



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
Aurélie 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 Cetmef 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.
- Cetmef : Centre d'études techniques maritimes et fluviales.
- Sétra : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements.

# SOMMAIRE

<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>6</b>
<b>AUTEURS .....</b>	<b>7</b>
<b>1. DIFFÉRENTS TYPES DE CONCEPTION PARASISMIQUE DES PONTS ET DOMAINES D'EMPLOI..8</b>	
1.1 CONCEPTION PARASISMIQUE BASÉE SUR UN COMPORTEMENT ÉLASTIQUE OU EN DUCTILITÉ LIMITÉE DE LA STRUCTURE .....	8
1.2 CONCEPTION PARASISMIQUE BASÉE SUR UN COMPORTEMENT DUCTILE DES APPUIS.....	8
1.3 CONCEPTION BASÉE SUR L'UTILISATION DE DISPOSITIFS PARASIMIQUES .....	9
1.4 TABLEAU RÉCAPITULATIF ET DOMAINES D'EMPLOI.....	12
<b>2. INFLUENCE DU CHOIX ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE DISPOSITIFS PARASIMIQUES .....</b>	<b>13</b>
2.1 GÉNÉRALITÉS .....	13
2.2 FONCTIONS RÉALISABLES PAR LES DISPOSITIFS PARASIMIQUES .....	14
2.2.1 RESSORT ÉLASTIQUE.....	14
2.2.2 FUSIBLE.....	14
2.2.3 AMORTISSEUR VISQUEUX .....	15
2.2.4 LIMITEUR D'EFFORT ÉLASTO-PLASTIQUE .....	15
2.2.5 COUPLEUR DYNAMIQUE.....	16
2.3 EXEMPLES DE CONCEPTION.....	16
2.3.1 CONCEPTION COURANTE.....	16
2.3.2 COUPLEURS DYNAMIQUES .....	17
2.3.3 APPAREILS D'APPUIS EN ÉLASTOMÈRE FRETTE .....	18
2.3.4 AMORTISSEURS VISQUEUX DISPOSÉS EN PARALLÈLE.....	20
2.3.5 AMORTISSEURS VISQUEUX DISPOSÉS EN SÉRIE .....	22
2.3.6 AMORTISSEURS ÉLASTOPLASTIQUES DISPOSÉS EN SÉRIE .....	23
2.3.7 COMBINÉS RESSORTS-AMORTISSEURS DISPOSÉS EN SÉRIE .....	24
2.4 OPTIMISATION DE LA CONCEPTION .....	26
2.4.1 CHOIX DU COEFFICIENT DE COMPORTEMENT ( $Q=1$ OU $Q > 1$ ) .....	26
2.4.1.1 Considérations générales .....	26
2.4.1.2 Désordres possibles après séisme « de calcul ».....	26
2.4.2 DOMAINES D'EMPLOI PRIVILÉGIÉS DES DIFFÉRENTS TYPES DE DISPOSITIFS PARASIMIQUES .....	27
2.5 CONSIDÉRATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES .....	29
2.5.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES .....	29
2.5.2 SURCÔÛT DE LA CONCEPTION PARASISMIQUE POUR LES OUVRAGES NEUFS .....	30
2.5.3 MISE À NIVEAU OU RENFORCEMENT SISMIQUE DES OUVRAGES EXISTANTS .....	31
2.5.4 COÛTS DES RÉPARATIONS POST-SIMIQUES.....	32
2.5.4.1 Après un séisme d'intensité réglementaire .....	32

2.5.4.2	Pour des niveaux de séisme plus faibles que le séisme d'intensité réglementaire (événements plus fréquents)	33
2.5.4.3	Après un séisme supérieur au séisme d'intensité réglementaire	33
2.5.5	CONCLUSION	33
<b>3.</b>	<b>LES DISPOSITIFS PARASISMQUES ET LEUR UTILISATION SUR LES PONTS</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>TECHNOLOGIE ET MODÈLES ASSOCIÉS</b>	<b>34</b>
3.1.1	LES APPAREILS D'APPUI ÉLASTIQUES EN ÉLASTOMÈRE FRETTÉ	34
3.1.1.1	Généralités	34
3.1.1.2	Spécifications particulières	34
3.1.1.3	Description des appareils d'appui en élastomère fretté	37
3.1.1.4	Modélisation	38
3.1.2	LES DISPOSITIFS À COMPORTEMENT NON LINÉAIRE INDÉPENDANT DE LA VITESSE	39
3.1.2.1	Les dispositifs à frottement	39
3.1.2.2	Les connecteurs dynamiques	40
3.1.2.3	Les amortisseurs hydrauliques à soupape	41
3.1.2.4	Les dispositifs métalliques plastifiables	41
3.1.2.5	Les dispositifs "frottants pendulaires"	43
3.1.2.6	Les butées parasismiques	45
3.1.3	LES DISPOSITIFS À COMPORTEMENT NON LINÉAIRE DÉPENDANT DE LA VITESSE	47
3.1.3.1	Les amortisseurs à fluide visqueux	47
3.1.3.2	Les dispositifs ressorts-amortisseurs précontraints (RAP)	51
3.1.3.3	Les connecteurs dynamiques-transmetteurs d'efforts	54
3.1.3.4	Autres types de dispositifs	56
<b>3.2</b>	<b>REGLES DE BONNE CONCEPTION</b>	<b>58</b>
3.2.1	ELÉMENTS DE CONCEPTION GÉNÉRALE	58
3.2.1.1	Ouvrages comportant des connecteurs dynamiques	58
3.2.1.2	Ouvrages comportant des appareils d'appui en élastomère	58
3.2.1.3	Ouvrages comportant des amortisseurs disposés en parallèles	59
3.2.1.4	Ouvrages comportant des amortisseurs disposés en série	60
3.2.1.5	Ouvrages comportant des butées parasismiques	61
3.2.2	ENVIRONNEMENT DES DISPOSITIFS ET INCIDENCE SUR LES STRUCTURES	61
3.2.2.1	Dispositifs parasismiques avec système d'ancrage indépendant	62
3.2.2.2	Dispositifs parasismiques liaisonnés au tablier	65
3.2.2.3	Dispositifs intégrés dans les appareils d'appui	66
3.2.2.4	Dimensions des dispositifs	67
3.2.2.5	Les autres équipements	74
3.2.3	EXEMPLES D'IMPLANTATION DANS LES OUVRAGES	74
3.2.3.1	Viaduc d'Aiton (Autoroute A43)	74
3.2.3.2	Deux ouvrages PS sur l'autoroute A51	76
3.2.3.3	Viaduc de Saint-André (Autoroute A43)	77
<b>4.</b>	<b>ÉTUDES ET CALCULS SISMIQUES</b>	<b>79</b>
<b>4.1</b>	<b>QUELQUES RAPPELS ÉLÉMENTAIRES SUR LA REPRÉSENTATION DE L'ACTION SISMIQUE</b>	<b>79</b>
4.1.1	SPECTRES DE RÉPONSE	79
4.1.1.1	Définition	79
4.1.1.2	Accélération de calcul $a_g$	80
4.1.1.3	Spectres de réponse élastique	81
4.1.2	DÉFINITIONS DES SITES	85
4.1.3	ACCÉLÉROGRAMMES RÉELS ET ARTIFICIELS	86
4.1.3.1	L'action sismique	86

4.1.3.2	Les accélérogrammes.....	86
4.1.3.3	Génération numérique de signaux sismiques synthétiques .....	86
4.1.3.4	Accélérogrammes réels.....	87
4.1.3.5	Prescriptions de l'EC8-2 relatives à l'utilisation des accélérogrammes .....	87
4.1.4	PRISE EN COMPTE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES ONDES SISMIQUES .....	88
4.1.4.1	Sources d'incohérence du mouvement sismique.....	88
4.1.4.2	Prise en compte dans le calcul.....	89
<b>4.2</b>	<b>METHODES D'ANALYSE .....</b>	<b>91</b>
4.2.1	INTRODUCTION.....	91
4.2.2	MÉTHODES SIMPLIFIÉES.....	91
4.2.2.1	Méthode de l'EC8-2 §7.5.4 : Analyse spectrale équivalente par le mode fondamental .....	92
4.2.2.2	Approche Kahan pour le prédimensionnement pour amortisseurs en $C.V^\alpha$ .....	93
4.2.2.3	Méthode basée sur l'énergie dissipée par les amortisseurs.....	96
4.2.3	MÉTHODES GÉNÉRALES .....	96
4.2.3.1	Mouvement du sol au droit d'un appui.....	97
4.2.3.2	Décorrélation des mouvements du sol entre deux appuis .....	97
4.2.3.3	Modélisation des dispositifs glissants .....	97
4.2.4	MODÉLISATION DE LA STRUCTURE .....	98
4.2.4.1	Finesse du maillage .....	98
4.2.4.2	Introduction des caractéristiques géométriques et massiques .....	99
4.2.4.3	Introduction des rigidités.....	99
4.2.4.4	Introduction de l'amortissement structurel.....	99
4.2.4.5	Introduction des liaisons.....	100
4.2.4.6	Modèles rhéologiques des liaisons (amortisseurs).....	101
4.2.4.7	Simplifications possibles.....	106
4.2.5	MÉTHODES DE CALCUL.....	107
4.2.5.1	Calcul théorique.....	107
4.2.5.2	Calcul automatisé .....	107
4.2.6	EXPLOITATION DES RÉSULTATS .....	107
4.2.6.1	Cas des méthodes simplifiées.....	107
4.2.6.2	Cas des méthodes générales .....	107
<b>4.3</b>	<b>DIMENSIONNEMENT .....</b>	<b>108</b>
<b>5.</b>	<b><u>PROBLÉMATIQUES LIÉES À LA DURABILITÉ ET À L'ENTRETIEN DES DISPOSITIFS .....</u></b>	<b><u>109</u></b>
<b>5.1</b>	<b>ESSAIS DE QUALIFICATION SELON LA NORME NF EN 15129 .....</b>	<b>109</b>
5.1.1	EXIGENCES DE LA NORME NF EN 15129.....	109
5.1.2	ESSAIS ET DOMAINE D'EMPLOI.....	110
5.1.2.1	Essais de type (ITT).....	111
5.1.2.2	Essais de contrôle de la production en usine (FPC).....	111
5.1.2.3	Références des essais de type et de contrôle de production en usine.....	112
5.1.3	EXEMPLE D'ÉLÉMENTS DE QUALIFICATION DES DISPOSITIFS MIS EN ŒUVRE SUR LE PONT RION-ANTIRION.....	117
<b>5.2</b>	<b>RECOMMANDATIONS RELATIVES AUX DOCUMENTS D'ÉTUDE, À LA FOURNITURE, À LA POSE, À L'INSPECTION ET À L'ENTRETIEN DES DISPOSITIFS .....</b>	<b>118</b>
5.2.1	DOCUMENTS D'ÉTUDE .....	118
5.2.2	FOURNITURE ET POSE.....	119
5.2.3	ENTRETIEN.....	119
5.2.3.1	Environnement général des dispositifs.....	120
5.2.3.2	Efficacité des attaches aux structures.....	120
5.2.3.3	Travaux à proximité.....	120
5.2.3.4	Fiche signalétique.....	120
5.2.4	INSPECTION ET REMPLACEMENT EVENTUEL.....	120
5.2.4.1	Inspections périodiques .....	120
5.2.4.2	Inspection après tremblement de terre.....	121

5.2.5 INSTRUMENTATION .....	121
5.2.5.1 Instrumentation permanente .....	121
5.2.5.2 Instrumentation temporaire.....	121

<b><u>RÉFÉRENCES NORMATIVES ET BIBLIOGRAPHIQUES .....</u></b>	<b>122</b>
---	------------

<b><u>CRÉDIT PHOTOS.....</u></b>	<b>123</b>
----------------------------------	------------

## AVANT-PROPOS

L'expérience des séismes passés a montré que la bonne tenue des infrastructures de transport constituait un des éléments clés de la rapidité d'accès et d'intervention des secours, contribuant ainsi très significativement à la limitation du nombre de victimes.

Le long des réseaux de transport, les ponts sont généralement identifiés par la communauté civile et les maîtres d'ouvrages, à la fois comme les structures les plus emblématiques et les plus critiques pour la gestion de crise, car leur effondrement peut s'avérer rédhibitoire à la réouverture des accès à court ou moyen termes. Ainsi, les pertes associées à la ruine d'un ouvrage d'art lors d'un tremblement de terre doivent intégrer, outre le coût des réparations de l'ouvrage, toutes les conséquences sociales, humaines et économiques de cette ruine et de l'interruption de l'itinéraire. Ces coûts indirects s'avèrent généralement beaucoup plus élevés que la valeur intrinsèque du pont, en particulier, lorsque celui-ci supporte des routes stratégiques ou des réseaux vitaux pour la population (eau, gaz, électricité, télécommunication...). Une conception parasismique adéquate de ces ouvrages, ou dans le cas des ouvrages existants, un renforcement pour réduire le risque sismique, s'avère donc essentiel.

Dans ce contexte, l'emploi de dispositifs parasismiques, dont le principe consiste à filtrer ou dissiper l'énergie du tremblement de terre dans des éléments extérieurs à la structure, facilement remplaçables en cas d'endommagement, peut constituer une alternative avantageuse de protection des constructions vis-à-vis des sollicitations sismiques par rapport aux méthodes de dimensionnement parasismiques plus classiques, qui consistent à faire reprendre les efforts sismiques par les éléments porteurs de la structure.

