'effet d'un séisme de niveau potentiellement supérieur au séisme de calcul.

L'emploi de butées de sécurité permet notamment de se dispenser de l'application du coefficient de fiabilité $\gamma_{IS} = 1,5$ sur les dispositifs parasismiques (par exemple appareils d'appui en élastomère). Sous séisme, les dispositifs se déforment jusqu'à un niveau prédéfini (jeu entre le dispositif au repos et la butée), ce qui permet de profiter de la dissipation d'énergie ou de l'isolation, puis les butées prennent le relais pour éviter une déformation trop importante et une rupture du dispositif. En contrepartie, les butées sont dimensionnées forfaitairement pour reprendre 75% de l'effort dans le dispositif parasismique (le plus souvent appareil d'appui) en fin de course, et auquel il convient d'appliquer les coefficients de sécurité vis-à-vis des ruptures fragiles d'effort tranchant $\gamma_{Bd,0} = 1,25$, ainsi que les coefficients de sécurité partiels matériaux sous sollicitation sismique $\gamma_c = 1,3$ et $\gamma_s = 1,0$. Cette méthode des 75%, récemment intégrée dans l'annexe nationale de l'Eurocode 8-2, a le mérite de la simplicité. Néanmoins, pour les ouvrages à plus fort enjeu (niveau de sismicité, dimensions et régularité de la structure, capacité plus ou moins grande des appuis -piles, culées et fondations- à supporter des efforts sismiques majorés...), il est recommandé de lui préférer une approche plus scientifique prenant en compte le comportement de la structure avant et après mise en butée, telle que présentée au §4.2.4.5).

Dans la direction longitudinale, la mise en place de butées de sécurité n'est en général pas nécessaire du fait de la sécurité qu'apportent les remblais contre les culées. Néanmoins, lorsque qu'un choc risque de se produire dans une zone d'about sensible (par exemple ancrage de la précontrainte en extrémité de tablier), il est nécessaire de les mettre en œuvre pour protéger cette zone. De telles butées peuvent être envisagées en complément à des dispositifs parasismiques (par exemple appareils d'appui en élastomère)

Enfin, il est rappelé que les butées de sécurité n'entrant en jeu qu'en cas de déformation extrême de l'appareil d'appui, elles doivent donc être conçues de telle sorte qu'elles laissent libre un jeu égal au déplacement calculé sous la combinaison sismique.

3.2.1.5.3 Règles générales de conception

Pour les ouvrages biais, l'orientation des facettes de butée est importante car elle conditionne le bon fonctionnement du tablier. Une disposition adéquate des faces de contact, permet de limiter les phénomènes de rotation d'axe vertical.

Dans le cas d'un tablier bloqué transversalement sur deux lignes d'appuis (les deux culées par exemple), le blocage transversal du tablier sur les autres lignes d'appuis n'est en général pas nécessaire (sauf réseaux majeurs, biais, courbure). Des butées de sécurité sont tout de même conseillées pour les ouvrages de portée supérieure à 40m.

3.2.2 ENVIRONNEMENT DES DISPOSITIFS ET INCIDENCE SUR LES STRUCTURES

Les dispositifs parasismiques sont généralement installés sur les piles ou les culées des ouvrages d'art, au droit des appareils d'appui de reprise des charges verticales, à l'aplomb des systèmes de joints de chaussée, à proximité des points de vérinage, etc. Les efforts à transmettre sont diffusés par l'intermédiaire de systèmes d'ancrages reliés à la structure par des blocs d'appui ou de diffusion des efforts (Photo 14, Photo 15). Cela signifie que dès la conception

du projet, l'ingénieur doit intégrer dans ses études ce choix technologique et vérifier que la structure résiste aux efforts locaux induits par ces dispositifs.



Photo 14 : Blocs d'appui des dispositifs parasismiques



Photo 15 : Ferrailage de diffusion des efforts locaux

Les zones équipées de ces dispositifs seront organisées en fonction des points d'appui situés à proximité, de la circulation du personnel éventuel de maintenance et d'entretien ultérieur avec trous d'homme ou trappes de visite qui seront à prévoir, de la présence d'équipements complémentaires tels que des systèmes de récupération des eaux placés sous les joints de chaussée, ou de dispositifs de précontrainte situés en extrémité d'ouvrage dans des chambres de tirage.

Deux cas de figure peuvent se présenter, selon que l'on s'intéresse à la conception d'ouvrages neufs où une relative liberté existe pour intégrer un dispositif parasismique, ou à des réparations ou mises en conformité d'ouvrages anciens. Dans ce dernier cas, l'ingénieur doit s'adapter à l'existant et imaginer au cas par cas l'installation de ces dispositifs parasismiques.

3.2.2.1 Dispositifs parasismiques avec système d'ancrage indépendant

Dans la plupart des cas, il s'agit de transmettre des efforts horizontaux entre le tablier d'une part, et les piles ou culées d'autre part. Cela conduit généralement à prévoir des blocs d'appui ou des structures annexes recevant les interfaces.

3.2.2.1.1 Installation sur pile.

Plusieurs cas peuvent être envisagés en fonction du matériau des structures, béton ou métallique, du sens d'orientation de l'effort horizontal à transmettre (longitudinal ou transversal) et de la conception générale du projet.

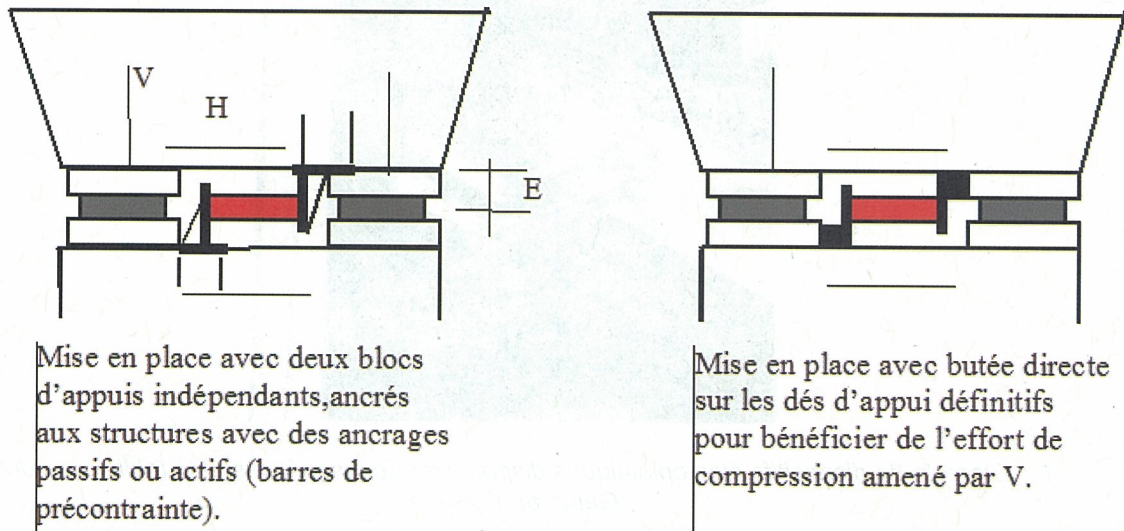


Figure 45 : Ouvrage en béton, sens transversal, mise en place entre deux blocs d'appui indépendants ou non

