

Renforcement parasismique des constructions existantes

Journée technique sous l'égide de la CoTITA,
organisée par la direction territoriale Méditerranée

Travaux de l'AFPS dans le domaine du renforcement sismique des constructions existantes

Cahier technique AFPS/Cerema « Recommandations sur l'emploi des dispositifs parasismiques pour les ponts »

Denis Davi - Direction territoriale Méditerranée du Cerema

Judi 27 novembre 2014

Aix-en-Provence



Association Française du génie ParaSismique
et

Centre d'études et d'expertises sur les risques,
l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Recommandations sur l'emploi des dispositifs parasismiques pour les ponts



AUTEURS

Ce document a été rédigé par le groupe de travail de l'AFPS "Dispositifs parasismiques pour les ponts en zone sismique", animé par Emmanuel BOUCHON, chef de la Division des Grands Ouvrages et de l'Innovation du Sétra*, Denis DAVI (Sétra* puis CETE Méditerranée*) et Aurélie VIVIER (Sétra* puis SYSTRA).

Ont contribué à ce groupe de travail :

| | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Darius AMIR-MAZAHERI | DAM Design |
| Jacques BETBEDER-MATIBET(+) | EDF-SEPTEN |
| Pierre BOITEL | Freyssinet Belgium |
| Emmanuel BOUCHON | Sétra* |
| Alain CAPRA | VINCI Construction |
| Denis DAVI | Sétra* puis CETE Méditerranée* |
| Van Tho DOAN (+) | SNCF |
| Jean-François DOUROUX | VINCI Construction puis RATP |
| Philippe DUFLOT | TAYLOR Devices |
| Patrick GERNIGON | Dumez GTM |
| Wolfgang JALIL | SOCOTEC |
| Michel KAHAN | SETEC |
| Alfred KRIEF | JARRET |
| Serge MONTENS | SYSTRA |
| Claude NEANT | ETIC |
| Christophe PEDRON | CEA |
| Patrice SCHMITT | Sétra* puis SNCF |
| Pierre SOLLOGOUB | CEA |
| Jean-Marc TOURTOIS | Dumez GTM |
| Aurélien VIVIER | Sétra* puis SYSTRA |

Ce document, validé par le Comité Scientifique et Technique de l'AFPS, a été enrichi des observations et commentaires de messieurs Yves GUILLON, Serge MONTENS, Pierre-Alain NAZE et Jean-Marc VEZIN.

* Depuis le 1er janvier 2014, les 8 CETE, le Certu, le Cetmel et le Sétra ont fusionné pour donner naissance au Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

- CETE : Centre d'études techniques de l'équipement.
- Certu : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme, et les constructions publiques.
- Cetmel : Centre d'études techniques maritimes et fluviales.
- Sétra : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements.

Objectifs :

- Assister les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'étude et entreprises de construction dans l'emploi de ces dispositifs particuliers sur les ponts :
 - Principes généraux d'utilisation et fonctions réalisables
 - Technologies disponibles
 - Prise en compte dans les calculs et règles de dimensionnement
 - Réception, installation, entretien...
- En conformité avec la nouvelle législation et les normes parasismiques nationales et européennes :
 - Décrets et Arrêtés sismiques nationaux
 - Normes NF EN 1998-2, NF EN 1998-2/NA (Eurocode 8-2)
 - Norme NF EN 15129 « Dispositifs antisismiques »

Sommaire du document :

- 1. Différents types de conception parasismique des ponts et domaines d'emploi**
- 2. Influence du choix entre les différentes technologies de dispositifs parasismiques**
- 3. Les dispositifs parasismiques et leur utilisation sur les ponts**
- 4. Études et calculs sismiques**
- 5. Problématiques liées à la durabilité et à l'entretien des dispositifs**

Différents types de conception parasismique des ponts et domaines d'emploi





| | DUCTILITE LIMITEE (ou essentiellement élastique) | DUCTILE (ductilité structurelle) | DISPOSITIFS PARASISMQUES | |
|---|--|--|---|---|
| | | | Isolateurs, AA élastomère classiques | Amortisseurs, systèmes ductiles |
| |  |  |  |  |
| Domaines d'application privilégiés | Sismicité faible à modérée Ouvrages courants ou à fort enjeu (dessertes hôpitaux, casernes, aéroports...) | Sismicité moyenne ou forte Ouvrages non-courants à "tablier lourd" (caissons béton) | Sismicité faible à moyenne Ouvrages courants et non-courants (OA de faible portée ou "à tabliers légers" type OA mixtes) | Sismicité moyenne ou forte Ouvrages non-courants Ouvrages à fort enjeu (dessertes hôpitaux, casernes, aéroports...) |
| Etat après séisme "de calcul" | Ouvrage intact ou très faiblement endommagé | Ouvrage moyennement à fortement endommagé | Ouvrage intact | |
| Conditions de maintenance | Aucune particulière | Aucune particulière | Très variable selon technologie employée | |