De plus en plus utilisés en conception ou en renforcement d'ouvrages existants du fait de leur facilité de mise en œuvre et de leur efficacité à réduire significativement les sollicitations sismiques (efforts et/ou déplacements) transmises par le sol à la structure, les dispositifs parasismiques bénéficient pour la première fois en France avec la publication des nouvelles normes parasismiques européennes d'un cadre réglementaire et normatif rigoureux pour leur utilisation et leur prise en compte dans le dimensionnement des ouvrages.

En effet, l'Eurocode 8 « Calcul des structures pour leur résistance aux séismes » (ou normes NF EN 1998 et NF EN 1998/NA [4] et [5] qui remplacent les recommandations AFPS 90 et le guide AFPS 92 pour la protection parasismique des ponts) et la norme NF EN 15129 « Dispositifs antisismiques » [6] encadrent désormais l'utilisation des dispositifs parasismiques. Ces normes sont bien sûr à compléter par les normes NF EN 1337 « Appareils d'appui structuraux » et les normes Eurocode 2 « Calcul des structures en béton », Eurocode 3 « Calcul des structures en acier » et Eurocode 4 « Calcul des structures mixtes acier-béton », voire l'Eurocode 5 « Conception et calcul des structures en bois », pour le dimensionnement des structures en statique.

En se basant sur les normes Eurocode 8 et NF EN 15129 ainsi que sur l'état des pratiques actuelles, le présent document traite de l'utilisation et de la prise en compte des dispositifs parasismiques dans la conception ou le renforcement parasismique des ponts. Il aborde successivement les aspects relatifs à la présentation des différents types de conception parasismique des ouvrages et à leurs domaines d'emploi, à la description des différentes technologies de dispositifs et de leur fonction, à la présentation des méthodes de calcul et d'analyse spécifiques, ainsi qu'aux prescriptions générales liées à leur utilisation en termes de performance et durabilité par la description d'essais de qualification, fourniture, pose, inspection et entretien. Couvrant ainsi l'ensemble des problématiques associées à l'emploi des dispositifs parasismiques sur les ponts neufs comme existants, ce cahier technique devrait constituer un document de référence essentiel pour la conception, la construction ou le renforcement d'ouvrages d'art en zone sismique, en complément des guides du Sétra « Ponts en zone sismique – Conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8 » [9] et « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » [10] pour le dimensionnement ou le renforcement des ouvrages d'art au séisme. Il devrait ainsi constituer un outil précieux pour les gestionnaires, maîtres d'œuvre et bureaux d'études ayant à utiliser, mettre en œuvre ou justifier ce type de dispositifs sur les ouvrages d'art dont ils ont la charge.

## 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
Aurélie 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 Cetmef 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.
- Cetmef : Centre d'études techniques maritimes et fluviales.
- Sétra : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements.



## 1. DIFFÉRENTS TYPES DE CONCEPTION PARASISMIQUE DES PONTS ET DOMAINES D'EMPLOI

L'Eurocode 8-2, relatif à la conception et au dimensionnement parasismique des ponts, décrit trois grands types de conceptions parasismiques basés respectivement sur un comportement élastique de la structure, sur un comportement ductile des appuis ou sur l'utilisation de dispositifs parasismiques répondant aux concepts d'isolation sismique et de dissipation d'énergie. Avant de présenter en détail le troisième type de conception qui fait l'objet de ce guide, ce premier chapitre introductif rappelle sommairement les avantages et inconvénients des différentes conceptions parasismiques et leurs domaines d'emploi.

### 1.1 CONCEPTION PARASISMIQUE BASÉE SUR UN COMPORTEMENT ÉLASTIQUE OU EN DUCTILITÉ LIMITÉE DE LA STRUCTURE

La conception élastique, basée sur un comportement élastique de la structure, conduit à dimensionner celle-ci de telle sorte que les matériaux qui la constituent restent dans leur domaine élastique linéaire de comportement sous l'effet de l'action sismique de référence. La notion de ductilité limitée (ou comportement dit « essentiellement élastique »), introduite par l'Eurocode 8, élargit cette conception au-delà du comportement idéalement élastique, en autorisant des incursions limitées dans le domaine plastique des matériaux.

Ce type de comportement est particulièrement adapté dans les zones de faible sismicité car il permet de simplifier les calculs de dimensionnement et garantit que l'ouvrage restera intact ou très faiblement endommagé à la suite d'un ou plusieurs séismes du niveau du séisme « de calcul ». En revanche, il atteint rapidement ses limites dans les zones de sismicité modérée à forte. En effet, les efforts sismiques à prendre en compte sont alors tels que la résistance à conférer à la structure et donc les coûts de réalisations peuvent s'avérer prohibitifs au regard des exigences requises. Dans ces régions, le choix d'un comportement quasi-élastique n'est donc plus approprié et on devra alors soit opter pour une conception plus permissive en terme d'endommagement admissible dans la structure (conception ductile), soit équiper l'ouvrage de dispositifs parasismiques très intéressants dans le cas de ponts dont on veut garantir la fonctionnalité immédiate après séisme.

### 1.2 CONCEPTION PARASISMIQUE BASÉE SUR UN COMPORTEMENT DUCTILE DES APPUIS

Le deuxième type de conception, dit ductile, conduit à dimensionner la structure de telle sorte que les matériaux qui la constituent subissent de larges incursions répétées dans leur domaine non-linéaire (post-élastique ou plastique) au cours d'un séisme de référence. Ces incursions maîtrisées conduisent à une dissipation importante de l'énergie sismique et par conséquent permettent une réduction efficace et un écrêtage des efforts mis en jeu et donc des coûts de construction. La conception associée à ce comportement est sans doute aujourd'hui la plus largement répandue et utilisée dans le domaine du génie parasismique. Elle est aussi celle qui induit les dispositions constructives les plus spécifiques et les plus contraignantes. Le concept de ductilité peut être décrit comme la capacité d'une structure à se déformer de façon inélastique, sans perte significative de résistance, au cours de plusieurs cycles de déplacements. Si la structure présente une ductilité suffisante, il est alors possible de réduire les efforts de dimensionnement (divisés par un coefficient de comportement  $q$  de l'ordre de 3) tout en assurant la tenue de l'ouvrage. Les incursions maîtrisées dans le domaine plastique des matériaux conduisent par ailleurs à une importante dissipation d'énergie par cycles d'hystérésis (Figure 1).

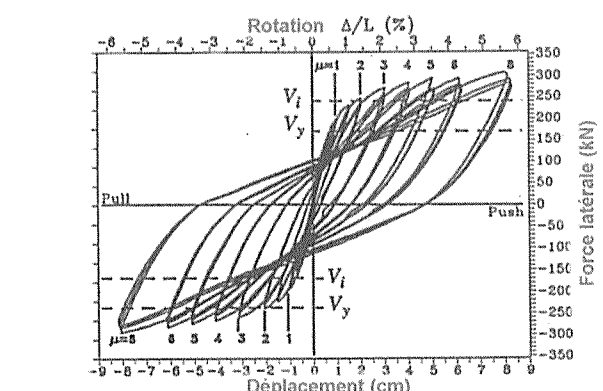


Figure 1: Dissipation d'énergie par hystérésis

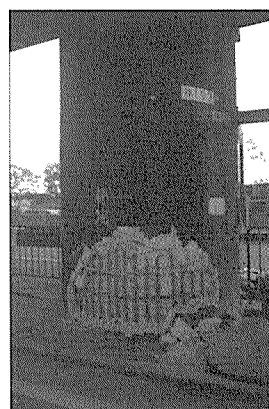


Photo 1 : Formation de rotule plastique (Kobe, 1995)

En contrepartie, l'inconvénient principal de la conception ductile est clairement qu'un certain niveau de dégradation, correspondant aux incursions dans le domaine de comportement plastique des matériaux, doit être accepté. Si les dispositions constructives parasismiques et le principe de dimensionnement en capacité sont bien appliqués, ces dégradations affecteront essentiellement les zones dites de rotules plastiques généralement localisées en pied de piles (Photo 1). Les réparations à envisager pourront aller de l'absence totale d'intervention pour un séisme faible au remplacement de certaines piles pour un séisme majeur, en passant par la simple réfection du béton d'enrobage pour un séisme moyen. On considèrera généralement qu'un ouvrage aura rempli sa fonction si les dégâts engendrés restent relativement faibles et réparables et s'ils ne remettent pas en cause la fonctionnalité d'urgence du pont (passage des véhicules de secours) après un séisme de niveau réglementaire.

### 1.3 CONCEPTION BASÉE SUR L'UTILISATION DE DISPOSITIFS PARASISMIQUES

Au cours des dernières années, des travaux de recherche considérables ont été menés dans le monde pour développer des systèmes de protection parasismique innovants destinés à accroître le niveau de sécurité tout en maintenant des coûts de construction raisonnables. Ces systèmes sont essentiellement basés sur les deux principes d'isolation sismique et de dissipation d'énergie (ou amortissement sismique).

Le principe de l'isolation sismique consiste à dissocier les déplacements du tablier de ceux des appuis grâce à l'emploi de dispositifs très souples (appareils d'appui en élastomère fretté, appareils d'appui glissants...). Les efforts sont donc filtrés et ne sont pas transmis à la structure.

Il est généralement nécessaire de coupler les dispositifs isolateurs avec des dispositifs dissipateurs d'énergie (par exemple amortisseurs (Figure 2, Photo 2), afin fin de limiter d'une part les déplacements sous séisme et d'assurer d'autre part un niveau de confort satisfaisant sous les effets du vent et des charges de service. Le bon calibrage de ces dispositifs permet alors de maintenir à la fois les efforts et les déplacements (et déformations locales) à des niveaux raisonnables.

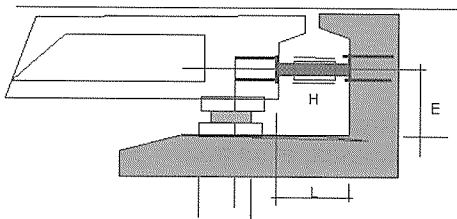


Figure 2 Dispositif amortisseur placé entre le tablier et la culée

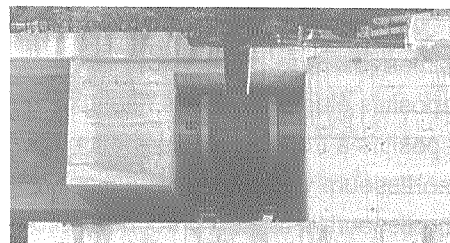


Photo 2 : Amortisseurs longitudinaux sur le Viaduc de Fella (Italie)

Le principal avantage de ce type de conception est que les sollicitations (efforts, déplacements) induites par le tremblement de terre sont absorbées dans des dispositifs externes à la structure. L'ouvrage ne subit alors en théorie aucun dégât et les matériaux constitutifs de la structure restent dans leur domaine élastique de comportement (Figure 3). En cas de séisme majeur, les dispositifs parasismiques sont facilement inspectés et remplacés si besoin.

En contrepartie de la réduction des efforts et/ou déplacements, les calculs de dimensionnement sont relativement complexes et nécessitent des outils puissants (calculs dynamiques non-linéaires). En outre, les exigences de maintenance et la stabilité des caractéristiques mécaniques des dispositifs (au cours du temps et indépendamment des conditions d'environnement extérieur) constituent des critères déterminants puisque la protection parasismique de l'ouvrage dépend directement du bon fonctionnement de ces dispositifs.

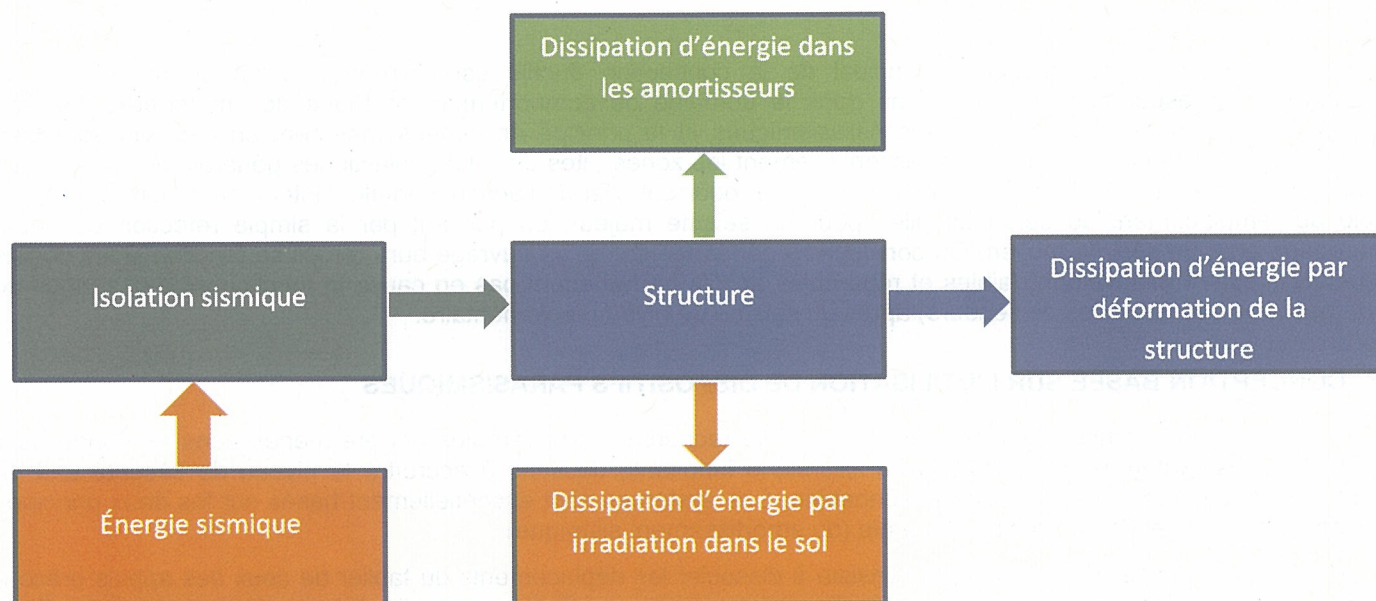


Figure 3 : Schéma énergétique global dans le cas de l'utilisation des concepts d'isolation sismique et d'amortissement

L'Eurocode structural 8-2 (ou normes NF EN 1998-2 et NF EN 1998-2/NA) « Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – partie ponts » et la norme produit NF EN 15129 « Dispositifs antisismiques » encadrent l'utilisation de ces dispositifs parasismiques sur les ouvrages d'art. L'EC8-2 permet ainsi d'évaluer les sollicitations sismiques (efforts et déplacements) induites dans la structure ainsi que son comportement global (ou réponse sismique) tandis que la norme produit NF EN 15129 définit les caractéristiques des dispositifs ainsi que les éléments de dimensionnement et de qualifications.