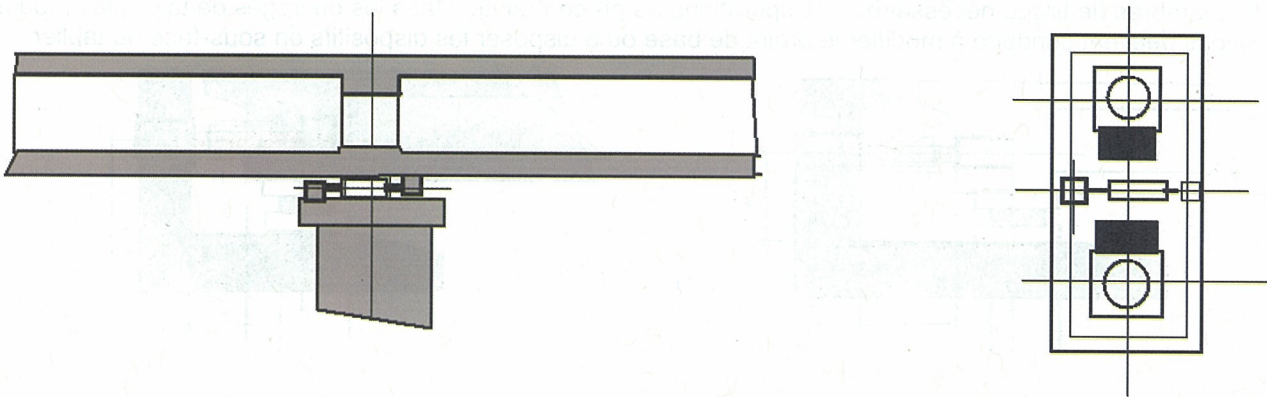


Figure 46 : Ouvrage en béton, mise en place dans le sens longitudinal

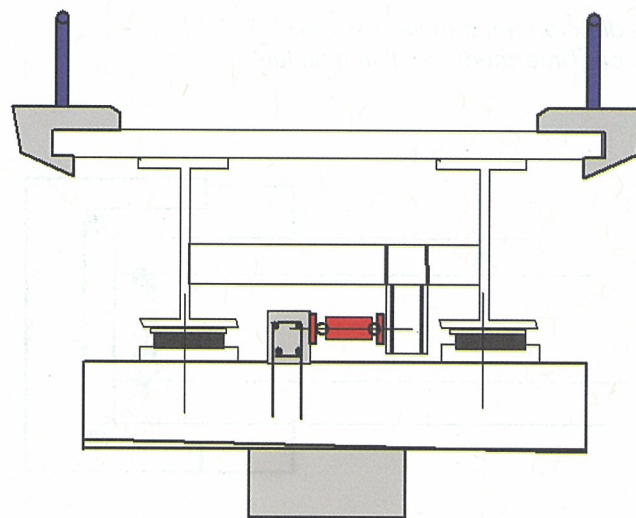


Figure 47 : Ouvrage mixte acier-béton, mise en place avec pièce de pont et bloc d'appui inférieur

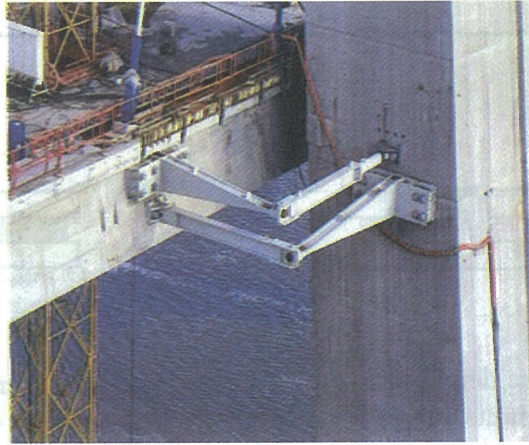


Photo 16 : Exemple de dispositifs élastoplastiques disposés entre les pylônes et le tablier du pont Vasco de Gama au Portugal

3.2.2.1.2 Installation en extrémité d'ouvrage

Dans ce cas, il est généralement possible de transmettre les efforts par butée ou attelage entre extrémité de tablier et mur garde grève ou mur en retour, après un dimensionnement approprié des structures d'appui. Ces techniques de montage nécessitent un recul suffisant, qui existent généralement dans les cas d'ouvrages importants pourvus de chambres de tirage nécessaires aux opérations de précontrainte. Dans les ouvrages de taille plus modeste, ces dispositions peuvent conduire à modifier le projet de base ou à disposer les dispositifs en sous-face du tablier.

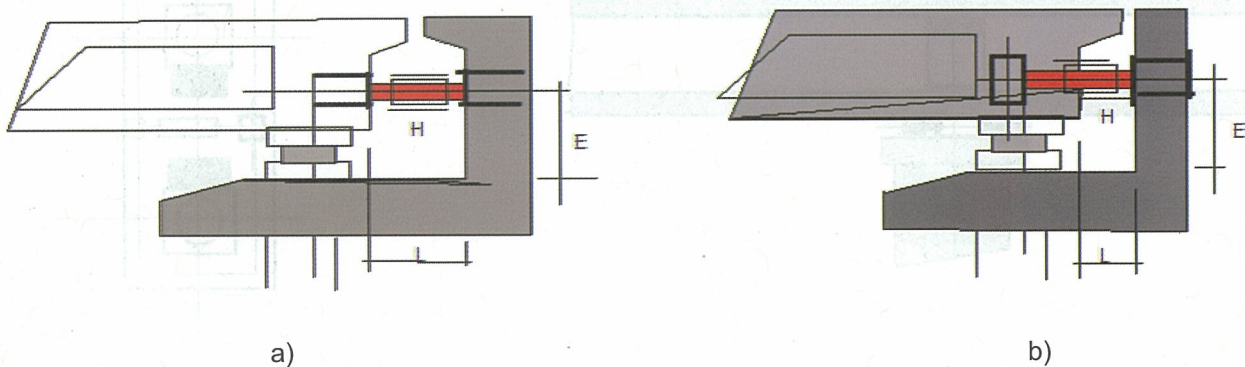


Figure 48 : Installation sur culée entre tablier et garde grève

- a) directement depuis l'extrémité du tablier
- b) par l'intermédiaire d'un bloc latéral

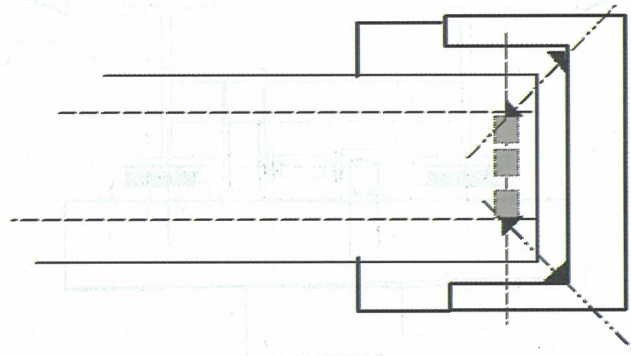


Figure 49 : Dispositifs parasismiques installés à 45° en extrémité d'un pont dalle type PSDP ou similaire

Dans tous ces exemples de montage, les systèmes d'ancrage mis en oeuvre devront faire l'objet de procédures particulières permettant de s'assurer de la bonne implantation des deux interfaces amenées à recevoir le dispositif parasismique qui est un ensemble mécanique, construit avec des tolérances précises. Compte tenu du fait que tablier et piles (ou culées) sont généralement construits en plusieurs phases, des systèmes de réservation et/ou des gabarits de positionnement devront être mis en oeuvre. Ces techniques permettront de s'assurer que les ancrages ont été parfaitement alignés.

Les dispositifs doivent également être conçus pour permettre, dans la majorité des cas :

- une rotation dans un plan horizontal et vertical,
- un dénivelé vertical permettant le vérinage des structures en cas de changement des appareils d'appui, par exemple sur la file concernée, sans avoir à déposer le dispositif parasismique,
- une démontabilité complète à l'aide de platines boulonnées,
- la possibilité de procéder à un pré-réglage en atelier, permettant au dispositif de fonctionner correctement après prise en compte du retrait et fluage, sans risque de butée.

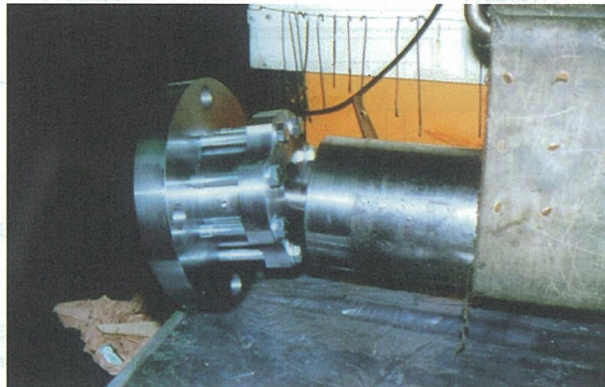


Photo 17 : Extrémité de dispositif permettant les rotations dans les plans horizontal et vertical

3.2.2.2 Dispositifs parasismiques liaisonnés au tablier

La Figure 50 et la Photo 18 illustrent les cas des connecteurs dynamiques ou des ressorts-amortisseurs utilisés pour recentrer les structures.