Tableau 2 : Les trois types de conception parasismique décrits par l'EC8-2

Différents types de conception parasismique des ponts et domaines d'emploi

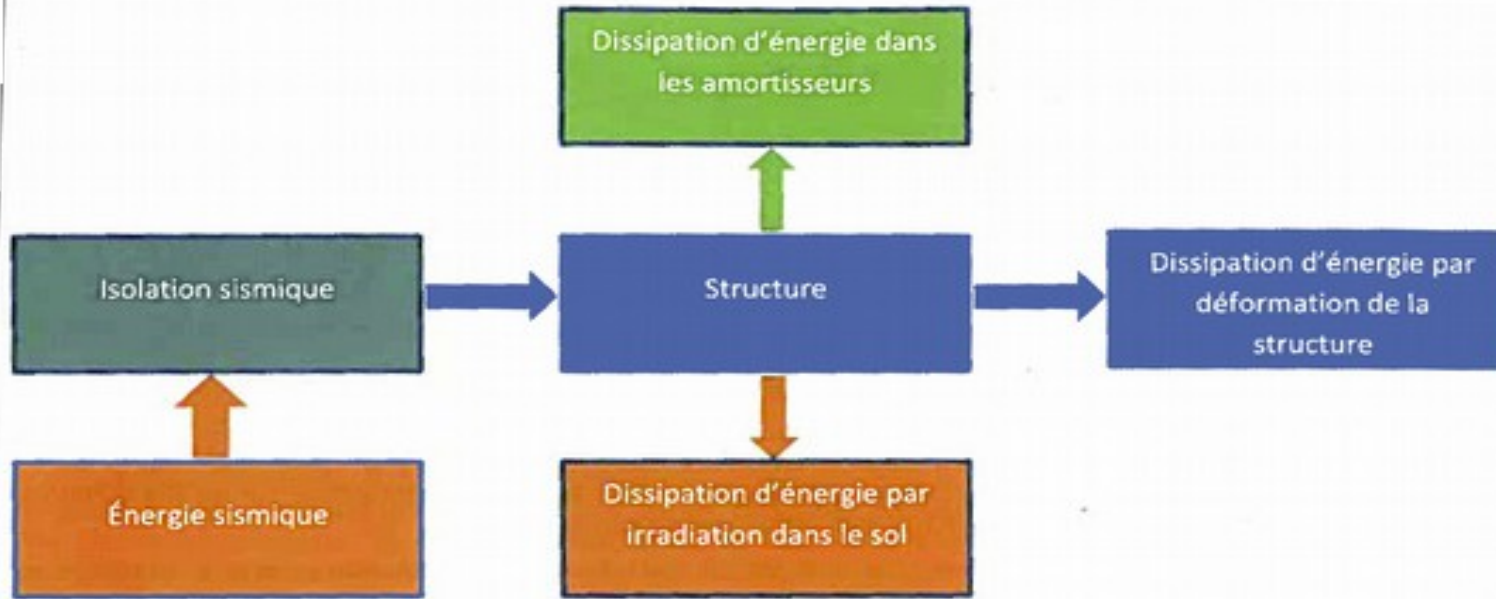


Figure 3 : Schéma énergétique global dans le cas de l'utilisation des concepts d'isolation sismique et d'amortissement

Influence du choix entre les différentes technologies de dispositifs parasismiques

- Fonctions réalisables par les dispositifs parasismiques

| Description du dispositif | | Paragraphe applicable | Représentation graphique | | | Notes |
|---|--|------------------------------------|--------------------------|------------------|---|---|
| | | | Vue en plan | Vue en élévation | | |
| Dispositifs de liaison rigide (RIGD) | Dispositifs de liaison permanente (PCD) | Fixes | 5.1 | | | Ce type de dispositifs correspond au type 8.1 (appareils d'appui bloqués) du tableau 1 de la norme EN 1337-1:2000 (*) |
| | | Mobiles | 5.1 | | | Ce type de dispositif correspond au type 8.2 (appareils d'appui guidés) du tableau 1 de la norme EN 1337-1:2000 (*) |
| | Butées fusibles | Butées fusibles mécaniques (MFR) | 5.2 | | | - |
| | | Butées fusibles hydrauliques (HFR) | 5.2 | | | - |
| | Dispositifs de liaison temporaire (TCD) | 5.3 | | | - | Ce type de dispositif est en général appelé Unité de Transmission de Chocs (STU) |
| Dispositifs dépendant du déplacement (DDCD) | Dispositifs linéaires (LD) | 6.1 | | | - | |
| | Dispositifs non linéaires (NLD) | 6.2 | | | - | |
| Dispositifs dépendant de la vitesse (VDD) | Amortisseurs à fluide visqueux (FVD) | 7.1 | | | - | Cette représentation graphique s'applique également aux amortisseurs à deux arbres |
| | Amortisseurs à ressort fluide (FSD) | 7.1 | | | - | |
| Isolateurs élastomères | En élastomère | 8.2 | | | | Les isolateurs sont représentés dans leur position déformée afin de souligner leur souplesse latérale |
| | Appareil d'appui en élastomère et noyau de plomb | 8.2 | | | | |
| | Éléments de glissement à surface courbe | 8.3 | | | | Ces symboles s'appliquent à la fois aux éléments à simple surface et double surface courbe |
| | Éléments de glissement à surface plane | 8.4 | | | | Ces symboles s'appliquent au type 2.3 (appareils d'appui glissant à pot) et au type 3.5 (appareils d'appui sphériques glissant) du tableau 1 de la norme EN 1337-1:2000 (■) |
| Note 1 (*) | Ce type de dispositif correspond au type F.0 (appareil d'appui bloqué) du tableau 1 de la norme EN 1337-1 révisée. | | | | | |
| Note 2 (*) | Ce type de dispositif correspond au type G.1 (appareil d'appui bloqué) du tableau 1 de la norme EN 1337-1 révisée. | | | | | |
| Note 3 (■) | Ce type de dispositif correspond au type P.2 et S.2., respectivement, du tableau 1 de la norme EN 1337-1 révisée. | | | | | |



