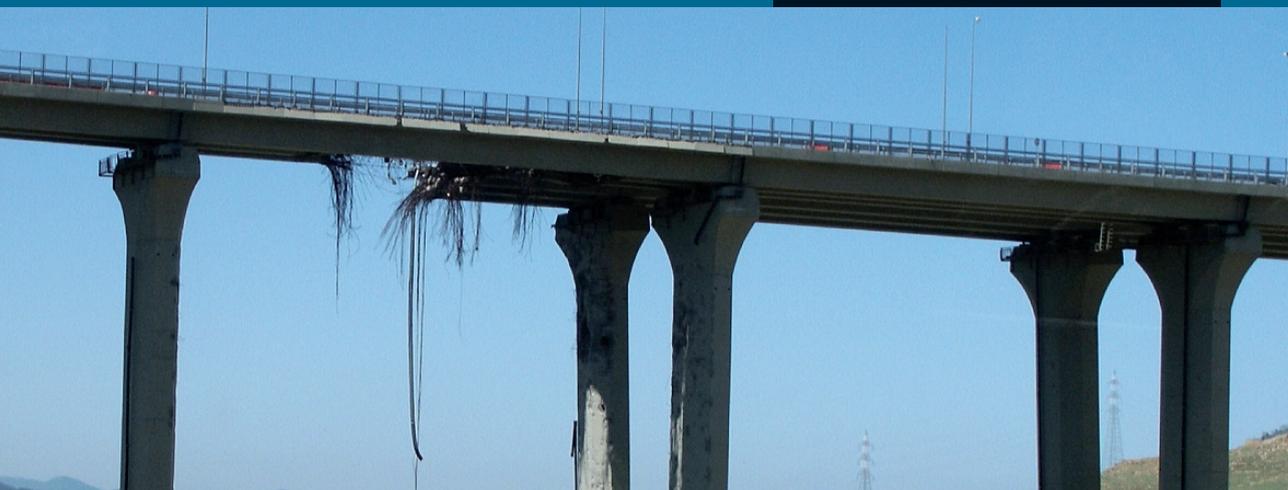


E U R O C O D E

8

# Ouvrages d'art en zone sismique

Guide d'application



Alain Capra  
Aurélien Godreau

**afnor**  
ÉDITIONS

**EYROLLES**

L'arrêté du 26 octobre 2011 fixe les données sismiques applicables aux ouvrages d'art en France à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2012. Le travail qu'ont accompli Alain Capra et Aurélien Godreau pour faciliter la compréhension et l'application de l'Eurocode 8 – désormais obligatoire en France – prend en compte tous les règlements en vigueur à ce jour : la carte sismique, les spectres de réponse et les normes relatives aux ponts, aux fondations, aux appareils d'appui et aux dispositifs antisismiques. Complémentaires, ces normes sont à la fois plus détaillées et plus complexes que les anciennes règles AFPS 92.

Dans ces conditions, faute de disposer d'un guide d'utilisation de l'EC8, un ingénieur d'études pourrait rencontrer des difficultés d'interprétation. C'est la raison pour laquelle les auteurs ont présenté dans ce petit volume, principalement destiné aux ingénieurs chargés de la conception, de la justification par le calcul ou du contrôle de tous les types d'ouvrages d'art situés en zone sismique :

- Un rappel de la théorie des rotules plastiques, à la base du règlement
- Les prescriptions réglementaires à respecter lors de l'étude d'un ouvrage d'art qu'il soit ou non muni d'appareils spéciaux (amortisseurs, coupleurs, appuis élastomères, etc.)
- Des exemples éclairant avec précision les notions de régularité et de dimensionnement en capacité
- Différents exemples d'emploi d'appareils spéciaux.