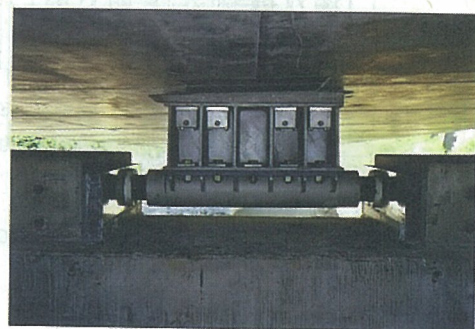
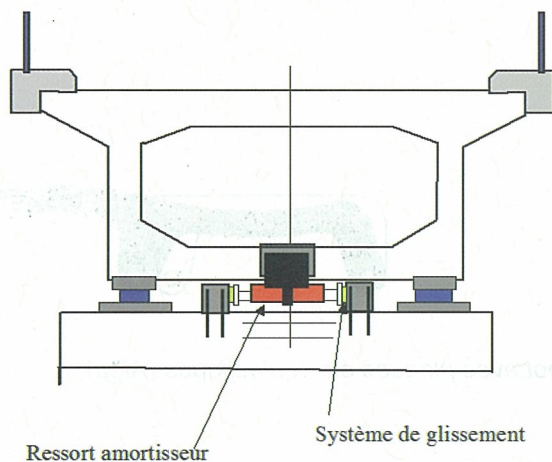


Figure 50 : Ressort amortisseur positionné en transversal avec système de glissement assurant les mouvements longitudinaux

Photo 18 : Ressort amortisseur positionné en transversal

3.2.2.3 Dispositifs intégrés dans les appareils d'appui

Dans certains cas, il peut être judicieux de prévoir des dispositifs particuliers associés aux appareils d'appui ou intégré dans la "technique" de l'appui, par exemple :

3.2.2.3.1 Appareils d'appui élasto-plastiques

Le bloc en élastomère fretté peut dans certains cas comporter une partie ductile permettant un amortissement (cf. § 3.1.1). Ces dispositifs seront mis en oeuvre suivant les règles générales de construction liées aux appareils d'appui. Il sera éventuellement nécessaire de prévoir des systèmes de platines d'ancrages permettant d'assurer la démontabilité de ces appuis parasismiques, tout en permettant la reprise des efforts horizontaux.

3.2.2.3.2 Appareils d'appui à pot équipés de transmetteurs d'effort

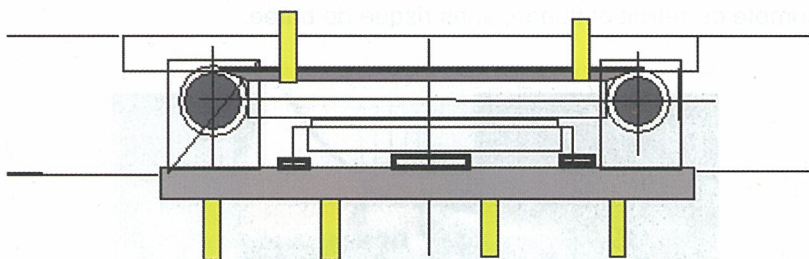


Figure 51 : Appareils d'appui à pot équipés de transmetteurs d'effort

3.2.2.3.3 Appareils d'appui à pot comportant des éléments élastoplastiques

Ces appareils d'appui à pot glissant (dans une ou les deux directions) comportent des éléments élastoplastiques qui dissipent de l'énergie lors de leur déformation sous déplacement sismique. Ces dispositifs sont très utilisés à l'étranger.

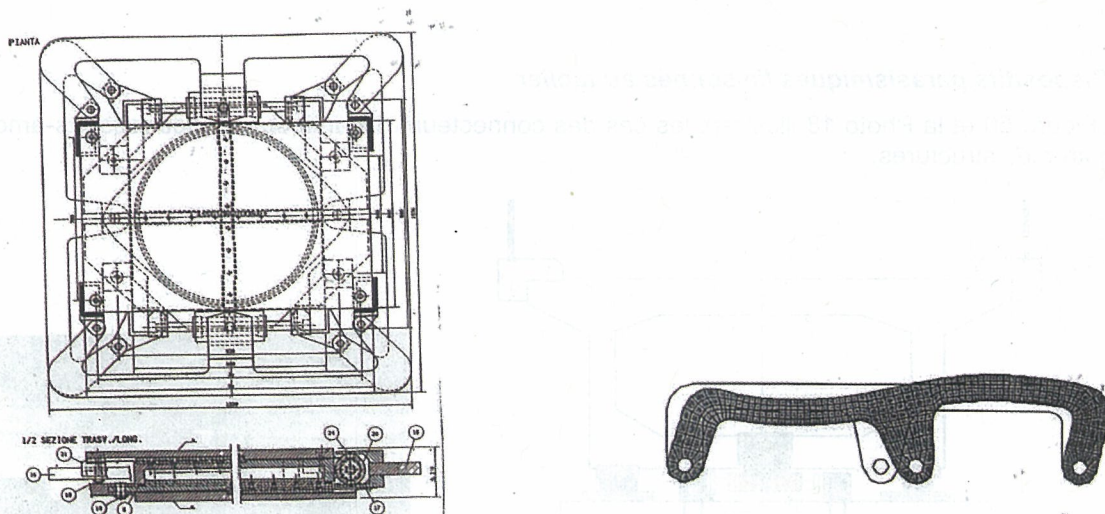


Figure 52 : Appareils d'appui à pot avec plaques élastoplastiques (Alga)

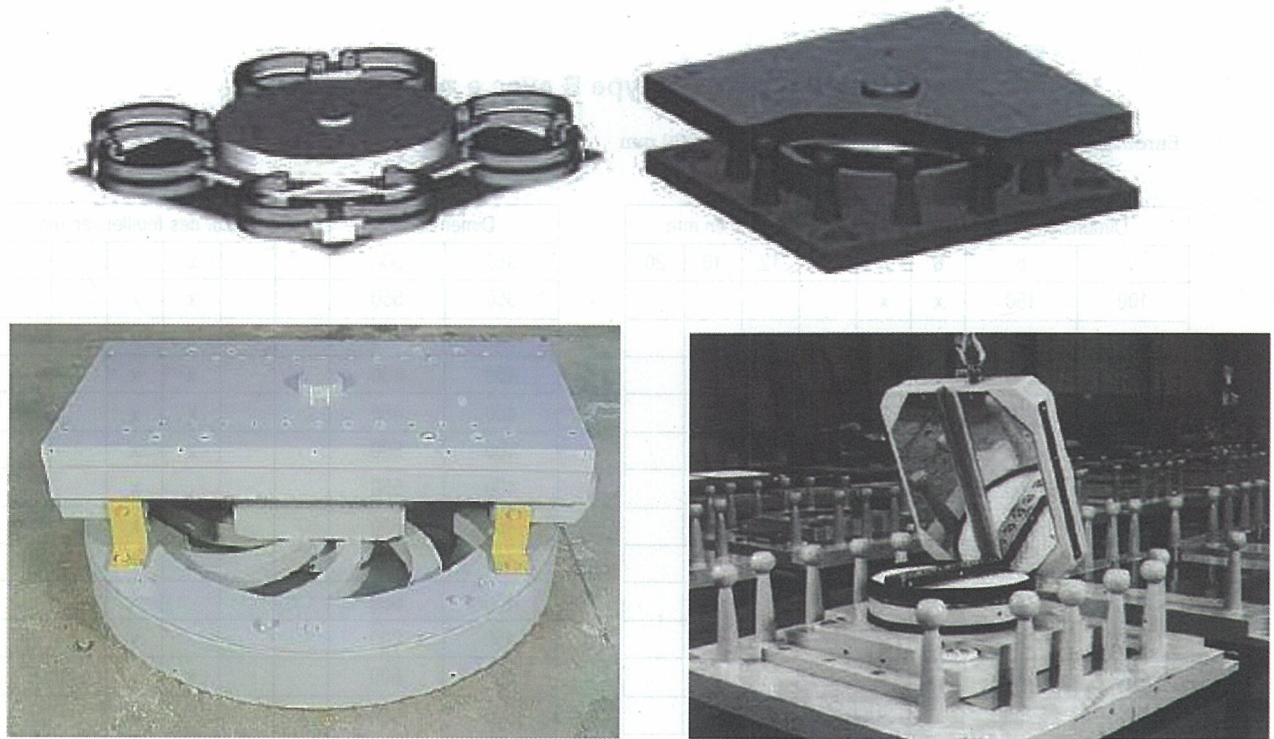


Photo 19 : Appareils d'appui à pot avec croissants de lune élastoplastiques (gauche) ou goujons métalliques (droite) (FIP Industriale)