Appareils d'appui à pot classiques



Fusibles installés sur le pont de Rion-Antirion (Grèce)



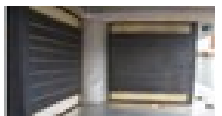
Connecteurs dynamiques prévus sur la ligne TGV Perpignan-Figueras



Amortisseurs élasto-plastiques équipant le pont Vasco de Gama (Portugal)



Appareils d'appui en élastomère fretté classiques...



... ou à noyau de plomb (Japon)



Dispositifs frottants pendulaires (Californie)

Tableau 1 : Types de dispositifs parasismiques les plus courants (extrait de la norme NF EN 15129 – tab. 1)

Influence du choix entre les différentes technologies de dispositifs parasismiques

● Exemples de conception

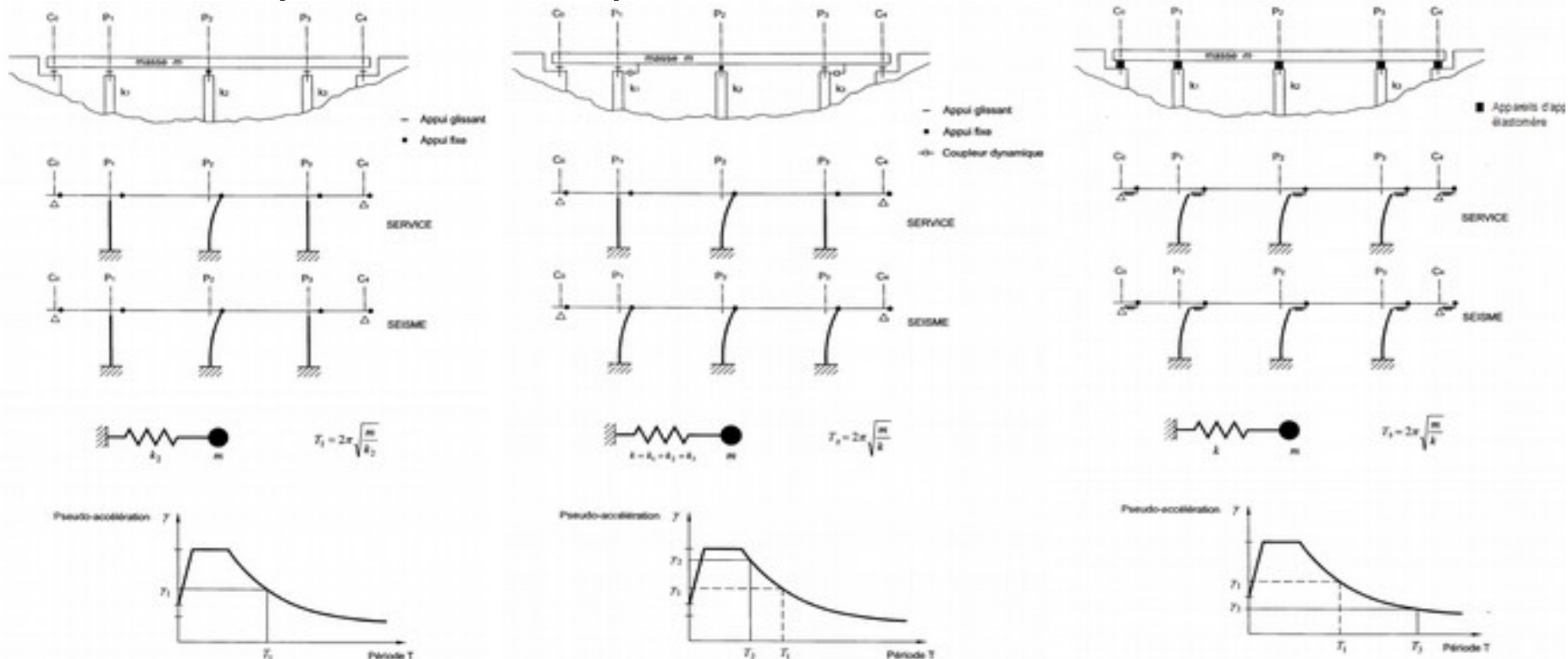


Figure 10 : Conception initiale (configuration courante)