Il existe de nombreux types de dispositifs parasismiques utilisables sur les ouvrages d'art, dont la fonction (blocage, isolation ou dissipation d'énergie) diffère selon le type de dispositif, et se trouve généralement associée à une direction donnée (caractère « directionnel » des dispositifs) :

- Les dispositifs glissants (isolation) ;
- Les appareils d'appui en élastomère fretté sans (isolation/assouplissement) ou avec (isolation et/ou dissipation d'énergie) et à noyau de plomb ;
- Les attelages sismiques et connecteurs dynamiques (blocage sous séisme) ;
- Les fusibles (blocage en service) ;
- Les dispositifs élastoplastiques (isolation et/ou dissipation d'énergie) ;
- Les dispositifs à frottement (dissipation d'énergie) ;
- Les amortisseurs visqueux (dissipation d'énergie) ;
- Les amortisseurs à ressort précontraint (blocage en service et dissipation d'énergie) ;
- Les amortisseurs actifs ou semi-actifs (dissipation d'énergie)

Les appareils d'appui en élastomère sont peu détaillés dans ce document, car leur fonctionnement et leur dimensionnement sont relativement proches du cas statique qui est largement couvert par la documentation technique sur le sujet (guide Sétra sur les appareils d'appui en élastomère fretté [7]). De la même façon, les dispositifs glissants, qui fournissent une isolation totale de l'appui par rapport au tablier et sont également utilisés sous conditions statiques (dilatations thermiques), ne sont pas traités en détail ici, et on se référera au guide Sétra sur les appareils d'appui à pot [8].

Depuis quelques années, des progrès technologiques notables ont été effectués dans le domaine des dispositifs parasismiques et ont conduit au développement et à la mise sur le marché d'amortisseurs dits « actifs » ou « semi-actifs ». Ces dispositifs, non actuellement couverts par la norme NF EN 15129, sont seulement brièvement évoqués au §3.1.3.4 du présent document.

Le tableau suivant, extrait de la norme NF EN 15129, liste les dispositifs les plus courants couverts par cette norme (en précisant les numéros de paragraphes associés).

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 (*)
		Mobilis	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 (DDD)	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 sismiques	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.						

Tableau 1 : Types de dispositifs parasismiques les plus courants (extrait de la norme NF EN 15129 – tab. 1 [6])

A noter enfin que le présent document, dans ses paragraphes 3.1.2.6 et 3.2.1.5, aborde également les aspects relatifs aux butées parasismiques (description, fonctions, domaines d'emploi et prise en compte dans les calcul) bien que celles-ci soient en général davantage assimilables à des éléments constitutifs de la structure (ergots de béton) qu'à des dispositifs « rajoutés ». Ces butées sont également utilisées dans le cadre de la conception en ductilité limitée et dans celui de la conception ductile.

## 1.4 TABLEAU RÉCAPITULATIF ET DOMAINES D'EMPLOI

Le tableau ci-dessous récapitule brièvement les trois grands types de conception parasismique envisageables en insistant notamment sur leurs domaines d'emploi respectifs, le niveau de performance post-sismique attendu de la structure et les conditions de maintenance.

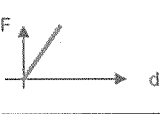
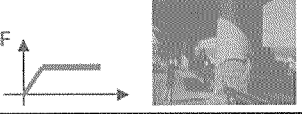
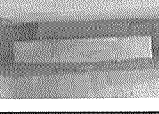

	DUCTILITE LIMITEE (ou essentiellement élastique)	DUCTILE (ductilité structurelle)	DISPOSITIFS PARASISMIQUES	
			Isolateurs, AA élastomère classiques	Amortisseurs, systèmes ductiles
				
Domaines d'application privilégiés	Sismicité faible à modérée Ouvrages courants ou à fort enjeu (dessertes hôpitaux, 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

## 2. INFLUENCE DU CHOIX ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE DISPOSITIFS PARASISMIQUES

### 2.1 GÉNÉRALITÉS

Le choix des dispositifs parasismiques ne doit pas se faire en considérant uniquement leur influence sur le comportement de l'ouvrage sous séisme. En effet, et en particulier dans les régions de sismicité faible à modérée telles que la plupart des régions situées en France métropolitaine, la résistance des ponts aux sollicitations horizontales (contreventement) doit tout d'abord prendre en compte les charges de service classiques comme les dilatations thermiques, le vent et le freinage.

Pour les ouvrages à plusieurs travées, les dispositions courantes vis-à-vis des actions non-sismiques consistent généralement en un blocage transversal du tablier sur tous les appuis, et en un blocage longitudinal sur une ou plusieurs piles voisines du centre de l'ouvrage, les autres étant équipées d'appareils d'appui glissants (Figure 4).

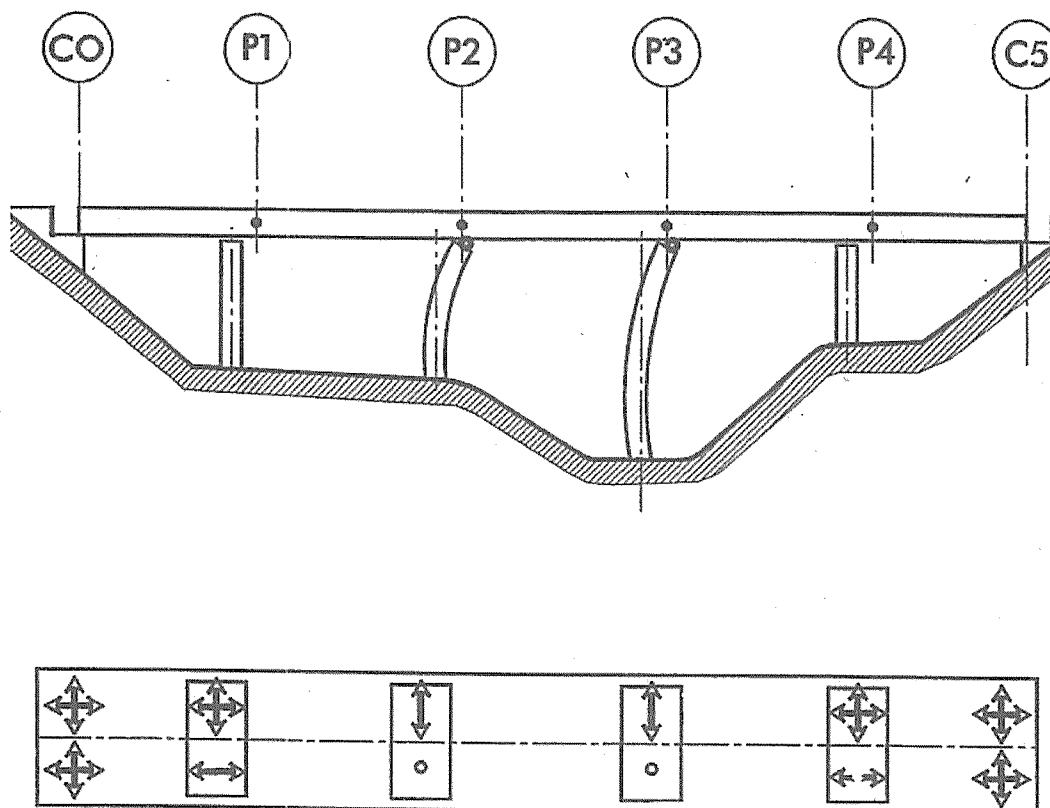


Figure 4 : Conception classique hors séisme

Sous sollicitations sismiques, une telle configuration peut s'avérer inadaptée ou trop coûteuse, notamment dans la direction longitudinale où seules les piles centrales (points fixes) et leurs fondations participent à la reprise des efforts sismiques, tandis que dans la direction transversale, les piles présentent généralement une robustesse supérieure et bénéficient en outre d'une répartition d'efforts plus favorable (tablier « retenu » horizontalement par tous les appuis selon cette direction).

Dans un tel cas, on peut optimiser la conception de deux manières différentes :

- Soit on conserve au pont un comportement sensiblement élastique linéaire et on adapte la rigidité (globale ou relative) des appuis ou l'amortissement, seuls paramètres qui, avec la masse, conditionnent la

réponse dynamique. Les efforts maximums dans les piles et les déplacements du tablier sont alors pratiquement proportionnels à l'accélération du sol.

- Soit on confère au pont un comportement élastoplastique en limitant les forces horizontales transmises aux piles par le tablier. Les efforts dans les piles sont alors écrêtés et peu dépendants du niveau sismique contrairement aux déplacements qui eux restent proportionnels à l'accélération nominale du sol (ou niveau de séisme pris en compte).

Chacune de ces deux stratégies d'amélioration du comportement sismique de la structure peut être mise en œuvre de manière relativement aisée et à moindre coût par l'emploi des dispositifs parasismiques, qui permettront :

- de changer le schéma statique, afin de mieux répartir les efforts longitudinaux entre les appuis (connecteurs dynamiques, fusibles...);
- et/ou de réduire globalement ces efforts (isolation, assouplissement, dissipation d'énergie par l'emploi d'amortisseurs visqueux ou élastoplastiques...).

## 2.2 FONCTIONS RÉALISABLES PAR LES DISPOSITIFS PARASISMIQUES

Les différents dispositifs disponibles permettent d'obtenir les relations force-déplacement suivantes.

### 2.2.1 RESSORT ÉLASTIQUE

Les déplacements aller et retour suivent sensiblement la même trajectoire. Il n'y a donc pas ou peu d'énergie dissipée pendant un cycle, donc peu d'amortissement.

La courbe force-déplacement peut être proche d'une droite (Figure 5).

Cette fonction peut être assurée par exemple par des appareils d'appui en élastomère classiques (à faible amortissement).

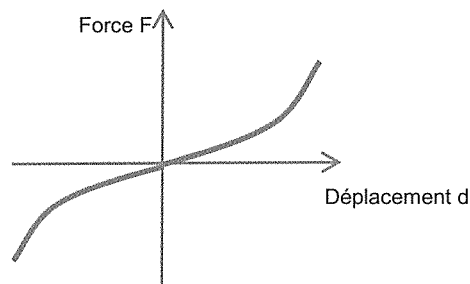


Figure 5 : Loi de comportement de type "ressort élastique"

### 2.2.2 FUSIBLE

Il s'agit d'un ressort élastique dont la résistance disparaît complètement dès que l'on dépasse un certain déplacement (Figure 6).

Cette fonction est par exemple obtenue avec une goupille métallique qui péricite par cisaillement. Elle permet de supprimer la liaison du tablier avec un appui et donc de passer d'une configuration en service où les déplacements sont bloqués à une configuration spécifique au séisme où les déplacements sont libres (Figure 7).