3.2.2.4 Dimensions des dispositifs

Les dimensions des dispositifs parasismiques varient avec les efforts à reprendre. Elles sont notamment fonction de l'effort normal et des déplacements (ou course) issus des calculs sismiques et peuvent également présenter des différences plus ou moins importantes suivant chaque procédé. Les tableaux ci-dessous fournissent quelques exemples d'ordres de grandeur de dimensions pour les types de dispositifs parasismiques actuellement les plus utilisés en France et en Europe (appareils d'appui en élastomère fretté, appareil d'appui à pot glissant, connecteurs dynamiques, amortisseurs à fluide visqueux, ressorts amortisseurs précontraints, dispositifs élastoplastiques...). Ces données, pour la plupart issues de catalogues et prospectus standards de quelques fournisseurs, ne sont pas exhaustives de toutes les marques de fabricants.

3.2.2.4.1 Appareils d'appui en élastomère fretté

Appareil d'appui de type B avec e = demi-feuillet

Enrobage par 2 demi-feuillets, $T_a < a/3$ et $T_{b_{max}} < 300$ mm

Dimensions		Epaisseur des feuillets en mm					
a	b	6	8	10	12	16	20
100	150	x	x				
100	200	x	x				
150	200	x	x				
150	250	x	x				
150	300		x				
200	200		x				
200	250		x	x			
200	300		x	x			
200	350		x	x			
200	400		x	x			
250	250		x				
250	300		x	x			
250	350		x	x			
250	400		x	x			
300	300			x			
300	350			x	x		
300	400			x	x		
300	450			x	x		
300	500			x	x		
300	550			x	x		
300	600			x	x		
350	350			x			
350	400			x			
350	450			x			

Dimensions		Epaisseur des feuillets en mm					
a	b	6	8	10	12	16	20
350	500					x	
350	550					x	x
350	600					x	x
400	400					x	x
400	450					x	x
400	500					x	x
400	550						x
400	600						x
450	500					x	x
450	550						x
450	600						x
500	500					x	
500	550						x
500	600						x
500	650						x
500	700						x
600	600						x
600	650						x
600	700						x
700	700						x
700	800						x
700	900						x
800	800						x
800	900						x
900	900						x

Tableau 6 : Extrait du guide technique Sétra « Appareils d'appui en élastomère fretté – Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires » - Annexe 3 : Tableau de dimensions en zone sismique en plan courantes [7]



Displacement 150 mm

ELASTOMERIC ISOLATORS

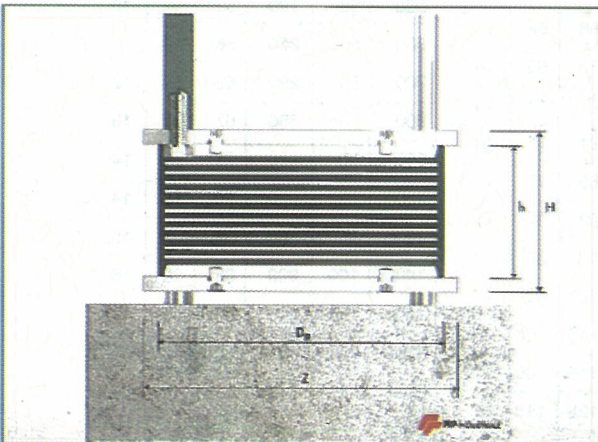


MARKS

The elastomeric isolators are classified by the mark SI (down isolator) followed by a letter (S, N, H) to indicate, respectively the type of soft, normal and hard compound) and two numbers. The first number represents the diameter in millimeters and the second stands for the total thickness of the rubber layers in millimeters.

Example:

SI-S 800/130 Elastomeric Isolator; diameter 800 mm, made of soft elastomeric compound with rubber layers having a total thickness of 130 mm.



SI-S	V kN	F _{ult} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D ₀ mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-S 300/75	270	1270	0.37	400	300	76	152	202	350	92
SI-S 350/75	490	2000	0.51	519	350	75	143	193	400	118
SI-S 400/75	580	3540	0.67	830	400	75	143	193	450	153
SI-S 450/75	1200	4660	0.82	948	450	78	154	204	500	202
SI-S 500/75	1800	7260	1.01	1358	500	78	154	204	550	247
SI-S 550/77	2190	9080	1.23	1586	550	77	147	197	600	287
SI-S 600/80	2590	10310	1.41	1707	600	86	147	197	650	335
SI-S 650/81	3200	10530	1.54	1896	650	81	145	195	700	384
SI-S 700/80	3710	11370	1.52	2153	700	86	151	211	750	508
SI-S 800/80	5870	14890	2.51	3389	800	86	151	211	850	659
SI-S 900/84	7490	21220	3.03	3798	900	84	158	218	950	848
SI-S 1000/84	9110	22590	3.74	4400	1000	84	164	244	1050	1252
SI-S 1100/84	12470	27460	4.53	6103	1100	84	164	244	1150	1509
SI-S 1200/96	15490	28700	4.71	6000	1200	96	175	256	1250	1807

SI-N	V kN	F _{ult} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D ₀ mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-N 300/75	550	1780	0.74	602	300	76	152	202	350	92
SI-N 350/75	990	2500	1.03	796	350	75	143	193	400	118
SI-N 400/75	1780	4880	1.34	1216	400	75	143	193	450	153
SI-N 450/75	2410	6530	1.83	1415	450	79	154	204	500	202
SI-N 500/75	3610	9080	2.01	1964	500	79	154	204	550	247
SI-N 550/77	4380	9620	2.47	2296	550	77	147	197	600	287
SI-N 600/80	5380	10310	2.83	2539	600	86	147	197	650	335
SI-N 650/81	6400	10830	3.28	2957	650	81	145	195	700	384
SI-N 700/80	7420	11370	3.85	3272	700	86	151	211	750	508
SI-N 800/80	11470	14990	5.03	4916	800	86	151	211	850	659
SI-N 900/84	14980	21220	6.06	5626	900	84	158	218	950	848
SI-N 1000/84	18230	22590	7.48	6667	1000	84	164	244	1050	1252
SI-N 1100/84	22800	27460	9.05	8890	1100	84	164	244	1150	1509
SI-N 1200/96	24240	28700	9.43	8903	1200	96	175	256	1250	1807

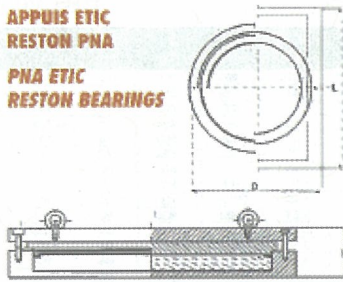
SI-H	V kN	F _{ult} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D ₀ mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-H 300/75	970	3080	1.30	755	300	76	152	202	350	92
SI-H 350/75	1590	3510	1.80	1000	350	75	143	193	400	118
SI-H 400/75	2450	4880	2.35	1516	400	75	143	193	450	153
SI-H 450/75	4220	7510	2.86	1794	450	78	154	204	500	202
SI-H 500/75	5820	9260	3.52	2406	500	78	154	204	550	247
SI-H 550/77	6440	9620	4.32	2968	550	77	147	197	600	287
SI-H 600/80	7060	10310	4.95	3209	600	86	147	197	650	335
SI-H 650/81	7560	10830	5.74	3646	650	81	145	195	700	384
SI-H 700/80	8310	11370	6.74	4209	700	86	151	211	750	508
SI-H 800/80	11470	14990	8.80	6006	800	86	151	211	850	659
SI-H 900/84	16810	21220	10.63	7085	900	84	158	218	950	848
SI-H 1000/84	18300	22590	13.03	8503	1000	84	164	244	1050	1252
SI-H 1100/84	22800	27460	15.84	11052	1100	84	164	244	1150	1509
SI-H 1200/96	24240	28700	16.49	11203	1200	96	175	256	1250	1807

