

# Effets du séisme sur les structures métalliques



D'après l'Eurocode 8

> Calcul de la résistance au séisme des ossatures en acier

# Guide Eurocode



D'après la norme NF EN 1998-1 : 2005  
(Eurocode 8, partie 1)

## EFFETS DU SÉISME SUR LES STRUCTURES MÉTALLIQUES

### Calcul de la résistance au séisme des ossatures en acier

Directeur de collection : Ménad CHENAF (CSTB)

Auteurs : Pierre-Olivier MARTIN (CTICM)

Pr Jean-Marie ARIBERT (INSA de Rennes)

# EFFETS DU SÉISME SUR LES STRUCTURES MÉTALLIQUES

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment exerce quatre activités clés : la recherche, l'expertise, l'évaluation, et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de développement durable dans le monde de la construction. Son champ de compétences couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec ses 909 collaborateurs, ses filiales et de ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.

## **Avertissement**

Le présent guide ne se substitue en aucun cas aux textes de référence qu'ils soient réglementaires, normatifs ou codificatifs.

Le CSTB décline toute responsabilité quant aux conséquences directes ou indirectes de toute nature qui pourraient résulter de toute interprétation erronée du contenu du présent guide.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1<sup>er</sup> juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

© CSTB mai 2012

ISBN 978-2-86891-473-6

## AVANT-PROPOS

Les autorités publiques ont confié au CSTB l'organisation et la gestion d'un programme d'accompagnement de la mise en œuvre de la directive « produits de construction » (Directive 89/106 du 21 décembre 1988). Ce programme d'accompagnement, appelé « Plan Europe » comporte plusieurs volets, tous concourant à l'intégration des textes techniques européens du domaine de la construction dans les usages français.

Le Plan Europe a été dirigé et organisé par le CSTB, en partenariat avec les acteurs du bâtiment, partenariat formalisé par une convention en date du 1<sup>er</sup> juin 2004. Les partenaires concernés sont :

- le ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer ;
- le Secrétariat d'État au Logement ;
- la Fédération Française du Bâtiment (FFB) ;
- la Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB) ;
- l'Union Sociale pour l'Habitat (USH) ;
- la Fédération française des Promoteurs Constructeurs de France (FPC France) ;
- le Comité professionnel de la Prévention et du Contrôle technique dans la Construction (COPREC) ;
- l'Union Nationale des Syndicats Français d'Architectes (UNSFA) ;
- la Fédération des Professionnels de l'Ingénierie (SYNTEC-Ingénierie) ;
- la Chambre de l'Ingénierie et du Conseil de France (CICF) ;
- l'Association Française de Normalisation (AFNOR) ;
- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

L'un des volets du Plan Europe est dédié spécifiquement aux Eurocodes. Il vise à procurer aux acteurs de la construction, pour les ouvrages courants, des outils pratiques consistant en des guides d'analyse commentés et des programmes de calcul leur permettant d'appliquer les principes et méthodes de dimensionnement proposées dans ces normes. Sont abordés à ce titre tous les matériaux habituels de structure : acier, béton, bois et maçonnerie vis-à-vis des actions normales, climatiques (vent, neige) ou accidentelles (feu, séisme).

Ce guide attire l'attention de l'utilisateur sur le domaine d'application couvert, forcément restreint par rapport à celui de l'Eurocode en question. Le choix délibéré a été de traiter les cas les plus couramment rencontrés, cette restriction s'accompagne d'une simplification de traitement.

Enfin, il est indispensable de souligner que les méthodes proposées dans ce guide sont destinées à réaliser des calculs de structure, et que leur utilisation suppose la connaissance des principes généraux de résistance des matériaux et de la mécanique des structures. Cette connaissance est indispensable pour effectuer les choix judicieux qui incombent au calculateur et apprécier la pertinence des résultats obtenus dans le contexte particulier de l'ouvrage qu'il dimensionne.

## SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION .....	3
1.1	Objet .....	3
1.2	Annexes Nationales .....	4
1.3	Avertissement.....	10
2.	PRINCIPES GÉNÉRAUX DE DIMENSIONNEMENT APPLICABLES AUX BÂTIMENTS EN ACIER .....	11
2.1	Présentation de l'EN 1998-1 .....	11
2.2	Exigences de performance .....	11
2.3	Critères de conformité.....	12
2.4	Vérifications aux États Limites Ultimes .....	12
2.5	Vérification pour la limitation des dommages.....	21
3.	SYSTÈMES DE CONTREVENTEMENT DES BÂTIMENTS EN ACIER .....	25
3.1	Critères de classe de ductilité.....	25
3.2	Conceptions dissipatives et coefficients de comportement de différents systèmes de contreventement – Classes DCM et DCH .....	30
4.	BÂTIMENT À CINQ ÉTAGES .....	43
4.1	Description du bâtiment.....	43
4.2	Étapes de l'étude parasismique .....	51
4.3	Masses et charges.....	52
4.4	Régularités – Choix de la méthode d'analyse .....	56
4.5	Paramètres du calcul sismique.....	63
4.6	Calcul du portique – Direction de séisme X .....	73
4.7	Calcul de la palée triangulée – Direction de séisme Y .....	102
5.	BÂTIMENT INDUSTRIEL .....	121
5.1	Introduction .....	121
5.2	Description du bâtiment.....	121
5.3	Masses et chargements .....	127
5.4	Principe de fonctionnement et méthodes d'analyse .....	129
5.5	Étude d'un portique standard.....	132
5.6	Étude de la travée triangulée.....	143
6.	RÉFÉRENCES .....	159
7.	ANNEXES .....	163
7.1	Annexes générales.....	163
7.2	Annexes du bâtiment à cinq étages.....	173
7.3	Annexes du bâtiment industriel.....	195

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 Objet

La conception et le dimensionnement des structures de bâtiments découlent souvent de leur résistance vis-à-vis des actions naturelles. Parmi celles-ci, le séisme a toujours constitué un problème délicat à traiter, en particulier à cause d'une approche théorique complexe et de son caractère aléatoire extrême, se traduisant par une période de retour dépassant largement le temps de plusieurs générations. Ce n'est qu'à partir de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle que le génie parasismique est réellement devenu une science de l'ingénieur autonome, et ces dernières décennies ont été marquées par des contributions majeures dans ce domaine.

Le concept de « structures dissipatives » marque à cet égard un jalon important dans cette évolution : en échange d'une déformation plastique importante dans certains éléments bien choisis de l'ossature, permettant une absorption de l'énergie engendrée par le séisme, les sollicitations subies par les autres parties de la structure restent limitées. De ce fait, la conception parasismique devrait théoriquement engendrer un surcoût restreint à quelques pourcents du coût global de la structure et rester ainsi économiquement accessible aux bâtiments courants.

Ce concept est à la base des normes récentes utilisées en France, les **règles PS92** [①] jusqu'à la fin des années 2010 et l'**Eurocode EN 1998-1** [②] au-delà. L'**EN 1998-1** est la norme européenne que la réglementation française rend d'application obligatoire à partir du 1<sup>er</sup> mai 2011 pour la plupart des bâtiments construits en zone sismique. Elle s'insère dans le corpus des Eurocodes et fait appel à ce titre aux autres parties, et plus particulièrement l'**EN 1993-1-1** [③] pour ce qui concerne les bâtiments en acier.

L'objet de ce guide est de fournir au praticien un fil conducteur pour l'application de cet **EN 1998-1**, en proposant une vision aussi précise que possible sur le dimensionnement et le calcul des bâtiments courants en acier soumis à des actions sismiques. Pour commencer, le concept fondamental de « structure dissipative » ainsi que ses implications sont exposés. Comme la conception parasismique d'un bâtiment repose pour beaucoup sur la reprise d'efforts sismiques horizontaux, les modes de contreventement revêtent une importance particulière, et encore plus avec le concept de structure dissipative. Aussi, un chapitre particulier de ce guide décrit les différents modes de contreventement pour les bâtiments en acier, avec leurs spécificités et leurs contraintes.

L'essentiel de cet ouvrage est cependant consacré à illustrer l'application de l'**EN 1998-1** aux cas de deux exemples : un bâtiment de bureaux de cinq étages et un bâtiment industriel avec pont roulant. Afin de focaliser l'attention du lecteur principalement sur les enjeux de la conception

parasismique, ces bâtiments ont été volontairement choisis sur la base d'une géométrie simple. Les auteurs ont cependant recherché à les rendre représentatifs des constructions métalliques courantes en France. Dans le traitement de ces exemples, la rédaction s'attache surtout à décrire l'application de l'EN 1998-1. Afin de ne pas alourdir inutilement le texte, elle est plus succincte lorsque les autres parties des Eurocodes sont employées, et les calculs de détail ont été pour la plupart renvoyés en annexe. Le lecteur pourra aussi se tourner avec bénéfice vers les autres ouvrages de cette collection.