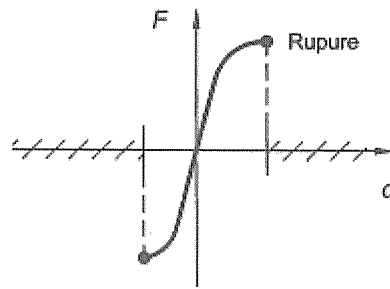


Figure 6 : Loi de comportement de type "fusible"

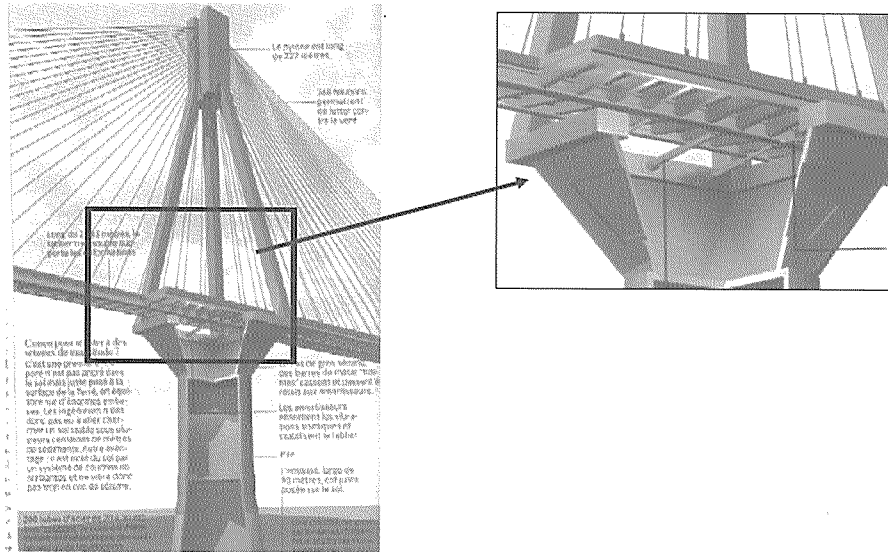


Figure 7 : Exemple de systèmes fusibles associés à des amortisseurs visqueux et destinés à bloquer les déformations sous charges de service (vent, séisme de faible niveau...) sur le pont de Rion-Antirion en Grèce (Source : revue Science & Vie n°1040, mai 2004)

### 2.2.3 AMORTISSEUR VISQUEUX

Les cycles force-déplacement dépendent de la vitesse (Figure 8). Chaque cycle dissipe de l'énergie, d'où un amortissement du mouvement.

Cette fonction est réalisée par des amortisseurs contenant un fluide plus ou moins visqueux.

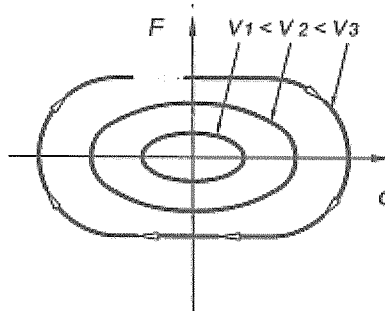


Figure 8 : Loi de comportement de type "amortisseur visqueux"

### 2.2.4 LIMITEUR D'EFFORT ÉLASTO-PLASTIQUE

La relation force-déplacement, indépendante de la vitesse, est du type élasto-plastique avec ( $p_2 \neq 0$ ) ou sans ( $p_2 = 0$ ) écoulement (Figure 9).

Les cycles dissipent de l'énergie dès que la limite élastique est dépassée.



Cette fonction est assurée par :

- des amortisseurs visqueux pilotés par des soupapes,
- des dispositifs à frottement,
- des dispositifs utilisant la flexion de pièces métalliques. Dans ce dernier cas seulement, la fonction est du type "avec écrouissage".

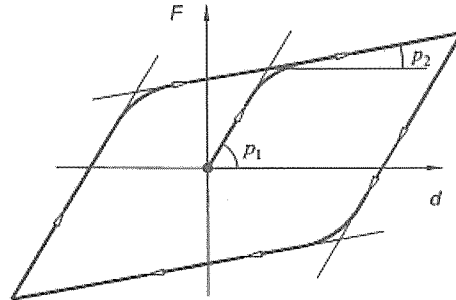


Figure 9 : Loi de comportement de type "limiteur d'effort élasto-plastique"

### 2.2.5 COUPLEUR DYNAMIQUE

Le déplacement relatif est libre pour une vitesse très lente. Il devient quasi-nul pour une vitesse au-delà d'un certain seuil.

Cette fonction est remplie par :

- des dispositifs mécaniques spécifiques,
- des amortisseurs visqueux réglés spécialement.

Elle permet en cas de séisme de réaliser des liaisons supplémentaires entre les piles et le tablier.

## 2.3 EXEMPLES DE CONCEPTION

Les exemples développés ci-dessous visent à illustrer par le calcul différents principes ou stratégies d'optimisation de la conception parasismique d'un pont, basées sur l'emploi de dispositifs parasismiques.

L'analyse des différentes conceptions parasismiques envisagées est menée sur un même exemple théorique d'un ouvrage à quatre travées soumis à un séisme selon sa direction longitudinale.

Pour chacune des différentes conceptions parasismiques testées, l'analyse est menée à la fois vis-à-vis du séisme et de la compatibilité (ou non modification) vis-à-vis de la situation en service, qui constitue également un paramètre essentiel (cf. §2.1 et §2.4.2).

### 2.3.1 CONCEPTION COURANTE

Les appareils d'appui sont glissants sauf ceux de la pile P2, qui sont fixes (Figure 10).

La configuration est la même en service ou en cas de séisme.

Si on néglige la masse des piles, la période propre du mode principale a pour valeur  $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_2}}$

(avec  $m$  masse du tablier et  $k_2$  raideur de la pile P2).

On en déduit la pseudo-accélération  $\gamma_1$  par lecture du spectre et l'effort tranchant  $m\gamma_1$  équilibré par la pile P2.

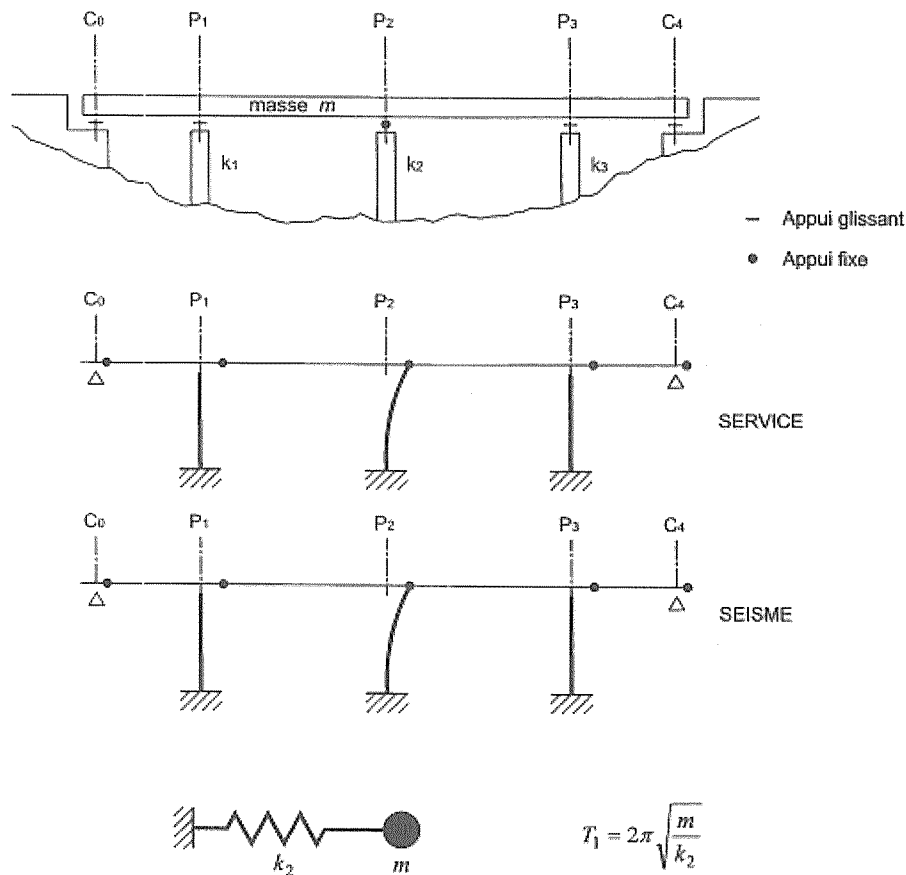


Figure 10 : Conception courante

### 2.3.2 COUPLEURS DYNAMIQUES

On rajoute au cas précédent des coupleurs dynamiques sur les piles P1 et P3 (Figure 11).

La configuration en service est la même que dans le cas précédent.

En cas de séisme, les coupleurs bloquent le déplacement et la masse  $m$  du tablier est retenue par les piles P1, P2 et P3, travaillant en parallèle.

La période du mode principal a pour valeur :  $T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2 + k_3}} < T_1$

On en déduit la pseudo-accelération  $\gamma_2$  et la force horizontale totale  $m\gamma_2$  équilibrée par les trois piles, d'où l'effort horizontal en tête des trois piles :

$$H_1 = m\gamma_2 \frac{k_1}{k_1 + k_2 + k_3} ; \quad H_2 = m\gamma_2 \frac{k_2}{k_1 + k_2 + k_3} ; \quad H_3 = m\gamma_2 \frac{k_3}{k_1 + k_2 + k_3}$$

La force totale à équilibrer est inférieure ou supérieure à celle du cas précédent, selon que la période  $T_2$  se trouve dans la partie montante ou descendante du spectre. Elle est distribuée sur trois piles, ce qui peut optimiser les fondations en répartissant mieux les efforts.

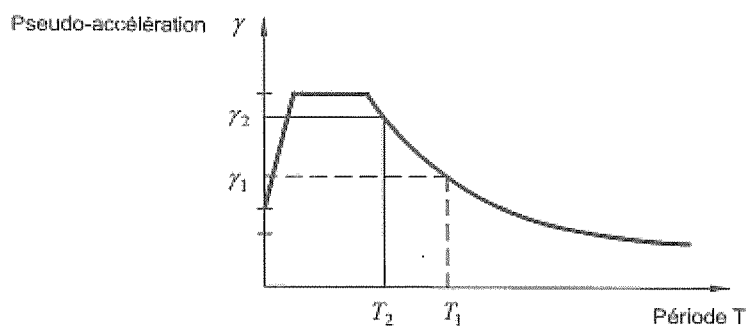
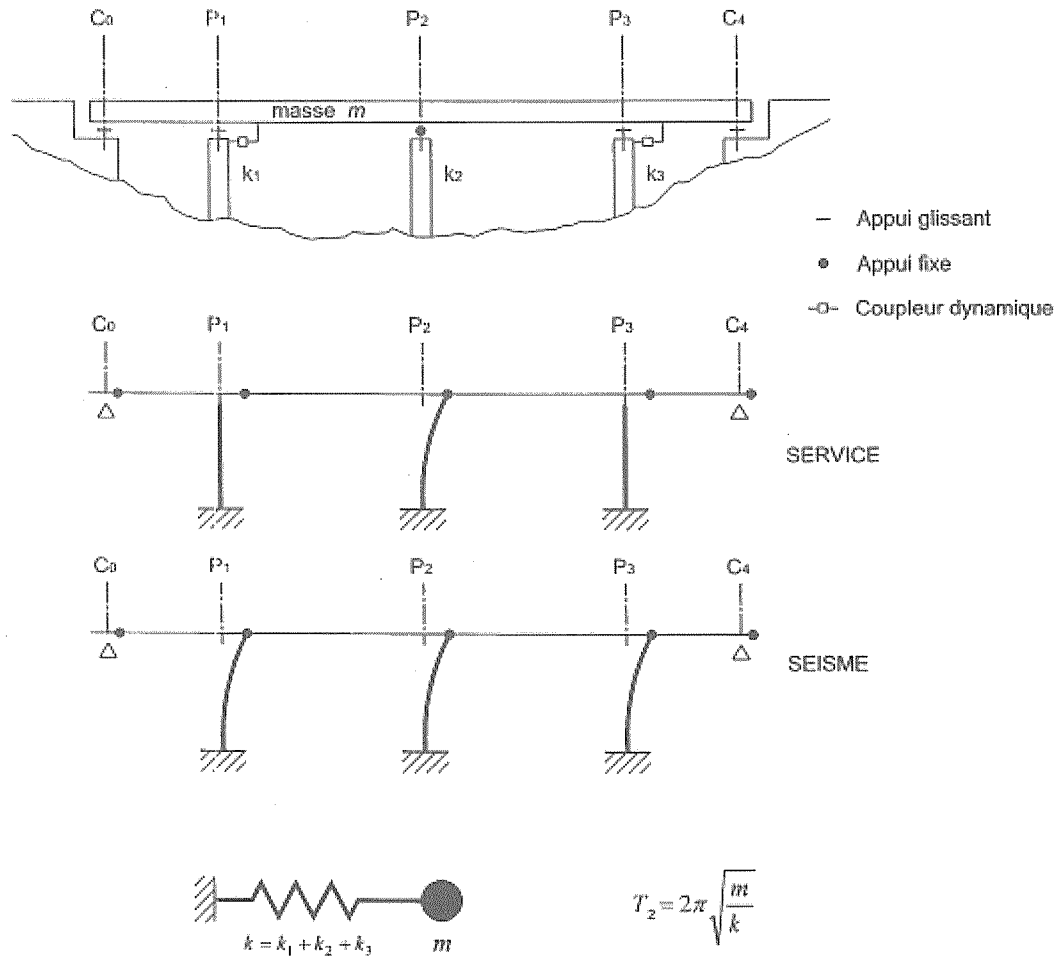


Figure 11 : Conception basée sur l'emploi de coupleurs dynamiques

### 2.3.3 APPAREILS D'APPUI EN ÉLASTOMÈRE FRETTÉ

Les piles et les culées sont équipées d'appareils d'appui en élastomère fretté (Figure 12). La raideur totale de l'ensemble appareils d'appui et piles est notée  $k$  ; en pratique cette raideur est nettement inférieure à  $k_2$ , raideur de la pile P2.

La configuration est la même en service ou en cas de séisme.

La période propre du mode principal a pour valeur :  $T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} > T_1$

Cette période  $T_3$  est toujours située dans la partie descendante du spectre, on a donc à équilibrer une force horizontale totale :  $m\gamma_3 < m\gamma_1$ .