Legend	
V	Vertical seismic load on the isolator
F _{ult}	Maximum vertical service load at ULS
K _e	Effective horizontal stiffness
K _v	Vertical stiffness
D ₀	Elastomer diameter
t _e	Total elastomer thickness
h	Height excluding outer steel plates
H	Total height including outer steel plates
Z	Side length of outer steel plates
W	Isolator weight excluding anchoring elements

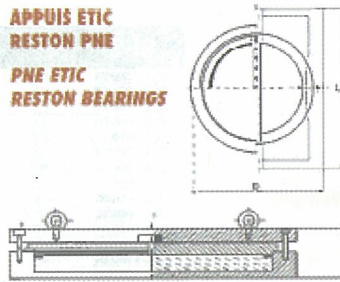
Tableau 7 : Exemple de dimensions et caractéristiques d'appareils d'appui en élastomère fretté utilisés comme isolateurs sismiques (source : FIP Industriale, Italie)

3.2.2.4.2 Appareils d'appui à pot

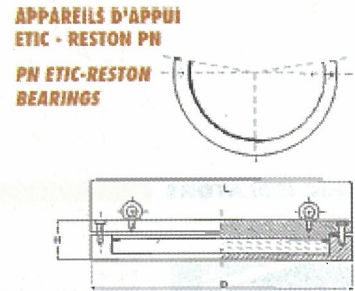
APPUI ETIC RESTON PNA
PNA ETIC RESTON BEARINGS



APPUI ETIC RESTON PNE
PNE ETIC RESTON BEARINGS



APPAREILS D'APPUI ETIC - RESTON PN
PN ETIC-RESTON BEARINGS



Vmax	Poids	L	D	H
T	KG	Cm	Cm	Cm
100	70	35	25	9
200	120	51	38	9
300	180	58	45	10
400	240	65	52	10
500	295	67	54	12
600	345	68	58	13
700	400	73	63	14
800	500	77	67	15
900	550	81	71	15
1000	620	85	75	16
1200	750	92	82	16
1400	950	98	88	17
1600	1060	105	95	18
1800	1210	110	100	19
2000	1410	116	106	20
2500	1780	128	118	22
3000	2100	140	130	24
3500	2480	150	140	26
4000	2900	160	150	27
4500	3320	170	160	28
5000	3770	190	180	30
6000	4520	210	200	32

Vmax	Hmax	Poids	L	D	H
T	T	KG	Cm	Cm	Cm
100	10	85	35	25	10
200	20	140	51	36	10
300	30	210	59	44	10
400	40	280	66	51	11
500	50	350	67	52	13
600	50	410	68	58	15
700	50	470	73	63	16
800	50	580	77	67	16
900	60	640	81	71	16
1000	70	720	85	75	17
1200	85	840	92	82	17
1400	100	1020	98	88	18
1600	100	1140	105	95	19
1800	100	1270	110	100	20
2000	100	1580	116	106	21
2500	125	1890	128	118	23
3000	150	2280	140	130	25
3500	175	2690	150	140	27
4000	200	3170	160	150	28
4500	225	3580	170	160	29
5000	250	4030	190	180	31
6000	300	4780	210	200	34

Vmax	Hmax	Poids	L	D	H
T	T	KG	Cm	Cm	Cm
100	10	40	25	25	7
200	20	65	36	36	7
300	30	100	44	44	8
400	40	140	51	51	9
500	50	190	52	52	10
600	50	250	58	58	12
700	50	290	63	63	12
800	50	360	67	67	13
900	60	410	71	71	14
1000	70	470	75	75	14
1200	85	580	82	82	15
1400	100	800	88	88	16
1600	100	910	95	95	17
1800	100	1000	100	100	18
2000	100	1170	106	106	19
2500	125	1610	118	118	20
3000	150	2050	130	130	21
3500	175	2400	140	140	22
4000	200	2880	150	150	23
4500	225	3250	160	160	24
5000	250	3600	180	180	25
6000	300	4200	200	200	27

Les dimensions indiquées ci-dessus sont établies pour des valeurs de V max standard et dans les conditions de fonctionnement suivantes:

Rotation standard	0,01 Radian
Pression moyenne sur le béton situé sous appui	23 MPa
Déplacement longitudinal	e = +/- 5 cm
Déplacement transversal	e = +/- 1 cm

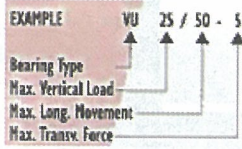
Les dimensions indiquées ci-dessus sont établies pour des valeurs de V max et H max standard et dans les conditions de fonctionnement suivantes :

H max	effort horizontal transversal
Rotation standard	0,01 Radian
Pression moyenne sur le béton situé sous appui	23 MPa
Déplacement longitudinal	e = +/- 5 cm

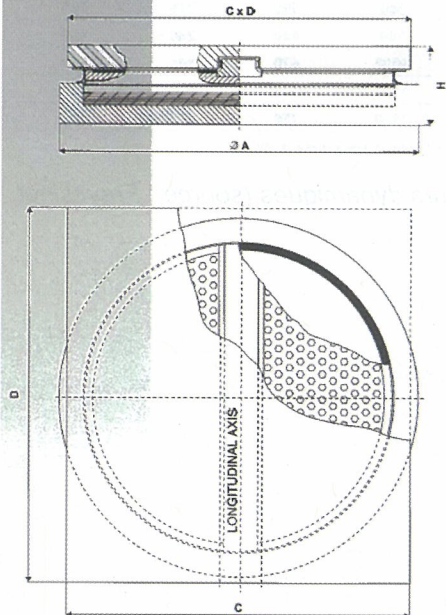
Les dimensions indiquées ci-dessus sont établies pour des valeurs de V max et H max standard et dans les conditions de fonctionnement suivantes :

H max	effort horizontal transversal
Rotation standard	0,01 Radian
Pression moyenne sur le béton situé sous appui	23 MPa

Tableau 8 : Exemple de dimensions et caractéristiques d'appareils d'appui à pot multidirectionnels, monodirectionnels ou bloqués (source : ETIC, France)



**TYPE VU
UNIDIRECTIONAL
POT BEARINGS**



BEARING TYPE	NOMINAL VERTICAL LOAD (kN)	MAX HORIZONTAL LOAD (kN)	A (mm)	E-L (mm)	C (mm)	D (mm)	F (mm)	F (mm)	H (mm)	WEIGHT (kg)	BOLT TYPE
VU 25/50-8	250	87	180	170	180	220	140	180	83	15	1
VU 50/50-11	500	115	210	190	210	240	170	200	83	20	1
VU 75/50-14	750	144	240	210	240	270	200	230	87	30	1
VU 100/50-15	1000	154	270	240	270	290	230	250	87	35	1
VU 125/50-17	1250	173	300	260	300	310	260	270	92	45	1
VU 150/50-20	1500	201	310	280	310	330	250	270	97	50	2
VU 175/50-20	1750	201	340	300	340	340	280	280	102	65	2
VU 200/50-23	2000	230	360	310	360	360	300	300	102	70	2
VU 225/50-23	2250	230	380	330	380	380	320	320	107	80	2
VU 250/50-25	2500	259	400	350	400	410	340	350	106	90	2
VU 275/50-33	2750	335	420	380	420	410	360	350	117	110	2
VU 300/50-33	3000	335	440	370	440	430	380	370	118	120	2
VU 325/50-36	3250	360	460	380	460	440	400	380	119	130	2
VU 350/50-36	3500	360	490	420	420	450	330	360	119	140	3
VU 375/50-39	3750	395	510	430	440	470	350	380	124	155	3
VU 400/50-39	4000	395	520	440	450	480	360	390	124	165	3
VU 425/50-39	4250	395	530	450	460	490	370	400	128	175	3
VU 450/50-42	4500	420	550	460	480	510	390	420	128	190	3
VU 475/50-42	4750	420	560	470	490	520	400	430	128	200	3
VU 500/50-45	5000	455	570	480	500	530	410	440	126	205	3
VU 550/50-48	5500	480	610	510	530	560	440	470	133	245	3
VU 600/50-48	6000	480	630	520	550	580	460	490	134	265	3
VU 650/50-51	6500	515	650	540	570	600	480	510	141	300	3
VU 700/50-51	7000	515	670	550	590	620	500	530	142	320	3
VU 750/50-54	7500	540	690	570	610	640	520	550	143	340	3
VU 800/50-57	8000	575	720	590	630	660	540	570	143	370	3
VU 850/50-60	8500	600	740	600	660	690	570	600	142	390	3
VU 900/50-60	9000	600	760	610	660	690	570	600	152	440	3
VU 950/50-63	9500	635	780	630	690	720	600	630	152	455	3
VU 1000/50-66	10000	660	800	640	710	740	620	650	152	480	3
VU 1100/50-66	11000	660	840	670	730	760	640	670	161	570	3
VU 1200/50-69	12000	695	880	700	760	790	670	700	161	620	3
VU 1300/50-72	13000	720	910	720	790	820	700	730	161	660	3
VU 1400/50-78	14000	780	960	760	820	850	730	760	170	765	3
VU 1500/50-81	15000	815	980	770	860	890	770	800	170	810	3
VU 1700/50-84	17000	840	1060	820	890	920	800	830	185	1010	3
VU 1900/50-90	19000	900	1100	850	950	960	860	890	185	1100	3
VU 2100/50-93	21000	935	1180	900	1000	1030	910	940	194	1290	3
VU 2300/50-99	23000	965	1210	930	1040	1070	950	980	199	1425	3
VU 2500/50-102	25000	1020	1270	970	1070	1100	960	1010	209	1645	3
VU 2750/50-105	27500	1055	1330	1020	1120	1150	1030	1060	218	1895	3
VU 3000/50-111	30000	1115	1400	1070	1180	1210	1090	1120	217	2070	3
VU 3250/50-117	32500	1175	1440	1180	1290	1310	1160	1190	227	2305	4
VU 3500/50-120	35000	1200	1500	1200	1320	1350	1200	1230	227	2480	4
VU 3750/50-126	37500	1260	1550	1240	1370	1400	1250	1280	237	2775	4
VU 4000/50-129	40000	1295	1600	1270	1410	1440	1290	1320	237	2940	4