Figure 11 : Ajout de coupleurs dynamiques

Figure 12 : Utilisation d'appareils d'appui en élastomère fretté

Influence du choix entre les différentes technologies de dispositifs parasismiques

- Exemples de conception

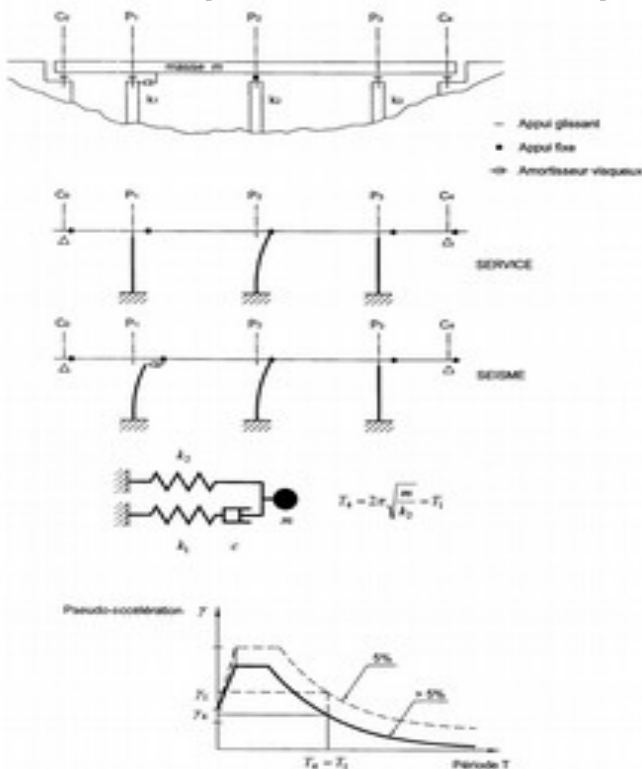


Figure 14 : Amortisseurs visqueux disposés en parallèle (sur des supports raides : piles ou culées)

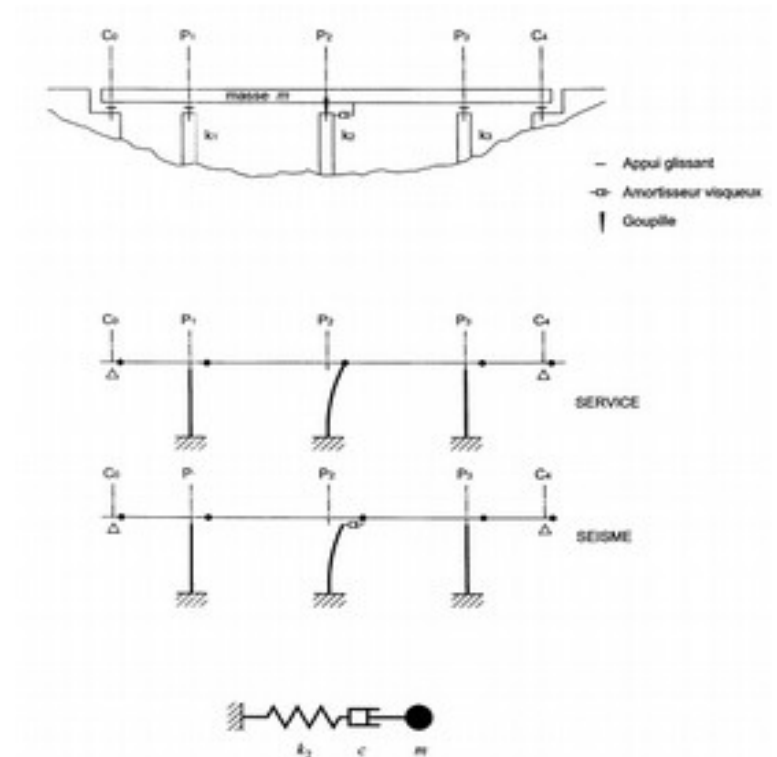


Figure 15 à 17 : Amortisseurs disposés en série (efficacité plus discutable selon la souplesse relative de la pile support)

Influence du choix entre les différentes technologies de dispositifs parasismiques