### Sommaire

- Méthode du coefficient de comportement
- Définition de l'action sismique
- Vérification du comportement
- Méthodes de calculs dynamiques
- Modèles de calcul dynamique
- Effets cinématiques
- Justification des ouvrages
- Maîtrise des déplacements
- Dispositions constructives
- Culées et murs de soutènement
- Appareils d'appui et attelages
- Appareils spéciaux
- Liquéfaction

**Annexes** : Vérification de la régularité – Critère de cumul des masses modales – Combinaisons sismiques et dimensionnement en capacité – Appuis en élastomère.

A. Capra  
A. Godreau

Code éditeur Eyrolles : C13384  
ISBN EYROLLES : 978-2-212-13384-4  
Code éditeur Afnor : 3465346  
ISBN AFNOR : 978-2-12-465346-1

Ancien directeur scientifique de Vinci Construction Grands Projets, **Alain CAPRA** a été membre des comités de rédaction des règles PS92 et AFPS92 auxquelles ont succédé les actuels Eurocodes.

Ingénieur appartenant au bureau d'études techniques de Dodin-Campenon Bernard (groupe Vinci), **Aurélien GODREAU** est, comme Alain Capra, diplômé de l'École des Ponts et Chaussées.

# **Ouvrages d'art en zone sismique**

Guide d'application de l'Eurocode 8

## Également aux éditions Eyrolles (extrait du catalogue)

### **Dans la même collection (en coédition avec l'Afnor)**

Jean ROUX, *Maîtriser l'Eurocode 2. Guide d'application*, 338 p.  
– *Pratique de l'Eurocode 2. Guide d'application*, 626 p.

Jean-Marie PAILLÉ, *Calcul des structures en béton. Guide d'application de l'Eurocode 2*, 620 p.

Yves BENOIT, Bernard LEGRAND & Vincent TASTET, *Calcul des structures en bois. Guide d'application de l'Eurocode 5*, 2<sup>e</sup> éd., 512 p.  
– *Dimensionner les barres et les assemblages en bois. Guide d'application de l'Eurocode 5 à l'usage des artisans*, 240 p.

Marcel HUREZ, Nicolas JURASZEK & Marc PELCÉ, *Dimensionner les ouvrages en maçonnerie. Guide d'application de l'Eurocode 6*, 328 p.

Victor DAVIDOVICI (sous la direction de) avec Alain CAPRA, Dominique CORVEZ, Hervé DEGÉE, Shahrokh GAVAMIAN, Serge LAMBERT, Nader MEZHER, André PLUMIER et Claude SAINTJEAN, *Constructions parasismiques. Guide d'application de l'Eurocode 8* (à paraître au 1<sup>er</sup> trim. 2012)

### **Méthodes**

Michel BRABANT, Béatrice PATIZEL, Armelle PIÈGLE & Hélène MÜLLER, *Topographie opérationnelle*, 424 p.

Jean-Pierre GOUSSET, *Techniques des dessins du bâtiment*  
– *Dessin technique et lecture de plan. Principes et exercices*, 192 pages  
– *Plans topographiques, plans d'architecte et permis de construire* (à paraître au 2<sup>e</sup> semestre 2012)  
– *Plans de bureaux d'études (béton armé, charpente, électricité, fluides)* (à paraître en 2013)

Avec le concours de Jean-Claude CAPDEBIELLE & René PRALAT, *Le métré CAO-DAO avec Autocad ; étude de prix*, 2<sup>e</sup> éd., 312 p.

Avec Bernard BADAUT, *Mémento pratique de l'offre de prix dans le bâtiment* (à paraître en 2012)

Jean-Louis GRANJU, *Béton armé. Théorie et applications selon l'Eurocode 2*, 480 p.

Marc LANDOWSKI & Bertrand LEMOINE, *Concevoir et construire en acier*, nouvelle édition, 112 p. (coédition ConstruirAcier)

Christian LEMAITRE, *Les matériaux de construction* (à paraître au 1<sup>er</sup> trim. 2012)  
1. *Propriétés physico-chimiques des matériaux*  
2. *Mise en œuvre et emploi des matériaux*

### **Droit**

Guillaume BLANC-JOUVAN, *Mémento du droit de l'architecte* (à paraître en 2012)

Bertrand COUETTE, *Mémento du CCAG Travaux*, 128 p.  
– *Guide pratique de la loi MOP*, 2<sup>e</sup> éd., 560 p.