- Vertical and Horizontal loads are at serviceability limite state (SLS).
- The dimensions are for bearings designed according to CNR 10018 and BS 5400.
- The average contact pressure is 20 N/mm² at maximum SLS vertical load.
- The longitudinal dimension D is for sliding movements of ± 25 mm.

Tableau 9 : Exemple de dimensions et caractéristiques d'appareils d'appui à pot glissants monodirectionnels (source : FIP Industriale, Italie)

3.2.2.4.3 Connecteurs dynamiques

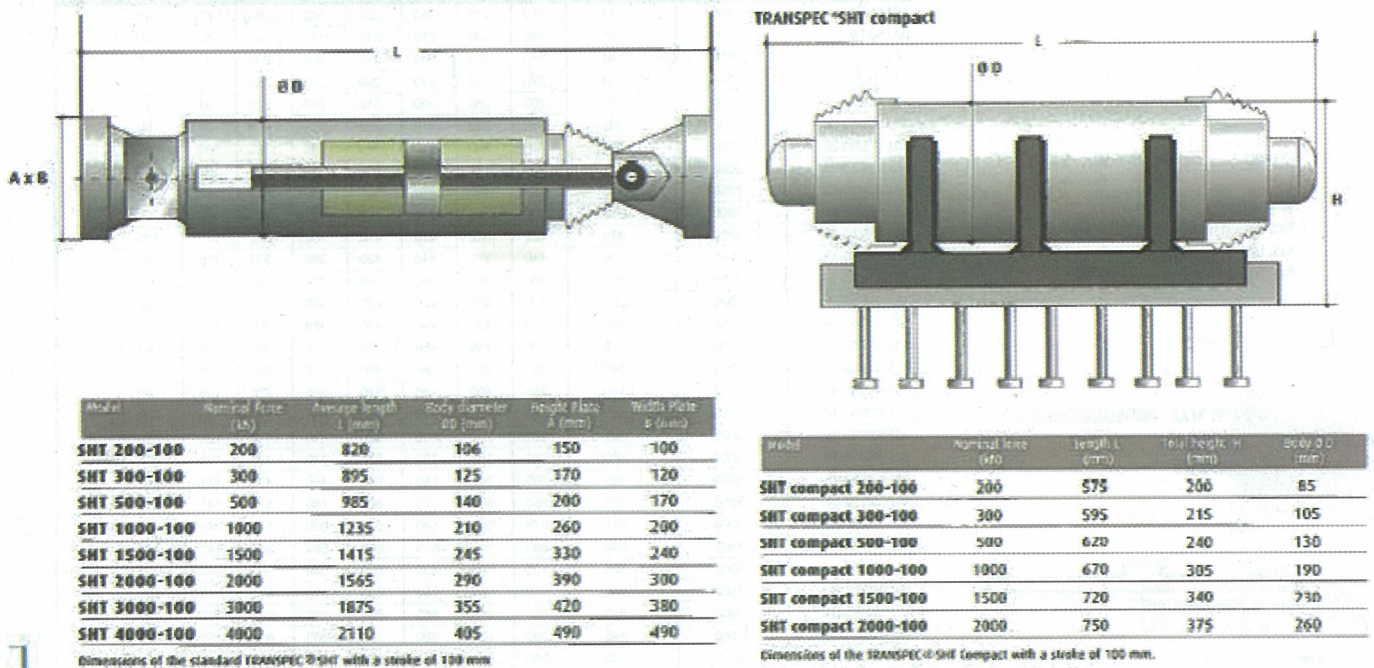
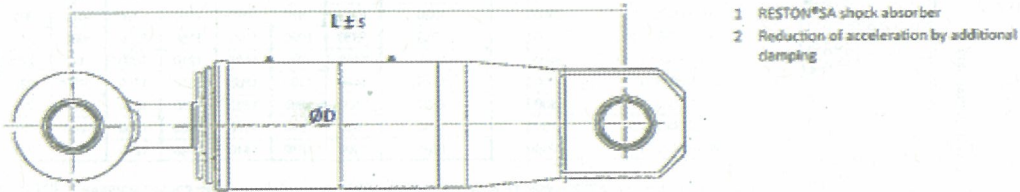


Tableau 10 : Exemple de dimensions et caractéristiques de connecteurs dynamiques (source : Freyssinet, France)

3.2.2.4.4 Amortisseurs à fluide visqueux

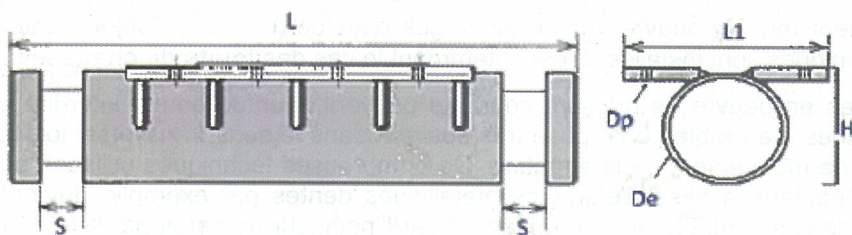


Type	Axial Force	Maximum displacement s (+/- mm)													
		50		100		150		200		250		300		400	
	kN	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]
SA 50	50	110	720	110	1,020	110	1,320	110	1,620	110	1,920	110	2,220	110	2,820
SA 100	100	120	750	120	1,050	120	1,350	120	1,650	120	1,950	120	2,250	120	2,850
SA 200	200	180	780	180	1,080	180	1,380	180	1,680	180	1,980	180	2,280	180	2,880
SA 500	500	195	820	195	1,120	195	1,420	195	1,720	195	2,020	195	2,320	195	2,920
SA 750	750	215	835	215	1,135	215	1,435	215	1,735	215	2,035	215	2,335	215	2,935
SA 1000	1,000	235	855	235	1,155	235	1,455	235	1,755	235	2,055	235	2,355	235	2,955
SA 1250	1,250	280	920	280	1,220	280	1,520	280	1,820	280	2,120	280	2,420	280	3,020
SA 1500	1,500	295	990	295	1,290	295	1,590	295	1,890	295	2,190	295	2,490	295	3,090
SA 1750	1,750	325	1,045	325	1,345	325	1,645	325	1,945	325	2,245	325	2,545	325	3,145
SA 2000	2,000	365	1,190	365	1,490	365	1,790	365	2,090	365	2,390	365	2,690	365	3,290
SA 2500	2,500	405	1,270	405	1,570	405	1,870	405	2,170	405	2,470	405	2,770	405	3,370
SA 3000	3,000	455	1,385	455	1,685	455	1,985	455	2,285	455	2,585	455	2,885	455	3,485
SA 4000	4,000	505	1,505	505	1,805	505	2,105	505	2,405	505	2,705	505	3,005	505	3,605