- Optimisation de la conception

| Types de conception ou de dispositifs | Domaine d'emploi préférentiel | Avantages | Inconvénients |
|---|---|--|--|
| 2.3.1 : Conception courante | Niveau sismique modéré Séismes peu fréquents | Pas de maintenance particulière Calcul spectral simple avec coefficient de comportement | Réparations lourdes après séisme réglementaire |
| 2.3.2 : Coupleurs dynamiques | Niveau sismique élevé Séismes peu fréquents Piles raides (périodes de vibration faibles) | Calcul spectral simple avec coefficient de comportement | Réparations lourdes après séisme réglementaire Maintenance des appareils hydrauliques |
| 2.3.3 : Appareils d'appuis en élastomère fretté | Niveau sismique modéré Ouvrages de faibles pontées (charges verticales compatibles avec les appareils d'appuis en élastomère fretté) | Calcul spectral Réparations mineures après séisme Pas de maintenance particulière | Grands déplacements des joints de chaussée |
| 2.3.4 : Amortisseurs visqueux disposés en parallèle | Niveau sismique élevé Particulièrement bien adapté aux ouvrages de faible longueur | Réparations mineures après séisme Calcul spectral simple approché possible Faibles déplacements des joints de chaussée | Maintenance des appareils à fluide visqueux Essais de qualification |
| 2.3.5 : Amortisseurs visqueux disposés en série | Niveau sismique élevé | Réparations mineures après séisme Forte réduction des efforts | Calcul temporel non-linéaire complexe prenant en compte la rupture du fusible (absence de méthode simplifiée) Grands déplacements des joints de chaussés Maintenance des appareils hydrauliques Nécessité de recalibrer le tablier après séisme |
| 2.3.6 : Amortisseurs élastoplastiques disposés en série | Niveau sismique élevé | Réparations mineures après séisme Forte réduction des efforts. Efforts peu dépendants du niveau sismique Calcul spectral simple approché possible Pas de maintenance particulière | Déplacements importants des joints de chaussée Nécessité de changer le fusible métallique et de recalibrer le tablier après un séisme de référence |
| 2.3.7 : Combinés ressorts-amortisseur | Niveau sismique élevé | Réparations mineures après séisme Risques réduits de décalage du tablier après séisme | Maintenance des appareils à fluide visqueux Calcul spectral simple approché possible mais peu adapté et potentiellement imprécis |

Tableau 3 : Domaines d'emploi privilégiés des différents types de dispositifs parasismiques

Influence du choix entre les différentes technologies de dispositifs parasismiques

- Considérations socio-économiques

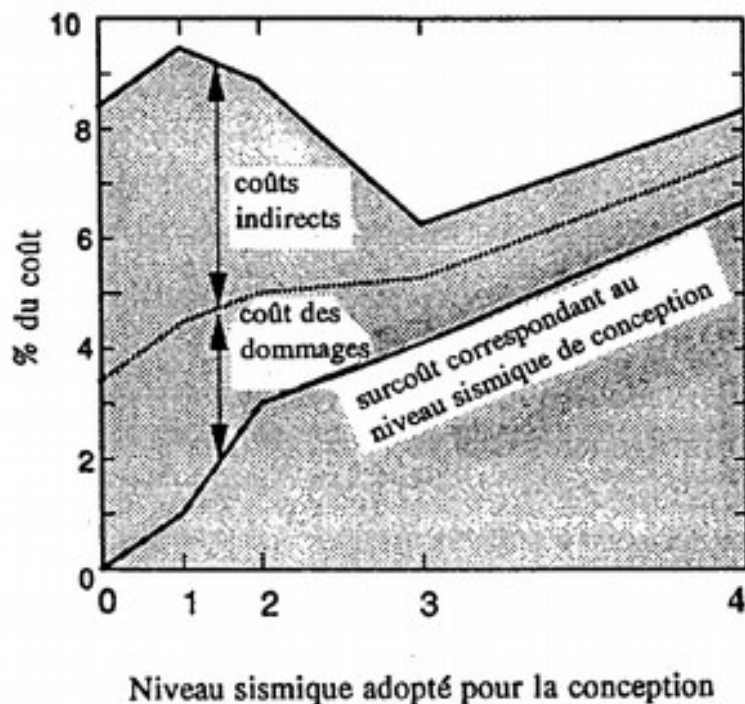


Figure 18 : Exemple théorique d'étude économique du renforcement sismique d'un ouvrage existant

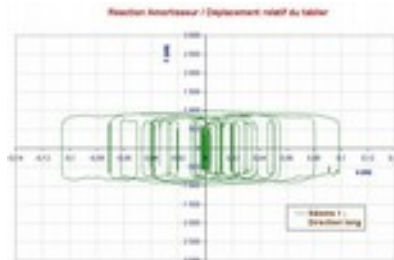
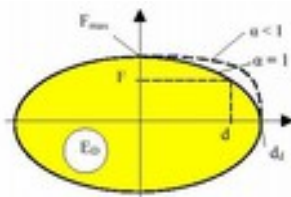
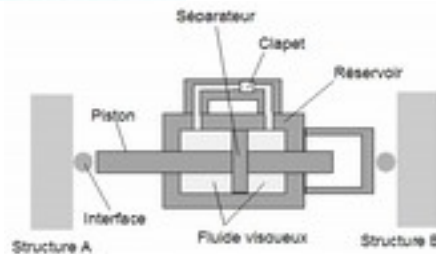
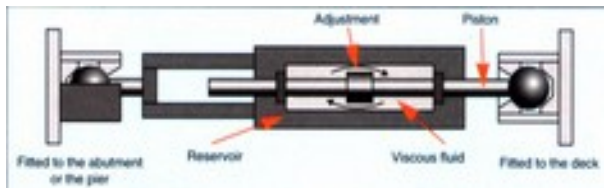


Photo 3 : Dispositifs élastoplastiques rompus après avoir subi un séisme 2x supérieur au séisme de calcul mais ayant néanmoins évité l'effondrement de l'ouvrage (Bolu Viaduct - Turquie, 1999)