Agnès CURAT, *Mémento des concours d'architecture dans les collectivités territoriales*, 360 p.

Patricia GRELIER WYCKOFF, *Mémento des marchés privés de travaux*, 3<sup>e</sup> éd., 320 p.  
– *Mémento des marchés publics de travaux*, 5<sup>e</sup> éd., 320 p.  
– *Pratique du droit de la construction. Marchés publics et privés*, 6<sup>e</sup> éd., 640 p.

Patrick GÉRARD, *Pratique du droit de l'urbanisme. Urbanisme réglementaire, individuel et opérationnel*, 296 p.

Bernard de POLIGNAC, Jean-Pierre MONCEAU & Xavier de CUSSAC, *Expertise immobilière. Guide pratique*, 5<sup>e</sup> éd., 524 p.

Jean-Louis SABLON, *Le contentieux des dommages de construction* (à paraître en 2012)

### **Généralités**

Jean-Paul ROY & Jean-Luc BLIN-LACROIX, *Dictionnaire professionnel du BTP*, 3<sup>e</sup> éd., 848 p.

...et des dizaines d'autres livres de BTP, de génie civil, de construction et d'architecture sur  
[www.editions-eyrolles.com](http://www.editions-eyrolles.com)

**Alain Capra & Aurélien Godreau**

# **Ouvrages d'art en zone sismique**

Guide d'application de l'Eurocode 8

**EYROLLES**



**AFNOR**



ÉDITIONS EYROLLES  
61, bd Saint-Germain  
75240 Paris Cedex 05  
www.editions-eyrolles.com

AFNOR ÉDITIONS  
11, rue Francis-de-Pressensé  
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex  
www.boutique-livres.afnor.org

Le programme des Eurocodes structuraux comprend les normes suivantes, chacune étant en général constituée d'un certain nombre de parties :

EN 1990 Eurocode 0 : Bases de calcul des structures

EN 1991 Eurocode 1 : Actions sur les structures

EN 1992 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton

EN 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

EN 1994 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton

EN 1995 Eurocode 5 : Calcul des structures en bois

EN 1996 Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie

EN 1997 Eurocode 7 : Calcul géotechnique

EN 1998 Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

EN 1999 Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium

Les normes Eurocodes reconnaissent la responsabilité des autorités réglementaires dans chaque État membre et ont sauvé le droit de celles-ci de déterminer, au niveau national, des valeurs relatives aux questions réglementaires de sécurité, là où ces valeurs continuent à différer d'un État à un autre.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Afnor et Groupe Eyrolles, 2012  
ISBN Afnor : 978-2-12-465346-1  
ISBN Eyrolles : 978-2-212-13384-4

# Table des matières

Introduction.....	1
<b>Chapitre 1. Méthode du coefficient de comportement...</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Remarques générales sur la conception parasismique .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Principes de la méthode du coefficient de comportement .....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Hypothèse de base.....	4
1.2.2 Règles de calcul .....	5
<b>Chapitre 2. Définition de l'action sismique.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Domaine d'application des règles .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Cas général .....	9
2.1.2 Cas particuliers.....	10
<b>2.2 Action sismique réglementaire.....</b>	<b>10</b>
2.2.1 Accélération de référence du sol .....	10
2.2.2 Classification des ouvrages d'art .....	10
2.2.3 Accélération du sol pour le séisme de service [EN1998-1/§ 2.1] .....	11
2.2.4 Effet d'amplification topographique .....	12
2.2.5 Classes de sol.....	12
2.2.6 Spectre de calcul pour le séisme horizontal .....	14
2.2.7 Spectre de calcul pour le séisme vertical [EN 1998-2/§ 4.1.6] .....	18
2.2.8 Correction de l'amortissement [EN 1998-2/§ 4.13].....	18
2.2.9 Calcul des déplacements relatifs [EN 1998-2/§ 2.3.6.1] .....	19
<b>2.3 Déplacement absolu du sol [EN 1998/§ 3.2.2.4] .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Spectres élastiques.....</b>	<b>20</b>
2.4.1 Domaine d'emploi .....	20
2.4.2 Spectre élastique horizontal [EN1998-1/§3.2.2.2-1(P)] .....	20
2.4.3 Spectre élastique vertical .....	21