(Dimensions for differing input parameter can be provided upon request)

Tableau 11 : Exemple de dimensions et caractéristiques d'amortisseurs à fluide visqueux (source : Mageba, Suisse)

3.2.2.4.5 Ressorts amortisseurs précontraints



Unit	F (kN)	L (mm)	De (mm)	Dp (mm)	L1 (mm)	H (mm)	S (mm)	F _s (kN)	K (MN/m)
PSD 300/100-25	300	426	120	18	190	125	25	100	4.4
PSD 300/100-50	300	573	120	18	190	125	50	100	2.2
PSD 580/210-40	580	640	150	22	230	155	40	210	4.5
PSD 580/210-80	580	927	150	22	230	155	80	210	2.3
PSD 1200/390-40	1'200	795	185	30	350	190	40	390	9.4
PSD 1200/390-80	1'200	1'120	185	30	350	190	80	390	4.7
PSD 1650/580-45	1'650	930	230	33	430	235	45	580	13
PSD 1650/580-90	1'650	1'335	230	33	430	235	90	580	6.5
PSD 2300/850-90	2'300	1'660	265	36	486	270	90	850	7.2
PSD 3500/1550-50	3'500	2'702	521	40	800	530	50	1'550	25

(Dimensions for differing input parameter can be provided upon request)

Tableau 12 : Exemple de dimensions et caractéristiques de ressorts amortisseurs précontraints (source : Mageba, Suisse)

3.2.2.4.6 Dispositifs élastoplastiques

DIMENSIONI - DIMENSIONS [mm]

PND - DISPOSITIVI FISSI - FIXED DEVICES

Siglatura - Mark	F _y	F _y	A	B _x	By	Z	Z	H
PND 3000 / 150 / 150 -	150	225	440	440	820	1150	1180	174
PND 4000 / 150 / 150 -	200	300	510	510	860	1167	1270	180
PND 5000 / 150 / 150 -	250	375	570	570	880	1603	1280	185
PND 6000 / 150 / 150 -	300	450	620	620	910	1270	1340	185
PND 7000 / 150 / 150 -	350	525	670	670	970	1271	1460	210
PND 8000 / 150 / 150 -	400	600	720	720	990	1327	1395	210
PND 9000 / 150 / 150 -	450	675	760	760	1010	1340	1435	210
PND 10000 / 150 / 150 -	500	750	800	800	1060	1402	1490	222
PND 12000 / 150 / 150 -	600	900	880	880	1180	1395	1493	229
PND 15000 / 150 / 150 -	750	1125	980	980	1210	1490	1692	246
PND 18000 / 150 / 150 -	900	1350	1080	1080	1310	1493	1667	256
PND 20000 / 150 / 150 -	1000	1500	1130	1130	1330	1580	1961	260

PNUD - DISPOSITIVI MOBILI - SLIDING DEVICES

Siglatura - Mark	F _y	F _y	A	B _x	By	Z	Z	H
PNUD 3000 / 150 / 150 ; 150(+75)	150	225(+75)	440	440	1130	1122	1205	174
PNUD 4000 / 150 / 150 ; 200(+75)	200	300(+75)	510	510	1130	1148	1253	180
PNUD 5000 / 150 / 150 ; 250(+75)	250	375(+75)	570	570	1140	1200	1260	185
PNUD 6000 / 150 / 150 ; 300(+75)	300	450(+75)	620	620	1150	1253	1323	185
PNUD 7000 / 150 / 150 ; 350(+75)	350	525(+75)	670	670	1180	1266	1455	210
PNUD 8000 / 150 / 150 ; 400(+75)	400	600(+75)	720	720	1195	1314	1380	210
PNUD 9000 / 150 / 150 ; 450(+75)	450	675(+75)	760	760	1205	1323	1435	210
PNUD 10000 / 150 / 150 ; 500(+75)	500	750(+75)	800	800	1240	1402	1490	222
PNUD 12000 / 150 / 150 ; 600(+75)	600	900(+75)	880	880	1280	1380	1493	229
PNUD 15000 / 150 / 150 ; 750(+75)	750	1125(+75)	980	980	1310	1490	1692	246
PNUD 18000 / 150 / 150 ; 900(+75)	900	1350(+75)	1080	1080	1340	1493	1667	256
PNUD 20000 / 150 / 150 ; 1000(+75) ; 1500(+75)	1000	1500(+75)	1130	1130	1360	1580	1961	260

■ BASSA SISMICITA' - LOW SEISMICITY ■ ALTA SISMICITA' - HIGH SEISMICITY

SIGNIFICATO DELLE SIGLATURE - KEY OF MARKS

es.: **PNUD 20000 / 150 / 150 - 1500 (+75)**

20000 = Carico verticale [kN] - Vertical Load [kN]
 150/150 = Movimento elastoplastico longitudinale / trasversale [mm]
 Hysteretic longitudinal / transversal displacement [mm]
 1500 = Forza di snervamento longit. / trasv. [kN] - F_y nel diagramma carico-spostamento
 Yield longit. / transv. force [kN] - F_y in the typical load-deflection plot
 +75 = Escursione termica [mm] - Thermal displacement [mm]

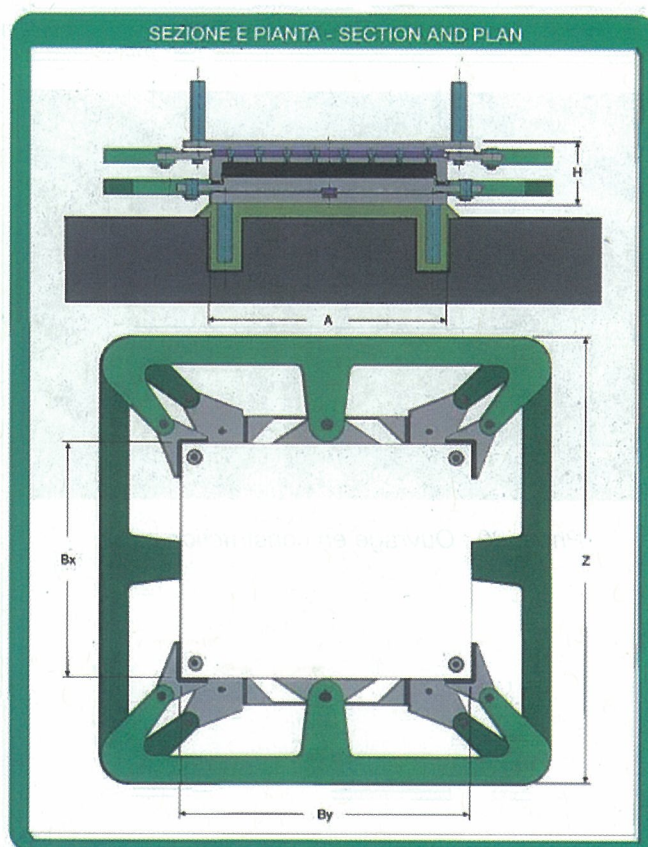


Tableau 13 : Exemple de dimensions et caractéristiques d'appareils d'appui à pot équipés d'éléments élastoplastiques (source : Alga, Italie)

3.2.2.5 Les autres équipements

Certains équipements généralement mis en oeuvre sur les ouvrages d'art doivent faire l'objet d'une étude particulière lorsque des dispositifs parasismiques sont installés. C'est notamment le cas des **joints de chaussée**.

En effet, certaines techniques mises en oeuvre de manière courante peuvent éventuellement interdire le bon fonctionnement des dispositifs parasismiques. Le problème se pose très souvent dans le sens transversal lorsque les études conduisent à imaginer une liberté de mouvement de la structure. De nombreuses techniques utilisant, pour de grands déplacements, des systèmes de pontage à base d'éléments métalliques dentés par exemple, devront faire l'objet d'une adaptation particulière. Dans le cas contraire, le but recherché par l'ingénieur ne serait pas atteint en cas de blocage de l'ouvrage. Il en est de même dans le sens longitudinal.