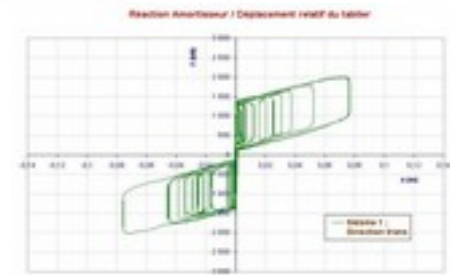
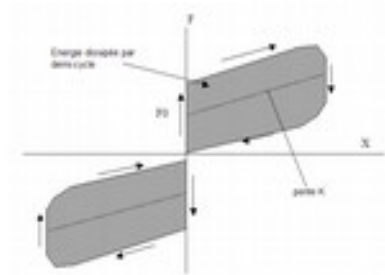
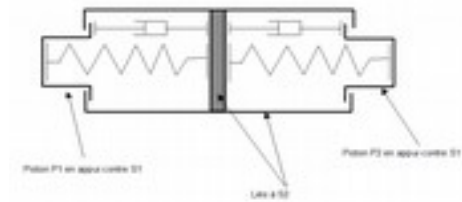
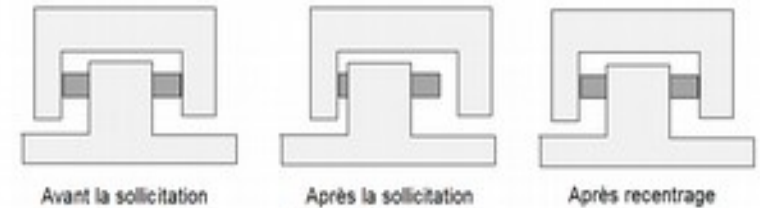
Les dispositifs parasismiques et leur utilisation sur les ponts

- Technologies et modèles associés

Amortisseurs visqueux



Ressorts amortisseurs précontraints (RAP)



Les dispositifs parasismiques et leur utilisation sur les ponts

- Règles de bonne conception



Photos 14-15 : Ferrailage de diffusion des efforts locaux au niveau des ancrages



Photo 19 : Exemples de dispositifs intégrés dans les appareils d'appui



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



Photo 25 : Disposition « en biais » permettant d'amortir simultanément dans les deux directions

Les dispositifs parasismiques et leur utilisation sur les ponts

- Dimensions « catalogues »

| width | nominal force (kN) | average length (mm) | width between DB (mm) | height base (mm) | width base (mm) |
|--------------|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| SMT 200-100 | 200 | 820 | 104 | 150 | 100 |
| SMT 300-100 | 300 | 895 | 125 | 170 | 120 |
| SMT 500-100 | 500 | 995 | 140 | 200 | 170 |
| SMT 800-100 | 800 | 1230 | 210 | 260 | 200 |
| SMT 1500-100 | 1500 | 1415 | 345 | 330 | 240 |
| SMT 2000-100 | 2000 | 1545 | 390 | 390 | 300 |
| SMT 3000-100 | 3000 | 1875 | 355 | 430 | 330 |
| SMT 4000-100 | 4000 | 2110 | 405 | 490 | 400 |

Dimensions of the standard TRANSPEC SMT with a stroke of 100 mm.

| width | nominal force (kN) | length (mm) | total height (mm) | width P (mm) |
|----------------------|--------------------|-------------|-------------------|--------------|
| SMT compact 200-100 | 200 | 575 | 200 | 85 |
| SMT compact 300-100 | 300 | 595 | 215 | 105 |
| SMT compact 500-100 | 500 | 610 | 240 | 130 |
| SMT compact 800-100 | 800 | 670 | 255 | 190 |
| SMT compact 1500-100 | 1500 | 720 | 340 | 310 |
| SMT compact 2000-100 | 2000 | 750 | 375 | 260 |

Dimensions of the TRANSPEC SMT compact with a stroke of 100 mm.

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

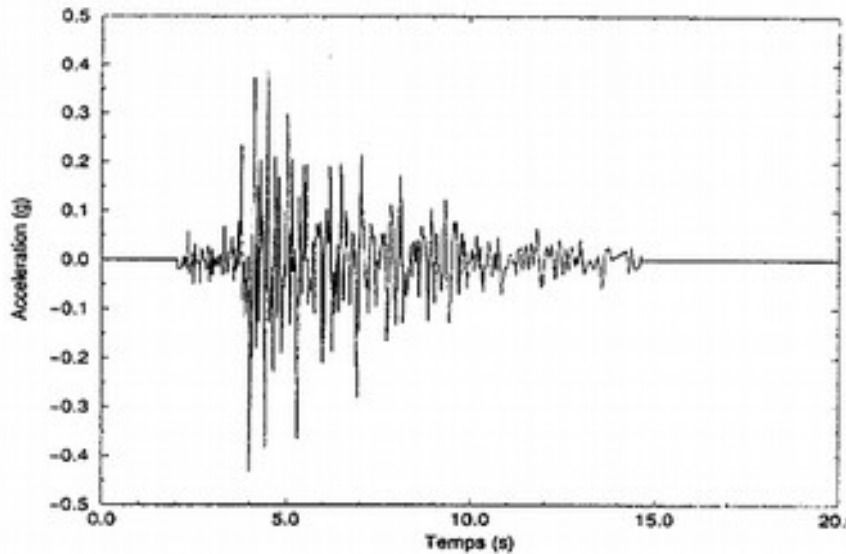
| width | nominal force (kN) | length (mm) | total height (mm) | width P (mm) |
|-------------------|--------------------|-------------|-------------------|--------------|
| PMD 2000-100-100 | 2000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| PMD 3000-100-100 | 3000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| PMD 4000-100-100 | 4000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| PMD 5000-100-100 | 5000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| PMD 6000-100-100 | 6000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| PMD 8000-100-100 | 8000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| PMD 10000-100-100 | 10000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| PMD 15000-100-100 | 15000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| PMD 20000-100-100 | 20000 | 1000 | 1000 | 1000 |