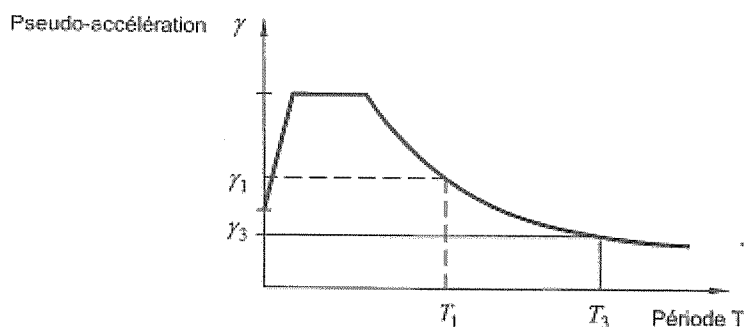
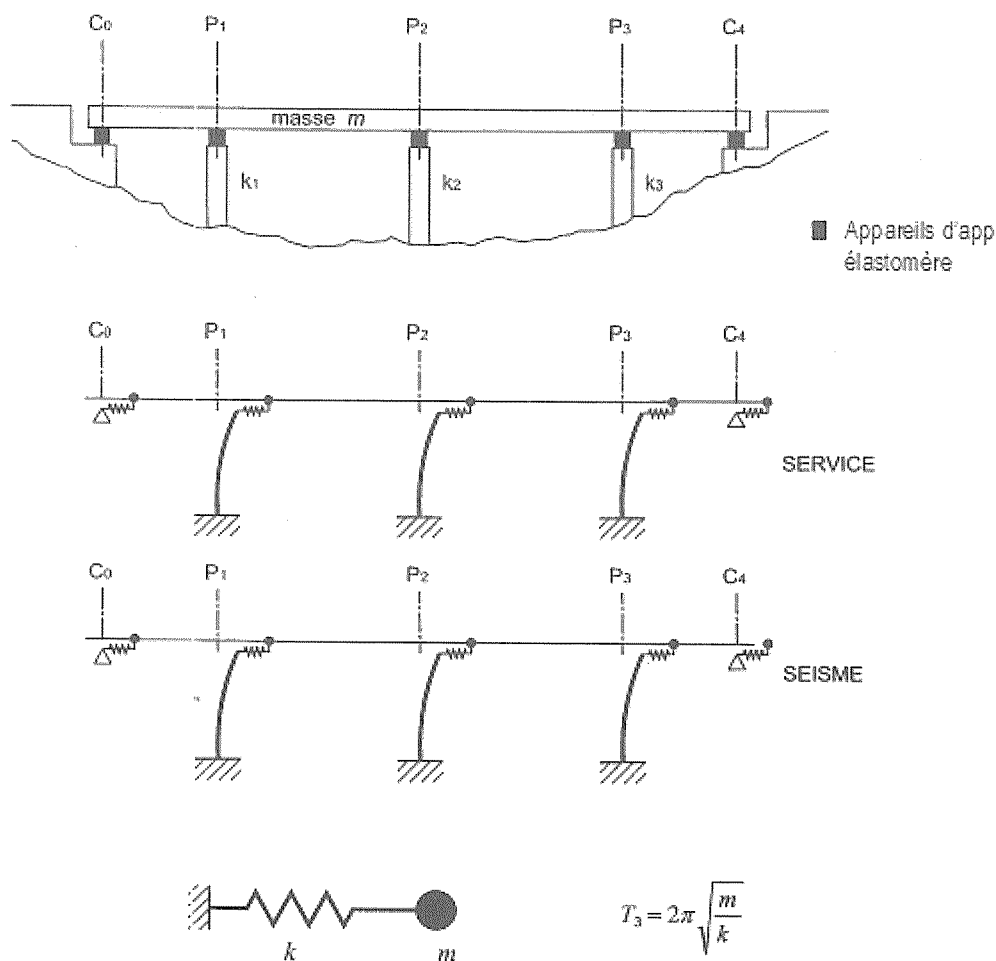


Figure 12 : Conception basée sur l'emploi d'appareils d'appui en élastomère fretté

En théorie, il est possible de cumuler l'emploi d'appareils d'appui en élastomère fretté avec l'utilisation d'un coefficient de comportement supérieur à 1, signifiant la prise en compte d'une plastification des piles, selon le principe décrit par la Figure 13.

Dans la pratique, on constatera dans la plupart des cas que la rupture de l'appareil d'appui sera atteinte avant la plastification de la pile. L'équation associée à cette figure montre par ailleurs que l'obtention d'un coefficient de comportement global  $q_2$  de l'ordre de 2,0 impose de conférer à la pile une ductilité  $q_1$  environ deux fois plus élevée.

Dans cette configuration, l'assouplissement de la pile est tel que l'emploi d'appareils d'appuis en élastomère fretté devient injustifié.

Par conséquent et conformément aux prescriptions de l'EC8-2, nous conseillons dans le cas d'une conception basée sur l'emploi d'appareils d'appui en élastomère, de limiter les coefficients de comportement des éléments structurels ( $q_1$ ) à une valeur de 1.0.

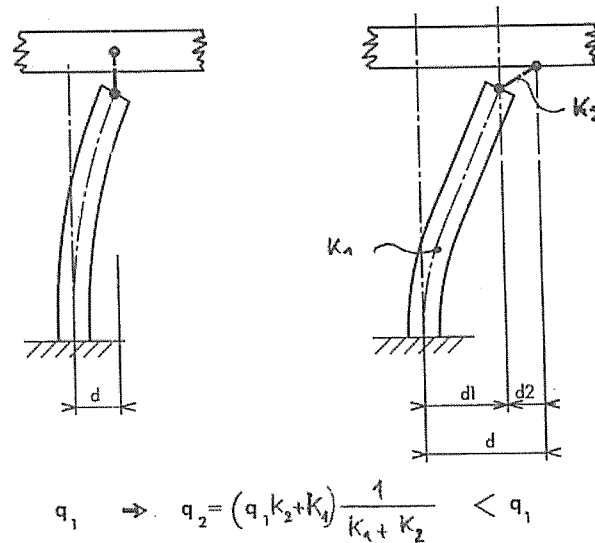


Figure 13 : Calcul du coefficient de comportement global dans le cas de l'utilisation d'appareils d'appui en élastomère fretté

#### 2.3.4 AMORTISSEURS VISQUEUX DISPOSÉS EN PARALLÈLE

La conception initiale décrite en 2.3.1 est complétée par des amortisseurs visqueux situés sur la pile P1 (Figure 14).

La configuration en service est celle du cas 2.3.1 : le contreventement est assuré par la pile P2 seule.

En cas de séisme la masse du tablier est retenue par la pile P2 et par l'amortisseur en série avec la pile P1.

La période propre du mode principal, du moins pour des valeurs relativement faibles de l'amortissement visqueux, a pour valeur :

$$T_4 \approx 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_2}} = T_1$$

L'amortissement global du système est supérieur à celui des piles seules, (classiquement 5% forfaitaire pour les piles en béton) correspondant au spectre de réponse.

La pseudo-accélération a donc pour valeur :  $\gamma_4 < \gamma_1$

D'où l'effort global à répartir sur les piles P1 et P2 :  $m\gamma_4 < m\gamma_1$

La force totale à équilibrer est inférieure à celle du cas 2.3.1 et de plus elle est répartie sur 2 piles.

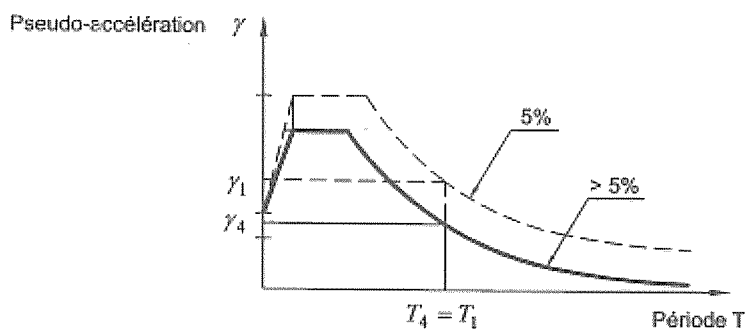
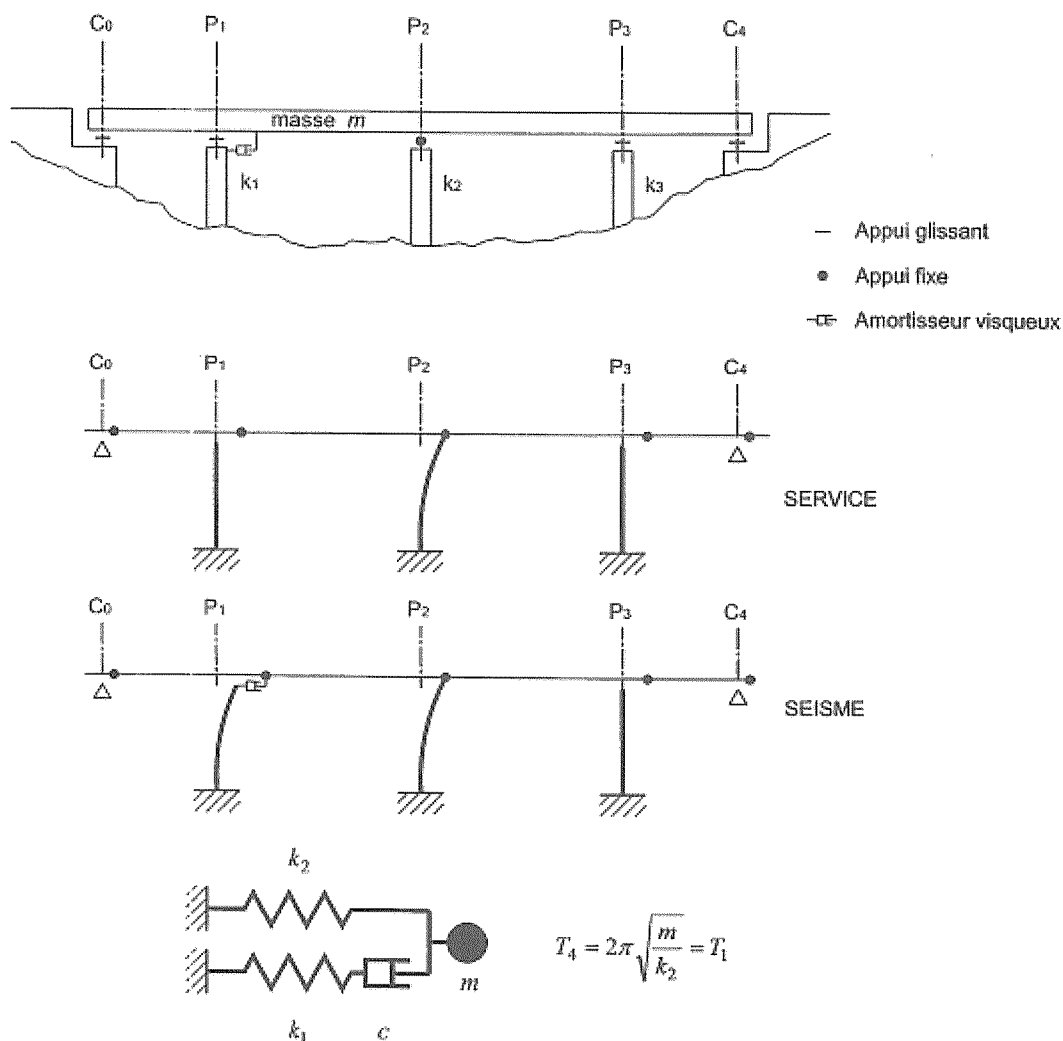


Figure 14 : Conception basée sur l'emploi d'amortisseurs visqueux disposés en parallèle

Cette configuration est optimale lorsque la pile sur laquelle est positionné l'amortisseur visqueux est relativement rigide, permettant à ce dernier d'absorber la plus grande part du déplacement sismique. Il convient également, en particulier sur les ponts de grande longueur, de positionner l'amortisseur au plus près du point fixe (ici P2) afin que celui-ci dissipe bien la vibration du tablier plutôt que les déplacements différentiels du sol sous les différents appuis. Dans la pratique, le choix optimal résultera souvent d'un compromis entre ces deux considérations potentiellement contradictoires.

Les efforts transmis aux appuis et les déplacements du tablier doivent être évalués par un calcul temporel non-linéaire compte tenu de la non-linéarité des lois de comportement de ces dispositifs (effort de réaction et amortissement dépendant de la vitesse de sollicitation à chaque instant). Des méthodes simplifiées par calcul spectral

équivalent existent cependant (cf. EC8-2 §7 et chapitre 4.2 du présent guide) qui permettent d'évaluer ces sollicitations dans le cadre de calculs de prédimensionnement.

### 2.3.5 AMORTISSEURS VISQUEUX DISPOSÉS EN SÉRIE

Tous les appareils d'appui sont glissants et la pile P2 est équipée d'un dispositif combinant une fonction fusible et un amortisseur (Figure 15).

Il peut s'agir par exemple d'un amortisseur visqueux bloqué par une goupille.

La configuration en service est celle du cas de conception initiale du chapitre 2.3.1. En cas de séisme, le fusible casse et le tablier n'est plus relié aux piles que par l'amortisseur.

L'amortisseur fonctionne donc en série avec le ressort représentant la pile P2.