## 1.2 Application de l'EN 1998-1 dans le contexte français

L'EN 1998-1 est une norme européenne, identique dans tous les pays ayant adopté ce corpus. Elle s'applique en France dans un cadre particulier : ce sont les Décrets [4, 5] et l'Arrêté [6] du 22 octobre 2010, entrant en vigueur le 1<sup>er</sup> mai 2011 qui en précisent l'usage. Ils définissent aussi, en complément de l'Annexe Nationale de l'EN 1998-1 [7], les valeurs des paramètres qui restaient à fixer par l'Administration française.

### 1.2.1 Classement des bâtiments

La réglementation française citée auparavant concerne les bâtiments dits à « risque normal », c'est-à-dire ceux ne relevant pas des installations classées, dont les conséquences d'une ruine sont hors de proportion avec les dégâts subis par les installations. Cette réglementation distingue, en conformité avec les principes de l'EN 1998-1, les bâtiments en quatre catégories d'importance, notées de I à IV. Les trois premières catégories (I à III) sont relatives à la probabilité et à la densité d'occupation des bâtiments. La dernière catégorie (IV), concerne tous les bâtiments abritant les services vitaux dont il faut préserver le fonctionnement en cas de catastrophe à grande échelle : sécurité civile, hôpitaux, casernes de pompiers, réseaux d'eau potable, etc.

Catégorie d'importance	Coefficient d'importance $\gamma_i$	Bâtiments
I	0,8	- les bâtiments dont est exclue toute activité humaine nécessitant un séjour de longue durée et non visés par les autres catégories ; exemple : hangar agricole.
II	1,0	- les maisons individuelles ; - les bâtiments d'habitation collective, de bureaux et de commerce non visés par la catégorie III ; - les bâtiments industriels non visés par la catégorie III ; - les parcs de stationnement ouverts au public ; - les ERP des 4 <sup>e</sup> et 5 <sup>e</sup> catégories.

Catégorie d'importance	Coefficient d'importance $\gamma_1$	Bâtiments
III	1,2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- les bâtiments d'habitation collective ou de bureaux dont la hauteur dépasse 28 m ;</li> <li>- les ERP des 1<sup>re</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> catégories ;</li> <li>- les bâtiments pouvant accueillir simultanément plus de 300 personnes (notamment commerces, bureaux, bâtiments industriels) ;</li> <li>- les établissements scolaires ;</li> <li>- les bâtiments des centres de production collective d'énergie.</li> </ul>
IV	1,4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- les bâtiments abritant les moyens opérationnels de secours ou de la défense (hommes et/ou matériel) ;</li> <li>- les bâtiments assurant le maintien des communications (tours hertziennes, centres vitaux des réseaux de télécommunication, etc.) ;</li> <li>- les bâtiments assurant le contrôle de la circulation aérienne ;</li> <li>- les établissements de santé ;</li> <li>- les bâtiments de distribution ou de stockage de l'eau potable ;</li> <li>- les bâtiments des centres de distribution publique de l'énergie ;</li> <li>- les bâtiments des centres météorologiques.</li> </ul>

Tableau 1.1 : Définition des catégories d'importance.

#### Remarque

ERP = Etablissements recevant du public, tels que définis par le Code de la Construction (par exemple, de manière non exhaustive : cinémas, hôtels, théâtres, bibliothèques, gares, etc.). Les catégories d'ERP dépendent du nombre de personnes que ces derniers peuvent recevoir simultanément :

- 1<sup>re</sup> catégorie : plus de 1500 personnes ;
- 2<sup>e</sup> catégorie : de 701 à 1500 personnes ;
- 3<sup>e</sup> catégorie : de 301 à 700 personnes ;
- 4<sup>e</sup> catégorie : moins de 300 personnes, à l'exception des bâtiments de la 5<sup>e</sup> catégorie ;
- 5<sup>e</sup> catégorie : bâtiments recevant un petit nombre de personnes (défini en fonction du type d'établissements)

Pour les bâtiments de la 5<sup>e</sup> catégorie, on ne considère pour le nombre de personnes que le public et pas les employés. Pour les autres catégories, le nombre de personnes cumule le public et les employés.