3.2.3 EXEMPLES D'IMPLANTATION DANS LES OUVRAGES

3.2.3.1 Viaduc d'Aiton (Autoroute A43)

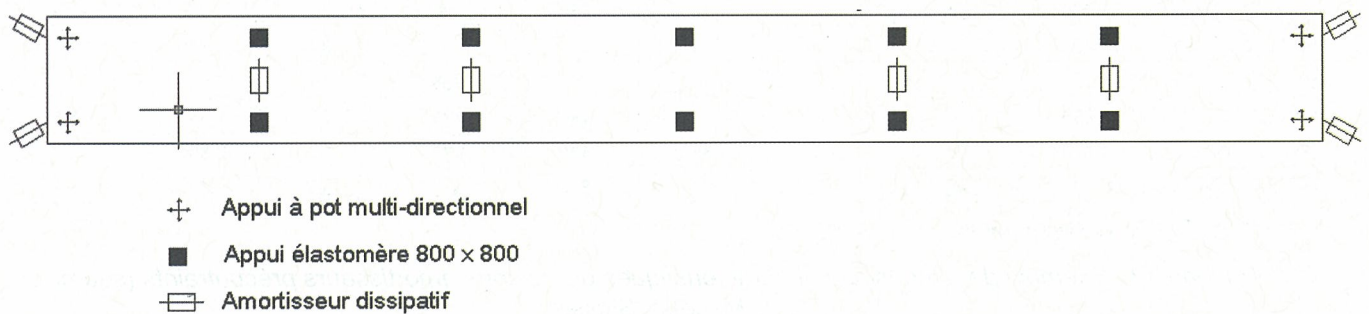


Figure 53 : Viaduc d'Aiton – schéma statique



Photo 20 : Ouvrage en construction



Photo 21 : Piles et sous face du tablier



Photo 22: Amortisseur transversal sur pile

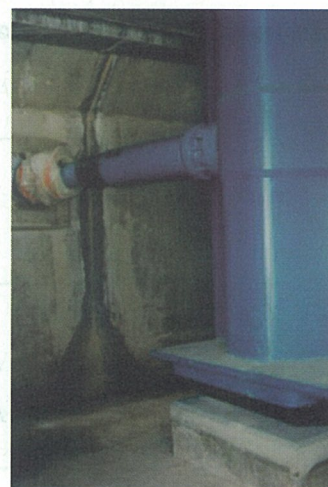


Photo 23: Amortisseur longitudinal sur culée

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 de 4000 kN

Séisme : site S2, accélération nominale : 2 m/s^2

Protection parasismique :

Longitudinale : 2 amortisseurs dissipatifs biais sur chaque culée (type ASR 500kN Jarret longueur 1290 mm, diamètre 180 mm)

Transversale : 4 amortisseurs dissipatifs répartis sur les 2x2 piles de rives de chaque tablier (type ASR 500kN Jarret longueur 1290 mm, diamètre 180 mm)

3.2.3.2 Deux ouvrages PS sur l'autoroute A51

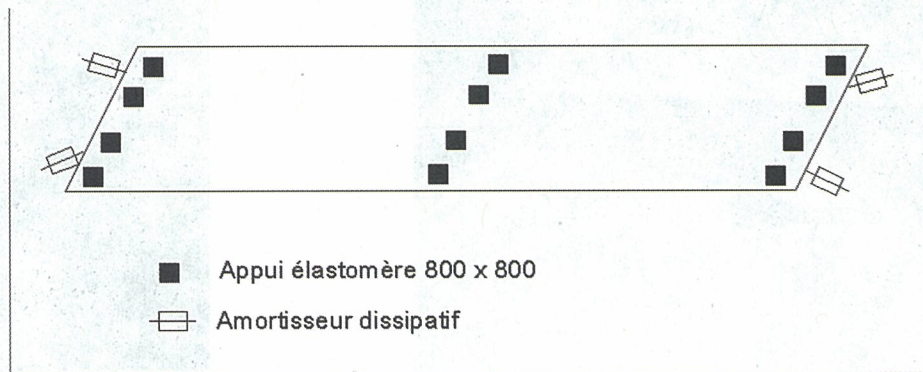


Figure 54 : Pont sur la Reymure – schéma statique

Type d'ouvrage : pont dalle type PSDP biais

Année de réalisation : 1996

Maîtrise d'œuvre : Scetauroute

Nombre de travées : 2

Type appareils d'appui : élastomères frettés sur piles et culées

Protection parasismique :

Longitudinale et transversale : 2 amortisseurs dissipatifs biais sur chaque culée (type Freyssinet Transpec posés entre deux blocs d'appuis)

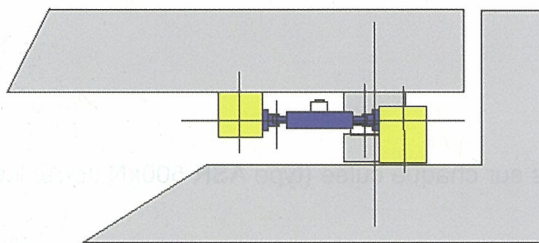


Figure 55 : Amortisseur biais disposé entre deux blocs d'appui



Photo 24 : Amortisseur biais disposé entre deux blocs d'appui



Photo 25 : Autre système de connexion biais pour les amortisseurs

3.2.3.3 Viaduc de Saint-André (Autoroute A43)

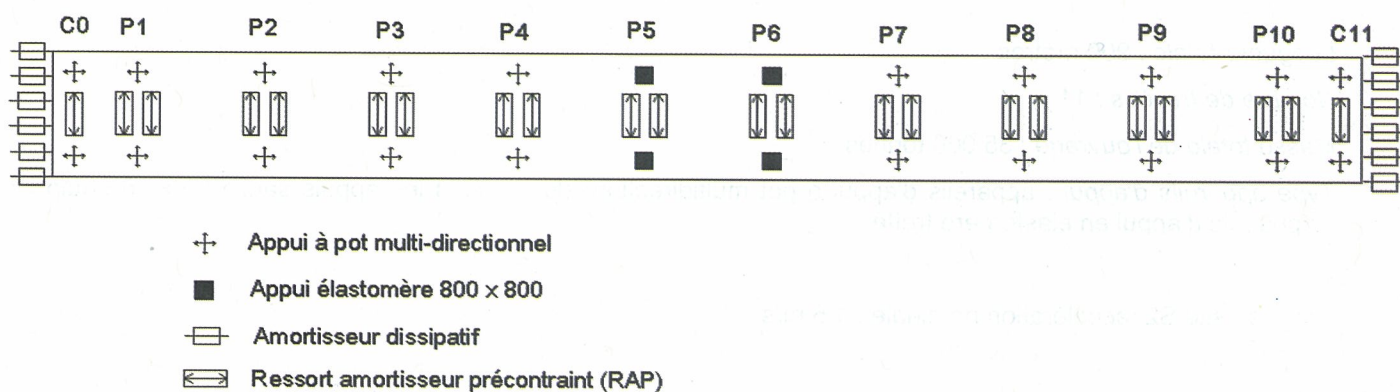


Figure 56 : Viaduc de Saint-André – schéma statique



a)



b)

Photo 26 : Vues générales de l'ouvrage



Photo 27 : Dispositifs amortisseurs précontraints disposés transversalement sur piles

Type d'ouvrage : caisson en béton précontraint construit par encorbellements successifs (voussoirs préfabriqués)

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 sur tous les appuis sauf P5 et P6 équipées d'appareils d'appui en élastomère fretté

Séisme : site S2, accélération nominale : $1,5 \text{ m/s}^2$

Protection parasismique :

Longitudinale : 2x3 amortisseurs dissipatifs sur chaque culée (type ASR 2450-600 Jarret longueur 2890 mm, diamètre 445 mm)

Transversale : 2 ressorts amortisseurs précontraints (RAP) sur toutes les piles et 1 sur culées (type Jarret BC 60S-100A longueur 1800 mm, diamètre 510 mm, équipés de systèmes de plaques de glissement avec PTFE permettant le mouvement longitudinal de la structure)