L'effort en tête de pile et le déplacement relatif pile-tablier doivent être évalués par un calcul temporel non-linéaire. Ce calcul permet d'apprécier en particulier l'effet de la rupture de la goupille lorsque ce système est utilisé.

En effet, cette rupture correspond à une libération d'énergie et peut entraîner des modifications d'efforts importantes, ainsi qu'une modification du schéma statique.

Il convient de mettre en garde les concepteurs vis-à-vis des accumulations de déplacements et des déplacements résiduels auxquels peut aboutir ce type de conception. En particulier, celle-ci ne conviendra pas en général pour des ponts ferroviaires pour lesquels il faut toujours un appui fixe après séisme, pour reprendre les efforts longitudinaux très élevés de freinage-accelération.

De plus, les dispositifs fusibles devront être remplacés après séisme.

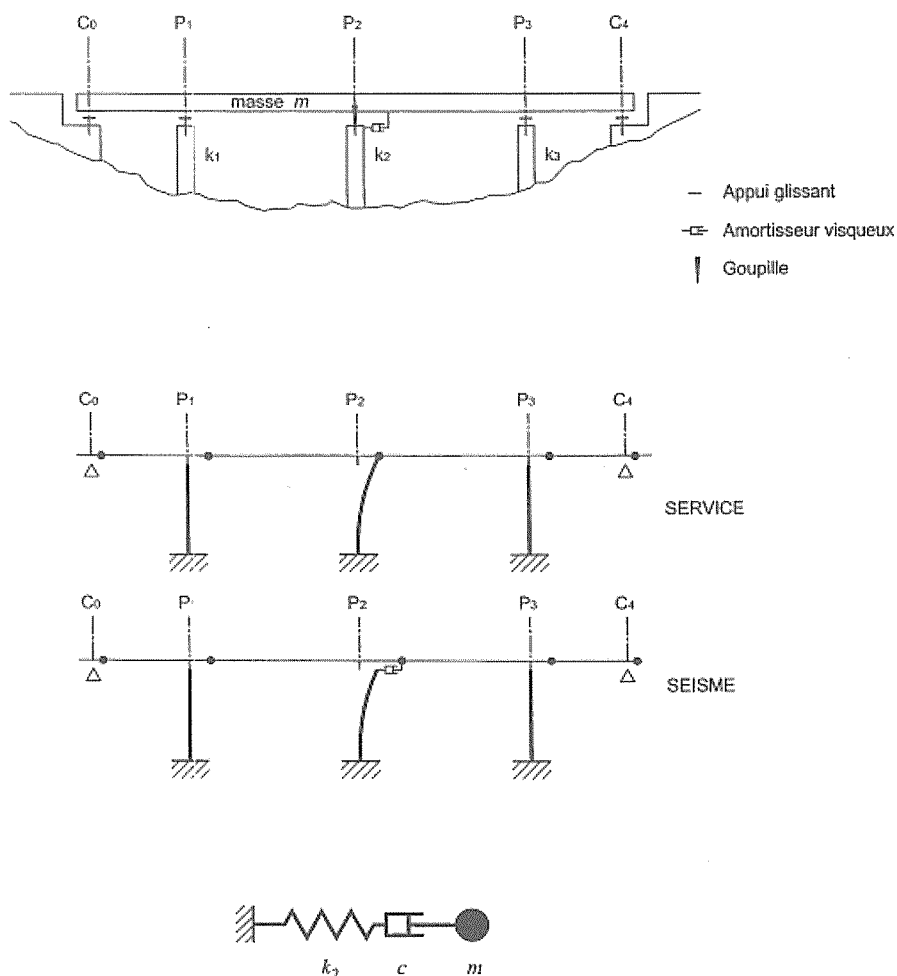


Figure 15 : Conception basée sur l'emploi d'amortisseurs visqueux disposés en série

### 2.3.6 AMORTISSEURS ÉLASTOPLASTIQUES DISPOSÉS EN SÉRIE

Tous les appareils d'appui sont glissants et la pile P2 est équipée d'un limiteur d'effort élastoplastique (Figure 16).

La configuration en service est celle du cas de conception initiale du chapitre 2.3.1 : le contreventement est assuré par la pile P2 seule. Le fusible reste dans le domaine élastique (raideur  $p_1$ ).

En cas de séisme le fusible se plastifie et le dispositif fonctionne alors comme un amortisseur.

La masse  $m$  du tablier est alors retenue par l'amortisseur en série avec la pile P2.

L'effort en tête de pile P2 et le déplacement relatif pile-tablier doivent être évalués par un calcul temporel non-linéaire. Toutefois l'effort horizontal maximum en tête de la pile P2 est connu, quelque soit le niveau sismique considéré :

- parfaitement dans le cas des fusibles sans écrouissage ( $p_2 = 0$ )
- approximativement dans le cas des fusibles avec écrouissage ( $p_2 \neq 0$ )

Le calcul temporel sert donc principalement à estimer le déplacement relatif piles/tablier qui lui est dépendant du niveau sismique considéré.

Des méthodes simplifiées par calcul spectral équivalent existent (cf. EC8-2 §7 et chapitre 4.2 du présent guide) qui permettent d'évaluer ce déplacement dans le cadre de calculs de prédimensionnement.

Comme dans le cas de la conception précédente, il est important de noter que des déplacements résiduels et des accumulations de déplacements sont à prévoir. Cette solution n'est donc pas conseillée pour les ponts ferroviaires, qui nécessitent de maintenir un point fixe longitudinal après séisme.



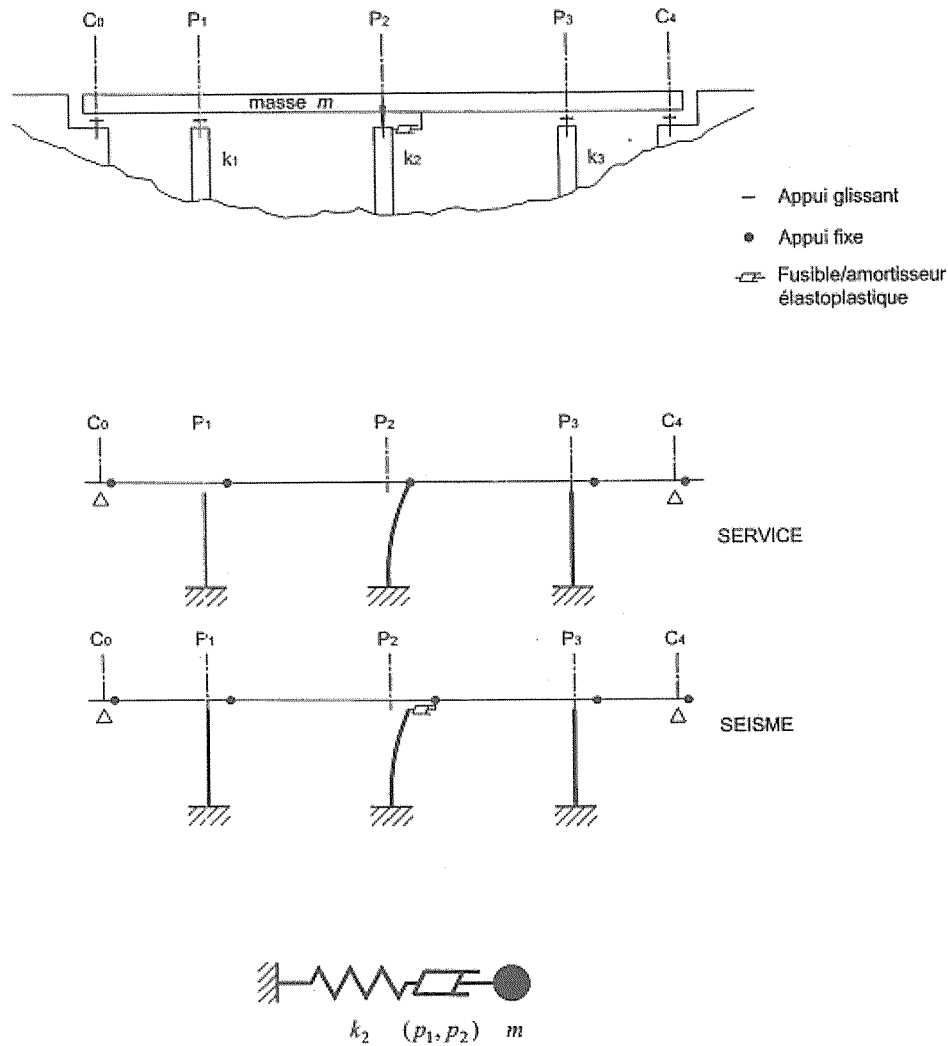


Figure 16 : Conception basée sur l'emploi d'amortisseurs élastoplastiques disposés en série

### 2.3.7 COMBINÉS RESSORTS-AMORTISSEURS DISPOSÉS EN SÉRIE

Tous les appareils d'appui sont glissants et la pile P2 est équipée d'un dispositif hydraulique remplissant à la fois les fonctions ressort et amortisseur (Figure 17).

Le ressort est élastique non linéaire, sa résistance est donc bornée. La configuration en service est celle du cas de conception initiale du chapitre 2.3.1 : le contreventement est assuré par la pile P2 seule. En cas de séisme, la raideur du ressort s'annule dès que le déplacement dépasse une certaine valeur. Le dispositif fonctionne alors comme un amortisseur hydraulique.

Le comportement du ressort étant élastique non-linéaire, l'évaluation des efforts et des déplacements doit s'effectuer à l'aide d'un calcul temporel non-linéaire. Des méthodes simplifiées par calcul spectral équivalent existent néanmoins (cf. EC8-2 §7 et du chapitre 4.2 du présent guide) qui permettent d'évaluer ce déplacement dans le cadre de calculs de prédimensionnement.

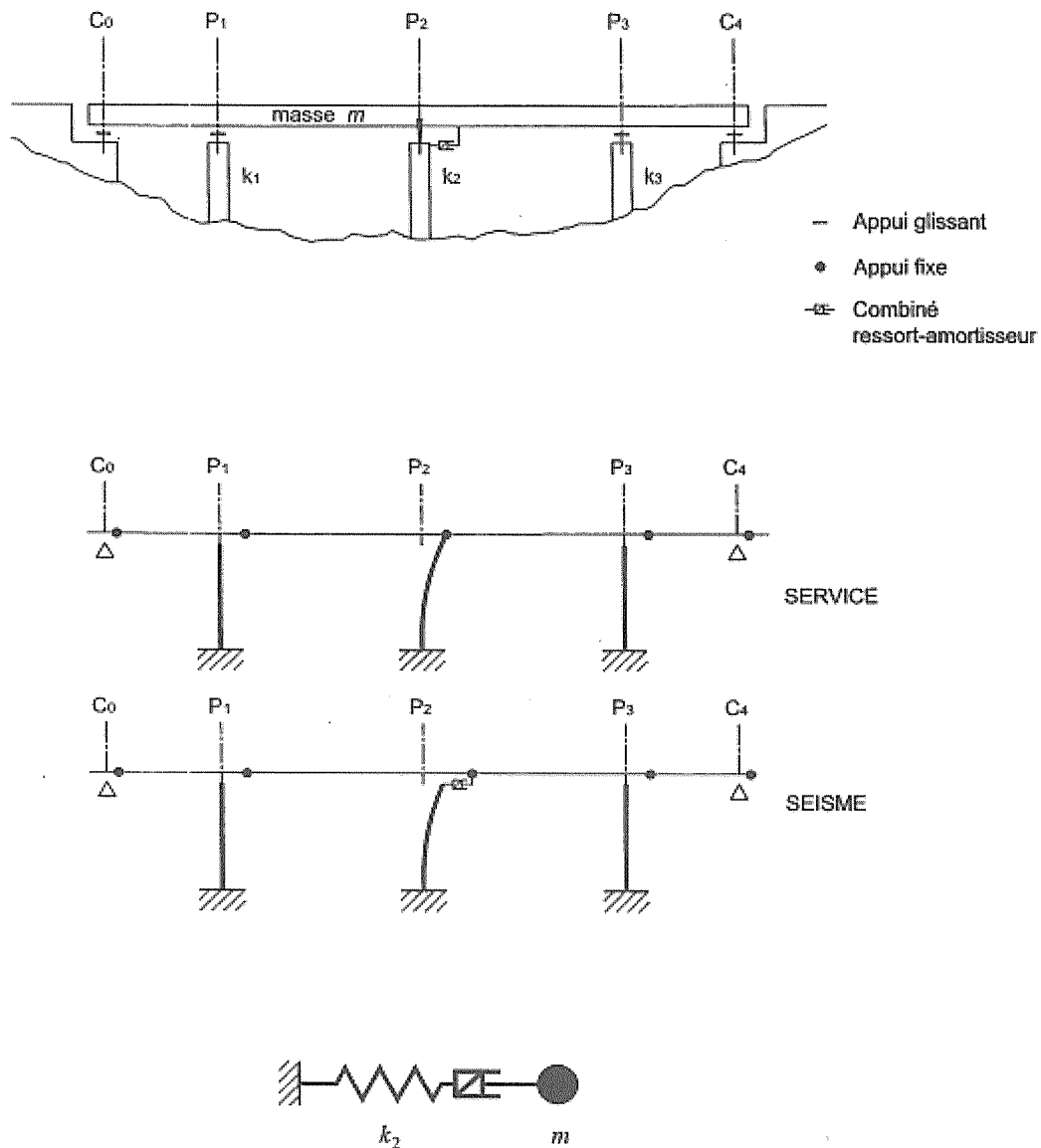


Figure 17 : Conception basée sur l'emploi d'un combiné ressort-amortisseur

D'un point de vue purement mécanique, cette solution présente exactement les mêmes avantages que celle basée sur l'emploi d'amortisseurs visqueux disposés en série équipés d'une goupille fusible (cas 2.3.5). Par contre, les efforts importants provoqués la rupture par cisaillement de la goupille sont ici avantageusement supprimés.