Dimensions of the TRANSPEC SMT compact with a stroke of 100 mm.

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

Études et calcul sismiques

- Nécessite un calcul dynamique temporel non-linéaire (le plus souvent), à partir :



- d'accélérogrammes naturels (à privilégier) ou synthétiques
- d'un nombre suffisant de signaux représentatifs
 - Au moins 3 paires :
 - ➡ enveloppe des réponses
 - Si 7 paires et plus :
 - ➡ moyenne des réponses

Études et calcul sismiques

- Mais quelques approches simplifiées possibles :

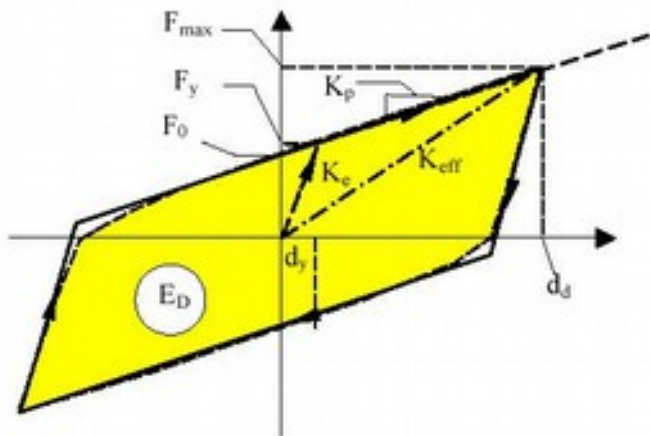


Figure 66 : Caractéristiques équivalentes des dispositifs amortisseurs selon l'EC8-2

- Raideur équivalente du dispositif i : $K_{eff,i} = F_{max} / d_d$
- Raideur équivalente globale du système : $K_{eff} = \sum K_{eff,i}$
- Coefficient d'amortissement global basé sur la somme des énergies dissipées $E_{D,i}$:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_{D,i}}{K_{eff} \cdot d_{cd}^2} \right]$$

- Période équivalente et coefficient de modification spectrale :

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

- Déplacement de calcul d_d \Rightarrow **Qq itérations nécessaires**



Un coefficient d'amortissement global ξ_{eff} de l'ordre de 20 à 30% peut être visé, ce qui conduit à une réduction globale des efforts et des déplacements d'environ 50%.

Études et calcul sismiques

- Règles de dimensionnement (cas général) :
 - Combinaison sismique : $G + 0,5 T + S$
 - Dispositifs à dimensionner vis-à-vis d'un déplacement majoré de $\gamma_{IS} = 1,5$ (*coefficient de fiabilité*)
 - Accroches et éléments supports à dimensionner pour les efforts correspondants (y compris γ_{IS}) majorés de $\gamma_{Rd} = 1,1$ (*coefficient de sur-capacité*)