---

<b>Chapitre 3. Vérification du comportement</b> .....	23
<b>3.1 Comportement sismique régulier et irrégulier des ponts</b> <b>[EN 1998-2/§ 4.1.8]</b> .....	23
3.1.1 Risques dus au comportement irrégulier des ponts .....	24
3.1.2 Vérification de la régularité du pont [EN 1998-2/§ 3.5.4.5] .....	24
3.1.3 Exemple de calcul .....	25
<b>3.2 Contrôle des zones « hors rotules » : dimensionnement en capacité</b> .....	25
3.2.1 Piles en béton armé équipées d'appareils d'appui fixes peu déformables	25
3.2.2 Piles équipées d'appuis glissants .....	27
3.2.3 Piles équipées d'appuis en élastomère « non sismiques » .....	27
3.2.4 Méthode approchée .....	28
 <b>Chapitre 4. Méthodes de calculs dynamiques</b> .....	 29
<b>4.1 Analyse dynamique linéaire – Méthode spectrale</b> .....	29
4.1.1 Choix des modes significatifs [EN 1998-2/§ 4.2.1.2] .....	29
4.1.2 Combinaison des réponses modales .....	30
4.1.3 Combinaison des composantes de l'action sismique [EN 1998-1/§ 4.3.3.5.1]	30
4.1.4 Prise en compte de la composante verticale [EN 1998-2/§ 4.1.7] .....	31
<b>4.2 Méthode du mode fondamental [EN 1998-2/§ 4.2.2]</b> .....	31
<b>4.3 Analyse temporelle linéaire</b> .....	31
<b>4.4 Analyse temporelle non linéaire [EN 1998-2/§ 4.2.4]</b> .....	32
<b>4.5 Analyse en poussée progressive [EN 1998-2/§ 4.2.5 &amp; Annexe H] ...</b>	32
 <b>Chapitre 5. Modèles de calcul dynamique</b> .....	 33
<b>5.1 Raideur des tabliers [EN 1998-2/§ 2.3.6.1]</b> .....	33
<b>5.2 Raideur des piles [EN 1998-2/§ 2.3.6.1]</b> .....	33
<b>5.3 Raideur des fondations</b> .....	35
5.3.1 Module élastique dynamique du sol [EN 1998-5 § 4.2.3 et Guide SETRA-SNCF Janvier 2000] .....	36
5.3.2 Semelles superficielles [Guide SETRA-SNCF Janvier 2000] .....	36
5.3.3 Fondations profondes .....	37
<b>5.4 Masses [EN 1998-2/§ 4.1.2]</b> .....	37

<b>Chapitre 6. Effets cinématiques</b> .....	39
<b>6.1 Variabilité spatiale [EN 1998-2/§3.3]</b> .....	39
6.1.1 Méthode de calcul des sollicitations .....	40
6.1.2 Modèles de calcul .....	42
6.1.3 Coefficients de comportement .....	44
6.1.4 Combinaisons .....	44
<b>6.2 Déplacements différentiels des fondations profondes</b> .....	45
6.2.1 Déplacements du sol .....	45
6.2.2 Calcul des sollicitations cinématiques .....	45
6.2.3 Justification de la résistance .....	46
<b>Chapitre 7. Justification des ouvrages</b> .....	47
<b>7.1 Principes des justifications</b> .....	47
<b>7.2 Action sismique de calcul</b> .....	47
<b>7.3 Autres actions concomitantes à l'action sismique [EN 1998-2/§5.5]</b> .....	48
<b>7.4 Combinaisons de calcul ELU [EN 1998-2/§5.5]</b> .....	48
<b>7.5 Vérifications à l'ELU</b> .....	49
7.5.1 Effets du second ordre [EN 1998-2/§5.4] .....	49
7.5.2 Règles générales de vérification [EN 1998-2/§5.6.1] .....	49
7.5.3 Cas des structures à ductilité limitée .....	50
7.5.4 Cas des structures ductiles .....	51
<b>7.6 Combinaisons de calcul ELS</b> .....	52
<b>7.7 Vérifications à l'ELS</b> .....	52
7.7.1 Vérification de la résistance .....	52
7.7.2 Vérification des déplacements .....	52
<b>Chapitre 8. Maîtrise des déplacements</b> .....	53
<b>Chapitre 9. Dispositions constructives</b> .....	55
<b>9.1 Règles générales</b> .....	55
9.1.1 Armatures pour le béton armé [EN 1998-2/§5.2.1] .....	55
9.1.2 Longueurs d'ancrage et de recouvrement des armatures .....	55