De plus, ces dispositifs présentent l'avantage d'assurer une fonction de recentrage de l'ouvrage après séisme.

## 2.4 OPTIMISATION DE LA CONCEPTION

### 2.4.1 CHOIX DU COEFFICIENT DE COMPORTEMENT ( $q=1$ OU $q > 1$ )

#### 2.4.1.1 Considérations générales

Dans les cas 2.3.1 (conception courante sans dispositif parasismique) et 2.3.2 (coupleurs dynamiques), les sollicitations sismiques peuvent être évaluées par un calcul élastique linéaire. Conformément aux règles parasismiques, on peut alors diviser les efforts correspondants par un coefficient de comportement  $q > 1$  (dépendant de la géométrie et du matériau constitutif des appuis) si l'on accepte une certaine dégradation en pied de piles où des rotules plastiques peuvent se former.

Ce même type de calcul est à déconseiller dans le cas 2.3.3 (appareils d'appuis en élastomère) et n'est généralement pas réalisable dans les cas où l'assouplissement de la pile résultant de sa plastification n'est pas compatible avec le bon fonctionnement des dispositifs : cas 2.3.4 (amortisseurs visqueux en parallèle), 2.3.5 (amortisseurs visqueux en série), 2.3.6 (amortisseur élastoplastique en série) et 2.3.7 (combiné ressort/amortisseur). Si on souhaite toutefois prendre en compte l'éventuelle formation de rotules plastiques dans les piles, il faut alors effectuer un calcul temporel non-linéaire tenant compte d'un fonctionnement réaliste des différents éléments de structure, intégrant notamment la plastification des armatures et le comportement non-linéaire des sections en béton armé. En l'état actuel des connaissances et sauf justification particulière, une telle démarche est à déconseiller pour les raisons suivantes :

- seules des méthodes de calcul correctement validées peuvent être utilisées ;
- la dispersion des valeurs des paramètres définissant le sol ou le béton, peut rendre illusoire la précision et la représentativité affichées des résultats dans certains cas ;
- si l'on accepte une plastification des armatures, il peut être moins onéreux finalement d'adopter une solution traditionnelle du type 2.3.1 ;
- l'appel en ductilité réel peut être plus important que prévu si le séisme est supérieur au séisme de dimensionnement ;
- en cas de plastification des piles, les déplacements relatifs mobilisés entre les appuis et le tablier s'en trouvent réduits risquent d'être insuffisants pour pouvoir bénéficier d'un fonctionnement et d'une dissipation d'énergie optimale des dispositifs (notamment amortisseurs).

Dans les cas d'utilisation d'amortisseurs visqueux ou élastoplastiques, il est donc recommandé d'éviter la plastification des armatures, ce qui conduit en pratique à considérer que les structures ont un comportement élastique linéaire associé à un coefficient de comportement  $q=1$ .

Il n'est pas besoin dans ce cas de respecter les règles de ductilité (dispositions constructives spécifiques, en dehors de certaines zones critiques et sous certaines conditions) et le dimensionnement en capacité est réalisé à partir de coefficients de surcapacité adaptés, calés sur les caractéristiques connues des dispositifs parasismiques (palier plastique dans le cas d'un amortisseur élastoplastique par exemple), conduisant à des économies de ferrailage en partie courante des piles.

**En règle générale, l'emploi d'un coefficient de comportement supérieur à 1 n'est donc conseillé que pour les structures traditionnelles (de conception courante – cf. §2.3.1), et celles utilisant des coupleurs dynamiques (cf. §2.3.2).**

#### 2.4.1.2 Désordres possibles après séisme « de calcul »

##### 2.4.1.2.1 Calcul avec $q > 1$

Lorsqu'on utilise la valeur maximum des coefficients de comportement  $q$  permise par les règlements (de l'ordre de 3), la structure est réputée ne pas s'effondrer, mais souvent au prix de désordres graves, plus ou moins réparables selon le niveau de performance requis pour l'ouvrage en fonction de sa classe d'importance.

Par ailleurs, l'Eurocode 8-2 admet que pour  $q = 1,5$  le risque de plastification des armatures est faible et que des dispositions constructives « allégées » par rapport aux structures ductiles (et limitées à certaines zones dites « critiques ») peuvent être adoptées. On peut donc en déduire que pour un niveau sismique réglementaire, les désordres devraient demeurer mineurs et facilement réparables.

2.4.1.2.2 Calcul avec  $q = 1$ 

Lorsqu'on effectue le calcul avec  $q = 1$ , aucun désordre structurel (hors fissuration modérée du béton) n'est sensé se produire sous séisme réglementaire.

## 2.4.2 DOMAINES D'EMPLOI PRIVILÉGIÉS DES DIFFÉRENTS TYPES DE DISPOSITIFS PARASISMIQUES

Les différentes solutions décrites aux paragraphes 2.3.1 à 2.3.7 ont a priori les domaines d'emploi récapitulés dans le Tableau 3 ci-dessous :

Types de conception ou de dispositifs	Domaine d'emploi préférentiel	Avantages	Inconvénients
<b>2.3.1 :</b> Conception courante	Niveau sismique modéré Séismes peu fréquents	Pas de maintenance particulière Calcul spectral simple avec coefficient de comportement	Réparations lourdes après séisme réglementaire
<b>2.3.2 :</b> 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
<b>2.3.3 :</b> Appareils d'appuis en élastomère fretté	Niveau sismique modéré Ouvrages de faibles portées (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
<b>2.3.4 :</b> 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
<b>2.3.5 :</b> 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 recalculer le tablier après séisme
<b>2.3.6 :</b> 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 recalculer le tablier après un séisme de référence
<b>2.3.7 :</b> 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 des différentes solutions de conception parasismique

Enfin, il est important de rappeler (cf. §2.1) que le choix des dispositifs parasismiques ne doit pas se faire en considérant uniquement leur influence sur le comportement sous séisme. Il faut aussi examiner les influences que ces dispositifs peuvent avoir vis-à-vis d'autres actions. Les quatre exemples ci-dessous illustrent cette nécessité de vérifier la compatibilité fonctionnement sous séisme / fonctionnement en service et les enjeux associés :

1. Dans le cas d'un pont ferroviaire, il est indispensable que l'ouvrage comporte un appui fixe longitudinal en état de fonctionnement, avant et après un séisme, car les efforts de freinage et accélération des trains sont très élevés, et l'absence d'appui fixe pourrait nécessiter un arrêt de l'exploitation. Les dispositifs longitudinaux comportant des organes fusibles ne conviennent donc pas, sauf si ces fusibles sont calibrés de façon à ne pas casser sous l'action des efforts de freinage-accélération bien évidemment, mais également en cas de séisme de faible période de retour, le maître d'ouvrage devant préciser jusqu'à quelle période de retour il souhaite que l'exploitation de la ligne puisse être reprise presque aussitôt après un séisme.
2. Dans le cas d'un pont ferroviaire avec longs rails soudés continus de part et d'autre du pont (cas très courant), il faut vérifier que les déplacements longitudinaux du tablier sous efforts de freinage-accélération des trains respectent certaines valeurs limites :
  - a. En cas d'utilisation de dispositifs longitudinaux avec organes fusibles, la souplesse longitudinale de l'ouvrage va augmenter après rupture de ces fusibles, et ces déplacements pourraient ne plus être admissibles après le séisme.
  - b. En cas d'utilisation de coupleurs dynamiques longitudinaux, ces dispositifs n'étant pas infiniment raides sous sollicitations rapides, il faut donc, dans les calculs de déplacement sous efforts de freinage-accélération, tenir compte de leur raideur réelle, dont l'effet n'est pas négligeable à l'échelle des quelques millimètres de déplacement admissible réglementairement sous ces efforts. Le cas échéant, une valeur minimale de la raideur doit être imposée dans le cahier des charges de ces dispositifs.
3. Dans le cas d'un pont de grande portée pour lequel certains éléments de la structure sont dimensionnés par les effets du vent, les dispositifs parasismiques comportant un fusible conduisent à augmenter la souplesse de la structure après rupture du fusible. Les effets du vent étant d'autant plus élevés que la structure est souple (augmentation de la période de vibration), ils augmenteront après rupture du fusible. Dans le cas où le délai de remplacement des fusibles serait long, il convient donc de calculer les effets du vent en cas de rupture du fusible, ou alors de renoncer à une solution avec fusible.
4. Dans le cas d'un pont soumis à un choc de bateau (perpendiculaire à l'axe du tablier), le tablier est souvent utilisé pour répartir l'effort de choc appliqué à une pile donnée, entre les autres piles, par l'intermédiaire des appuis fixes transversaux sur les piles. En cas d'utilisation de dispositif transversal avec organe fusible placé entre la pile et le tablier, l'effort de choc de bateau appliqué à la pile après le séisme (dans le cas où le délai de remplacement des fusibles serait long) ne pourra plus être transmis aux autres piles par l'intermédiaire du tablier, ce qui peut conduire à une très forte augmentation des efforts dans cette pile et sa fondation.

## 2.5 CONSIDÉRATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES

### 2.5.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

L'impact socio-économique de la prise en compte (ou non) du risque sismique sur un projet de pont (qu'il s'agisse d'un projet d'ouvrage neuf ou du renforcement d'un ouvrage existant) doit intégrer plusieurs aspects :

- Le surcoût de la conception parasismique dans le cas d'un ouvrage neuf ;
- Les coûts de mise à niveau ou de renforcement sismique dans le cas des ouvrages existants (action préventive avant séisme) ;
- Les coûts d'inspection et de maintenance courante des dispositifs parasismiques le cas échéant ;
- Les coûts induits directs (victimes directes, valeur intrinsèque de l'ouvrage, coûts des réparations post-sismiques ou des rétablissements d'urgence) ou indirects (victimes indirectes associées aux délais d'approvisionnement des secours, ralentissement de l'activité économique ou sociale liées à la dégradation du réseau routier...) en cas de séisme majeur (associé à une période de retour élevée) ;
- Les coûts induits, directs ou indirects, en cas de séisme plus fréquent (associé à une période de retour plus faible).

Un exemple d'une telle étude économique de niveau de protection sismique est illustré par la Figure 18. Le coût global associé au risque sismique sur un ouvrage donné est évalué avec cinq niveaux différents de protection parasismique :

- niveau 0 : pas de protection parasismique particulière
- niveaux 1, 2, 3, 4 : protection croissante (niveau de dimensionnement réglementaire fixé en fonction de la catégorie d'importance de l'ouvrage et de la période de retour associée pour un ouvrage neuf, ou niveau de renforcement choisi par le maître d'ouvrage pour un ouvrage existant)

La Figure 18 présente trois courbes donnant respectivement, en pourcentage du coût initial de la construction sans protection parasismique :

- le surcoût de renforcement sismique (cas d'un ouvrage existant),
- l'espérance du coût de réparation de l'ouvrage renforcé en cas de séisme (donc tenant compte des probabilités de survenance des séismes de toute intensité),
- le coût différé en cas de séisme (pertes économiques, vies humaines...).

Cet exemple particulier illustre le fait que le coût global peut généralement présenter un optimum (pour le niveau 3, dans cet exemple). En pratique et en règle générale, le surcoût de la protection parasismique sera sensiblement moins élevé dans le cas de la conception neuve (si elle est prise en compte suffisamment en amont dans les études) que dans le cas du renforcement d'ouvrages existants, et dépendra de la typologie ou de la vulnérabilité initiale de l'ouvrage et du niveau de séisme pris en compte (fonction de l'exposition à l'aléa : zonage et effets de site, ainsi que du niveau de performance escompté : catégorie d'importance ou période de retour considérée et niveau d'endommagement toléré).