Problématiques liées à la durabilité et à l'entretien des dispositifs

- Essais de qualification selon la norme NF EN 15129

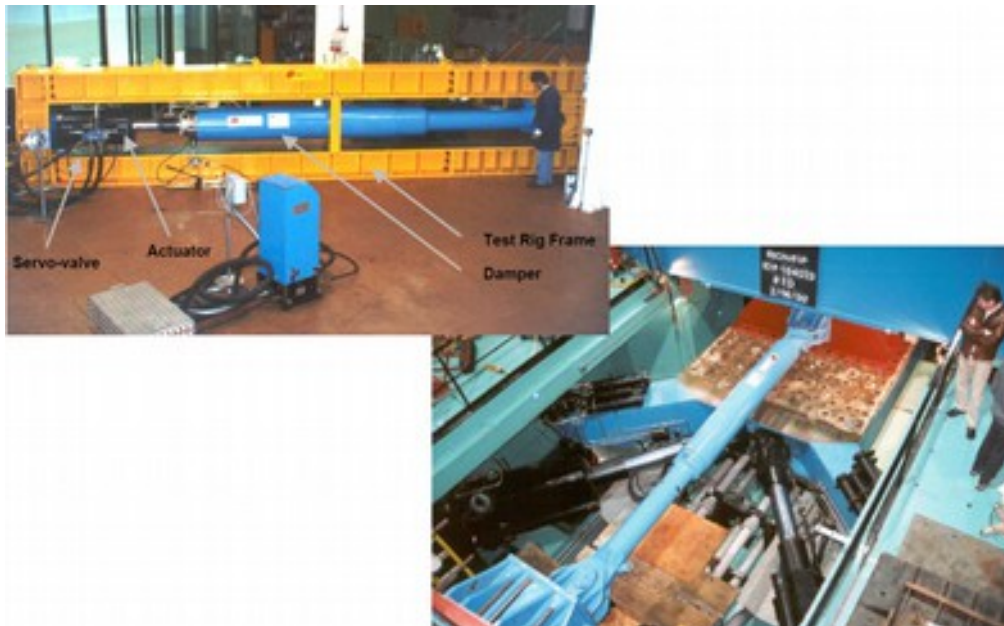


Photo 28 : Essais de qualification des amortisseurs du pont de Rion-Antirion réalisés dans les laboratoires de l'Université de Californie, San Diego (UCSD)



Problématiques liées à la durabilité et à l'entretien des dispositifs

- Essais de qualification selon la norme NF EN 15129
- Exigences de la norme : Tout type de dispositif doit être soumis à une procédure de validation technique, prouvant que le dispositif est conforme à ses exigences fonctionnelles et que le système restera opérationnel dans son domaine d'utilisation, y compris en situation sismique, pendant sa durée de service. Elle doit inclure au moins :
 - Une description des plages d'utilisation des paramètres applicables
 - Une méthode d'estimation de la durée de service escomptée
 - La preuve de la capacité du dispositif à fonctionner en toute stabilité et fiabilité pendant sa durée de service
 - Les valeurs des propriétés mécaniques du système
 - La plage correspondant à des conditions environnementales acceptables
 - La description du comportement au-delà de l'action sismique de calcul
 - La description des lois de comportement adaptées pour l'analyse
 - Un modèle décrivant le comportement du dispositif dans différentes conditions d'utilisation, y compris toutes les combinaisons d'actions définies dans l'EN 1990
 - Des essais de type couvrant les plages d'utilisation prévues

Problématiques liées à la durabilité et à l'entretien des dispositifs

- Essais de qualification selon la norme NF EN 15129
- Essais de type (ITT) : Servent à valider les caractéristiques et performances du dispositif par rapport au besoin. A mener une seule fois par dispositif « catalogue »
- Essais de contrôle de la production en usine (FPC) : Servent à contrôler que le processus de fabrication correspond toujours aux critères du marquage et que les dispositifs produits sont eux aussi conformes (y compris matières premières et composants)
- Exemples d'essais:
 - Essai de charge de service et essai de fatigue
 - Essai de rupture
 - Essai de pression et essai d'usure d'étanchéité
 - Essai à faible vitesse et essai de charge impulsive
 - Essai de chargement cyclique
 - Évaluation du cycle effort-déformation et essai de loi de comportement
 - Essais de l'efficacité de l'amortissement et de vérification de course...

Problématiques liées à la durabilité et à l'entretien des dispositifs

- Documents d'étude à produire par l'entreprise ou le fournisseur :
 - Notes de calcul spécifiques
 - Programme et rapports d'essais de type et de fabrication en usine (conformément à la norme NF EN 15129)
 - Description du système de protection contre la corrosion (dispositif et du système de fixation) et du système d'étanchéité du dispositif
 - Plans des dispositifs, plans d'installation et des fixations, courbes de réglage et de pose, gabarits de fixation...
 - Plans de structures montrant l'interface entre les amortisseurs et leur environnement (piles, culées, tablier de pont), leur fixation et les dispositions prises pour assurer la possibilité de remplacer tout composant du système
 - Notice de pose et de réglage, description du système de vérification et de réglage de la pression des fluides
 - Attestation de garantie, pour une durée de 10 ans, contre tous défauts
 - Procédure d'inspection périodique et de maintenance par du personnel qualifié pendant la durée garantie prévue précitée (conformément à la norme NF EN 15129)

Problématiques liées à la durabilité et à l'entretien des dispositifs

● Entretien :

- Vérification et contrôle de l'environnement général des dispositifs et de l'efficacité des attaches aux structures béton ou métal
- Vérification de l'état des surfaces graissées et appoint de lubrifiant si nécessaire (*parties mobiles, points d'attaches rotulés, etc.*)
- Examen des surfaces environnantes, au droit des dispositifs parasismiques, permettant de détecter immédiatement des traces de fuites provenant du réservoir du dispositif
- Vigilance particulière en cas de travaux à proximité (*remplacement ou entretien de joints de chaussée, remplacement des appareils d'appui avec vérinage, réfection des systèmes de recueil des eaux...*)
- Inspections périodiques (*idem appareils d'appui*)
- Inspections systématique en cas de séisme « notable » (*secousse ressentie par la population, dommages relevés sur les constructions...*)

Merci pour votre attention

Denis DAVI

Cerema / Direction territoriale Méditerranée

Référent séisme PCI « Vulnérabilité des ouvrages de Génie Civil aux aléas sismiques et hydrauliques »

04 42 24 76 81 ou 04 72 14 32 25

denis.davi@cerema.fr