9.1.3	Principe des renforcements .....	55
9.1.4	Armatures transversales de confinement des piles .....	56
9.1.5	Armatures transversales anti-flambement .....	60
9.1.6	Piles creuses [EN 1998-2/§ 6.2.4] .....	63
<b>9.2</b>	<b>Cas de la conception en ductilité limitée [EN 1998-2/§ 6.5]</b> .....	<b>63</b>
9.2.1	Confinement du béton .....	63
9.2.2	Armatures anti-flambement .....	64
<b>9.3</b>	<b>Cas de la conception ductile</b> .....	<b>64</b>
9.3.1	Armatures verticales [EN 1998-2/§ 6.2.3] .....	64
9.3.2	Confinement .....	64
9.3.3	Anti-flambement .....	64
<b>9.4</b>	<b>Fondations</b> .....	<b>64</b>
9.4.1	Fondations superficielles [EN 1998-2/§ 6.4.1] .....	64
9.4.2	Fondations sur pieux [EN 1998-2/§ 6.4.2] .....	64
<b>Chapitre 10.</b>	<b>Culées et murs de soutènement</b> .....	<b>67</b>
<b>10.1</b>	<b>Règles générales</b> .....	<b>67</b>
<b>10.2</b>	<b>Culées connectées au tablier de manière flexible</b> .....	<b>67</b>
<b>10.3</b>	<b>Culées connectées au tablier de manière rigide</b> .....	<b>68</b>
<b>10.4</b>	<b>Poussée des terres. Méthode de Monobé Okabé</b>	
	<b>[EN1998-5/annexe E]</b> .....	<b>70</b>
10.4.1	Généralités .....	70
10.4.2	Évaluation de la poussée des terres [EN1998-5/annexe E] .....	70
<b>10.5</b>	<b>Effort dû à la poussée des terres pour les structures rigides</b> .....	<b>73</b>
<b>Chapitre 11.</b>	<b>Appareils d'appui et attelages</b> .....	<b>75</b>
<b>11.1</b>	<b>Définitions</b> .....	<b>75</b>
<b>11.2</b>	<b>Règles générales [EN 1998-2/§ 6.6]</b> .....	<b>75</b>
11.2.1	Tablier non isolé .....	75
11.2.2	Tablier isolé .....	76
11.2.3	Méthodes de vérification .....	76