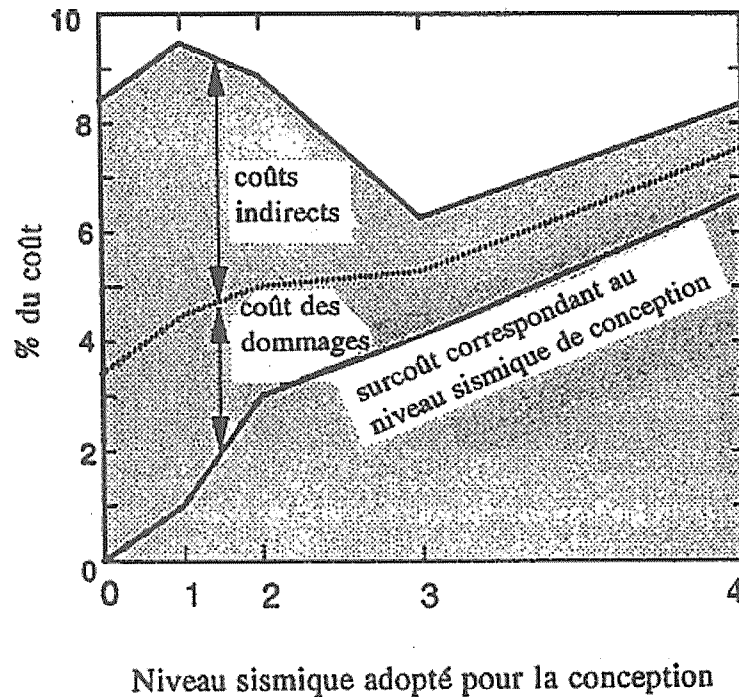


Figure 18 : Exemple théorique d'étude économique du renforcement sismique d'un ouvrage existant (issu du Guide CETMEF : Risques dynamiques pour les ouvrages maritimes et fluviaux - Fascicule n°3 : Prise en compte du séisme dans l'analyse et le renforcement des ouvrages intérieurs existants - Août 1995) [11])  
 Le pourcentage du coût est le rapport de coût sismique (renforcement, endommagement, coûts indirects) au coût de la construction supposée conçue sans prise en compte du séisme

Dans le contexte français, ces différents aspects sont néanmoins à considérer au regard de deux spécificités qui peuvent sembler contradictoires :

- D'une part, la rareté des phénomènes sismiques rend peu incitative leur prise en compte par la plupart des maîtres d'ouvrage (hors obligation réglementaire dans le cas des ouvrages neufs) ou peu prioritaire au regard d'autres risques plus fréquents ou d'autres enjeux économiques ;
- D'autre part le niveau de développement technologique actuel et la tendance d'abaissement du niveau d'acceptation des risques dans les sociétés occidentales rendrait inacceptables une catastrophe humaine ou économique de grande ampleur et à moindre échelle la défaillance d'une structure de Génie Civil importante.

## 2.5.2 SURCÔT DE LA CONCEPTION PARASISMIQUE POUR LES OUVRAGES NEUFS

Le prix de la protection parasismique pour des ouvrages neufs varie en fonction :

- des efforts dans les piles et les fondations. Le tablier est en général assez peu affecté par le séisme ;
- des déplacements relatifs du tablier par rapport aux culées et aux piles. Ces déplacements imposent en particulier :
  - des joints de grand souffle,
  - des repos d'appui suffisants,
  - une course suffisante des dispositifs.

Il est essentiel dans l'évaluation de ces déplacements, et notamment dans le cas des ponts de grande longueur, de tenir compte des déplacements différentiels du sol d'un appui à l'autre, afin d'éviter un choc en fin de course des dispositifs.

En règle générale, le surcoût de la prise en compte du séisme (si elle est effectuée suffisamment en amont des études de conception générale) reste modeste en rapport au coût global de la construction. Il variera entre des valeurs comprises entre moins de 1% de ce coût pour les ouvrages les plus courants de petites dimensions et peu exposés à l'aléa, et 4% environ pour les ponts de grandes dimensions et situés dans des contextes de sismicité moins favorables.

A ce surcoût de la construction, il convient le cas échéant de rajouter le prix de la maintenance courante des ouvrages, qui peut varier sensiblement en fonction des dispositifs choisis (nécessité ou non de visites d'inspection, fréquence et niveau de qualification associés à ces visites, durée de vie garantie des dispositifs...).

### 2.5.3 MISE À NIVEAU OU RENFORCEMENT SISMIQUE DES OUVRAGES EXISTANTS

Dans ce cas, il s'agit d'un renforcement préventif de la structure vis-à-vis du risque sismique. Le coût du renforcement sismique dépend généralement de la typologie et de la vulnérabilité de la structure initiale, de son niveau d'exposition à l'aléa, mais également de la solution ou du niveau de renforcement retenu, qui résulte généralement d'un compromis entre le coût du renforcement au regard des moyens financiers disponibles et des enjeux, la durée de vie restante de l'ouvrage et le niveau de performance visé. En général et selon la configuration de l'ouvrage et les difficultés techniques identifiées, un renforcement au niveau du neuf pourra s'avérer difficile voire impossible. L'emploi à bon escient des dispositifs parasismiques, éventuellement complété par des renforts de certains éléments structuraux, pourra néanmoins permettre de se rapprocher de cet objectif, pour un coût global compris généralement entre 5 et 15% de la valeur de l'ouvrage.

Le tableau suivant, issu du guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » [10], présente les avantages et inconvénients des différents types de renforcement parasismiques envisageables. Pour plus d'éléments sur le renforcement des structures, on se référera à ce guide.

Tableau de synthèse des techniques de renforcement

TECHNIQUES	VARIANTES	OBJECTIFS				EFFETS				COÛTS				
		ANTI eclaiement d'appui	ANTI choc	ANTI rupture Tranchant	ANTI rupture flexion	Limitation des efforts transmis aux piles	Limitation des déplacements	Augmentation de la ductilité des piles	Capacité résistante de la pile	Coût réalisation	Difficulté de conception	Difficulté réalisation	Coût entretien inspection	Endommagement et réparation post sismique (*)
Élargissement du chevêtre (piles et culées)		+++	0	0	0	0	0	0	0	✓/✓	*	**	0	0
Augmentation de la capacité de déplacement du tablier au niveau des culées		0/-	+++	0	0	0	0/-	0	0	✓/✓	*	**	0	0
Dispositif d'attelage tabier/tablier	Mécanique Hydraulique (connecteur dynamique)	++	++	0	0	+/-	+/-	0	0	*	**	*	0/✓	0/✓
Dispositif d'attelage tabier-appui	Hydraulique Mécanique (Butée)	+++	+++	--	--	++/- (1)	+++	0	0	*	**	*	**	0
Modification de la période (assouplissement)	Introduction de ressort souple (appui) Elastomère fretté/appuis glissants	-(2)	-(2)	++	++	++	--	0	0	✓ (3)	*	**	*	0/✓
Amortissement	Elastoplastique visqueux	+	+	++	++	++	+	0	0	✓ (3)	***	✓/✓	0/✓	*
Fusible		--	-	+++	+++	+++	--	0	0	*	****(4)	*	0/✓	*
Chemisage partiel sans liaison semelle (dans la zone de la rotule plastique)	Acier Composite Béton	0	0	-	+++	+/-	+	+++	+	✓/✓	*	**	0/✓	**
Chemisage total sans liaison semelle (toute hauteur)	Acier Composite Béton	0	0	+++	+++	+/-	+	+++	++	✓/✓	*	**/***	0/✓	**
Chemisage total avec liaison semelle	Acier Composite Béton	0	0	+++/-	+++/-	+/-	+	+++ (6)	+++	**	**	**/***	0/✓	**
Renforcement de la semelle et des fondations		0	0	++	++	0	0	0	+++	***	**	***	0	**

(\*) dans le cadre de la France métropolitaine, cet aspect peu être considéré comme secondaire pour le choix.

(1) les dispositifs d'attelage génère des efforts horizontaux sur les piles dont il convient de tenir compte.

(2) Augmenter la période à aussi pour effet d'augmenter les déplacements. Il convient d'en tenir compte.

(3) très économique si les travaux sont faits à l'occasion d'un remplacement des appareils d'appuis

(4) la difficulté réside dans la mise au point du fusible qui n'est pas un matériel existant en standard

(5) Fortement dépendant de la géométrie des piles

(6) Attention à la capacité résistante de la fondation



Légende effets	
effet largement positif	+++
effet positif	++
effet légèrement positif	+
Pas d'effet	0
Effet négatif possibles	-
Effet potentiellement négatif sensible à évaluer	--
Effet négatif pouvant annuler l'effet positif voire rendre la structure dangereuse	---

Légende : difficulté de conception	
Accessible sans modèle complexe	*
Nécessite spécialiste et modèle complexe	**
Nécessite un expert car risques	***

Légende : difficulté réalisation	
Rapide, faible impact trafic	*
Impact trafic et durée moyenne	**
Long, fort impact trafic ou Multi métiers	***

Légende : Coût de réalisation	
0	< 1% du coût de remplacement de l'ouvrage
*	1 à 3 % du coût de remplacement de l'ouvrage
**	3 à 10 %
***	> 10 %

Légende : Coût d'entretien	
0	Entretien et inspection classique
*	Inspection et entretien spécifique à intégrer
**	spécialisé par personnel qualifié
***	Durée de vie limitée: prévoir remplacement

Légende endommagement et réparation post-	
0	inspection
*	Travaux légers de remplacement du dispositif
**	Travaux de réparation structurelle

Tableau 4 : Synthèse des techniques de renforcement (Issu du guide Sétra « Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants » [10])

#### 2.5.4 COÛTS DES RÉPARATIONS POST-SISMIQUES

En comparaison des surcoûts de la protection parasismique, qu'il s'agisse de la conception des ouvrages neufs ou du renforcement préventif des ouvrages existants, les coûts induits directement ou indirectement par le séisme et résultant de l'effondrement ou de l'endommagement d'un ouvrage peuvent s'avérer colossaux. Ils sont néanmoins à analyser au regard des périodes de retour des événements considérés.

Seuls les cas correspondant à des ouvrages ayant fait l'objet d'une protection parasismique (conception d'ouvrage neuf ou renforcement d'ouvrage existant) sont présentés ici. Les cas d'ouvrages ne bénéficiant d'aucune prise en compte du risque sismique ne présentent en effet qu'un intérêt limité dans le cadre du présent document. On pourra néanmoins noter que les coûts de réparation post-sismique associés seront évidemment plus importants et variables en fonction de la vulnérabilité structurale initiale, du niveau de séisme subi et des enjeux liés à la plus ou moins grande urgence de leur remise en service.

##### 2.5.4.1 Après un séisme d'intensité réglementaire

Deux cas sont à considérer :

- Dans le cas où l'ouvrage est calculé avec un coefficient  $q > 1,5$  (sans dispositifs parasismiques autres que coupleurs dynamiques, attelages ou butées), il faut s'attendre à :
  - des déplacements résiduels importants en tête de pile,
  - des éclatements systématiques de l'enrobage des armatures en pied de pile,
  - des fissures largement ouvertes.
  - des armatures plastifiées

Il faut donc prévoir des réparations plus ou moins lourdes, difficiles à quantifier dans l'absolu.

- Dans le cas où l'ouvrage est calculé avec un coefficient  $q \leq 1,5$  associé ou non à l'emploi de dispositifs parasismiques, il faut s'attendre à :
  - des déplacements résiduels en tête de pile, provenant principalement du comportement du sol, dont les mouvements ne sont élastiques que pour de faibles secousses sismiques,
  - des fissures peu ouvertes,
  - le cas échéant, une déformation permanente ou un glissement rémanent (amortisseurs visqueux ou frottants), une dégradation (amortisseurs élastoplastiques) ou une rupture

(fusibles) de certains dispositifs, notamment en l'absence de dispositif ou disposition permettant d'assurer une fonction de recentrage du tablier,

Selon la conception du pont choisie, il sera alors nécessaire de prévoir un recentrage du tablier sur ses appuis, et le cas échéant le remplacement ou le recalage de certains dispositifs.

#### **2.5.4.2 Pour des niveaux de séisme plus faibles que le séisme d'intensité réglementaire (événements plus fréquents)**

Les désordres seront dans ce cas bien sûr atténués ou inexistant. Par exemple, des combinés ressorts-amortisseurs pourront recentrer le tablier et les fusibles/amortisseurs précontraints peuvent être conçus pour ne pas se libérer (notion de séisme « de service »).

#### **2.5.4.3 Après un séisme supérieur au séisme d'intensité réglementaire**

Dans ce cas, la résistance de la structure n'est plus théoriquement assurée. Néanmoins, les retours d'expérience (cf. Photo 3) nous ont montrés que lorsque qu'une structure a fait l'objet des dispositions constructives parasismiques réglementaires ou est équipée de dispositifs parasismiques, elle est capable de reprendre un séisme supérieur séisme réglementaire tout en conservant son intégrité structurale et peut retrouver à moyen terme son niveau de service au prix de travaux de réparation plus ou moins conséquents.



*Photo 3 : Dispositifs élastoplastiques de type « croissants de lune » rompus après avoir subi un séisme deux fois supérieur au séisme de calcul mais ayant néanmoins évité l'effondrement de l'ouvrage sur lesquels ils étaient disposés (Bolu Viaduct) lors du séisme de Duzce (Turquie, 1999) [14]*

### **2.5.5 CONCLUSION**

Le coût de la protection parasismique est d'autant plus faible qu'il est considéré tôt dans les études pour les ouvrages neufs. Son coût est alors très faible par rapport au coût global de la construction. Dans le cas des ouvrages existants, les coûts de renforcement s'avèrent généralement sensiblement plus élevés et dépendent de la vulnérabilité initiale de l'ouvrage, de son niveau d'exposition à l'aléa et du niveau de performance visé.

Dans les deux cas (conception neuve ou renforcement d'ouvrages existants), les surcoûts induits par la protection parasismique préventive s'avèrent relativement dérisoires par rapport aux coûts des réparations post-sismique et surtout aux conséquences humaines ou économiques potentielles résultant de la défaillance des ouvrages en cas de séisme. Néanmoins, ces coûts ne peuvent être valablement estimés qu'en prenant en compte l'importance et la fréquence des secousses sismiques sur le site de construction.

Cela pourrait conduire à des conceptions différentes selon que l'on se trouve en France métropolitaine (secousses rares et d'intensités relativement modérées), aux Antilles (secousses rares à peu fréquentes mais de fortes intensités) ou en Italie ou en Grèce (secousses fréquentes et de fortes intensités).