<b>11.3 Exemples de conception pour le séisme longitudinal</b> .....	77
11.3.1 Appareils d'appui fixes sur les piles fixes + appuis glissants sur les autres piles .....	77
11.3.2 Appareils d'appui fixes + butées sur piles fixes. Appuis glissants sur les autres piles .....	77
11.3.3 Appuis néoprène fixes + butées sur les piles fixes. Appuis néoprène fixes ou glissants sur les autres piles .....	77
11.3.4 Appuis en élastomère fixes et glissants .....	78
11.3.5 Appareils d'appui en élastomère « non-sismiques » + attelage sur une pile fixe .....	78
<b>11.4 Repos d'appui minimal [EN 1998-2/§6.6.4]</b> .....	78
11.4.1 Repos et ouverture de joint sur culée [EN 1998-2/§6.6.4] .....	79
11.4.2 Repos et ouverture de joint sur pile intermédiaire .....	80
 <b>Chapitre 12. Appareils spéciaux</b> .....	81
<b>12.1 Généralités</b> .....	81
<b>12.2 Fonctions réalisables</b> .....	82
12.2.1 Ressort élastique .....	82
12.2.2 Fusible .....	82
12.2.3 Amortisseur visqueux .....	82
12.2.4 Amortisseur élasto-plastique .....	83
12.2.5 Coupleur dynamique .....	83
<b>12.3 Emploi de coupleurs dynamiques [EN 1998-2/§6.6.3.3]</b> .....	84
<b>12.4 Isolation sismique</b> .....	84
<b>12.5 Structures non isolées</b> .....	85
<b>12.6 Méthodes de calcul</b> .....	85
12.6.1 Cas des appuis en élastomère courants .....	85
12.6.2 Cas des appareils à comportement hystérique .....	85
12.6.3 Cas des amortisseurs visqueux .....	86
12.6.4 Calcul temporel .....	87
<b>12.7 Exemples de conception</b> .....	87
12.7.1 Solution 1 : conception courante .....	87
12.7.2 Solution 2 : coupleur dynamique .....	88
12.7.3 Solution 3 : isolation sismique avec appareils d'appui en élastomère ..	90
12.7.4 Solution 4 : amortisseurs visqueux disposés en parallèle .....	91
12.7.5 Solution 5 : isolation avec un amortisseur métallique élastoplastique	92
12.7.6 Solution 6 : combiné ressort-amortisseur .....	93

<b>Chapitre 13. Liquéfaction [EN1998-5]</b> .....	95
<b>13.1 Définition</b> .....	95
<b>13.2 Vérification</b> .....	95
 <b>Annexe A. Vérification de la régularité – Exemple d'application</b> .....	97
 <b>Annexe B. Critère de cumul des masses modales</b> .....	104
<b>Cas du séisme horizontal</b> .....	104
<b>Cas du séisme vertical</b> .....	105
 <b>Annexe C. Combinaisons sismiques et dimensionnement en capacité</b> .....	106
<b>Combinaisons sismiques</b> .....	106
<b>Dimensionnement en capacité des piles en béton armé</b> .....	108
<b>Exemple d'application</b> .....	108
 <b>Annexe D. Appuis en élastomère</b> .....	113
<b>Paramètres de définition des appuis</b> .....	113
<b>Sollicitations</b> .....	114
<b>Vérification de la résistance</b> .....	114
<b>Vérification du comportement</b> .....	115
<b>Épaisseur des plaques métalliques</b> .....	115
<b>Raideur des appuis</b> .....	116
 <b>Bibliographie</b> .....	117

---

# Introduction

Ce document a pour but de faciliter la compréhension et l'application pratique des Eurocodes pour la justification des ouvrages d'art vis-à-vis du séisme.

Il prend en compte la carte sismique française (décrets n° 2010-1254 et n° 2010-1255 du 22/10/10), les spectres réglementaires (arrêté du 26 octobre 2011), l'EN 1998-1 (règles générales), l'EN 1998-2 (ponts), l'EN 1998-5 (fondations), l'EN 1337-3 (appareils d'appui en élastomère) et l'EN 15129 (dispositifs antisismiques).

Pour la majorité des ouvrages on pourra appliquer la méthode de base des Eurocodes qui fait appel à la notion de coefficient de comportement. Les principes de cette méthode seront tout d'abord exposés, puis les prescriptions réglementaires seront passées en revue et commentées.

Pour les ouvrages comportant des appareils spéciaux (coupleurs, amortisseurs...) la méthode du coefficient de comportement n'est pas toujours applicable. Le principe de fonctionnement de ces différents appareils sera alors exposé ainsi que la méthode de calcul applicable dans chaque cas.

---