### 1.2.2 Zonage sismique du territoire

Le territoire français est divisé en cinq zones, allant de la zone (1) de sismicité très faible à la zone (5) de forte sismicité. À chacune de ces zones est associée une valeur de  $a_{gr}$ , l'accélération maximale de référence au niveau d'un sol de type rocheux (classe A dans l'EN 1998-1) (cf. tableau 1.2). Ce découpage est basé sur une approche probabiliste, tenant compte de la probabilité d'occurrence d'un séisme pour un lieu donné, et non plus seulement de l'historique des tremblements de terre.

Il est calé sur les limites communales du territoire, qui ont été jugées par les pouvoirs publics plus stables dans le temps que le maillage cantonal de l'ancien zonage.

Zone	Sismicité	$a_{gr}$ (m/s <sup>2</sup> )
1	très faible	0,4
2	faible	0,7
3	modérée	1,1
4	moyenne	1,6
5	forte	3,0

Tableau 1.2 : Zones de sismicité et accélérations  $a_{gr}$ .

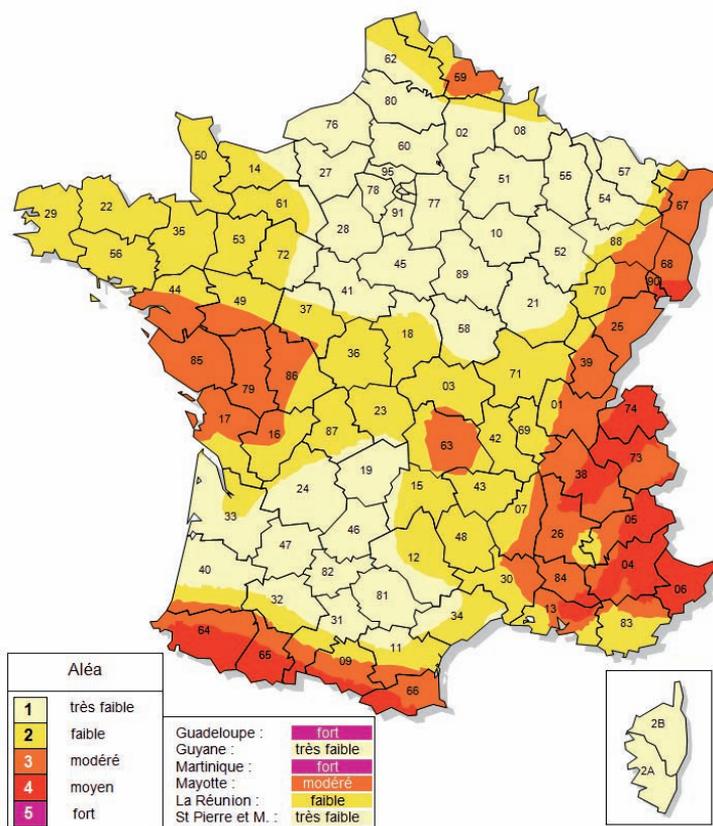


Figure 1.1 : Zonage sismique de la France, défini par le Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010.

### 1.2.3 Bâtiments concernés par la réglementation parasismique

La réglementation parasismique qui entre en vigueur à partir du 1<sup>er</sup> mai 2011 concerne tous les nouveaux bâtiments suivants :

- bâtiments de catégories d'importance III et IV situés en zone de sismicité 2 (aléa faible) ;
- bâtiments de catégories d'importance II, III et IV situés en zones de sismicité 3, 4 et 5 (aléas sismiques moyen, modéré et fort respectivement).

De ce fait, il n'y a aucune exigence de la réglementation parasismique française pour les nouveaux bâtiments suivants :

- tous les bâtiments de la catégorie d'importance I, quelle que soit la zone sismique ;
- les bâtiments de catégorie d'importance II situés en zone de sismicité 2 ;
- tous les bâtiments situés en zone de sismicité 1, quelle que soit leur catégorie d'importance.

L'Arrêté du 22 octobre 2010 impose pour tous les bâtiments concernés par la réglementation parasismique d'utiliser l'**EN 1998-1** et son Annexe Nationale comme règles de construction. Cet Arrêté prévoit cependant que des règles simplifiées pourront être appliquées dans les cas suivants :

- pour les bâtiments appartenant à la catégorie d'importance II, situés en zone de sismicité 3 ou 4 et conformes au domaine d'application de la norme dite PS-MI89 (référence AFNOR **NF P 06-014** mars 1995 amendée A1 février 2001), cette dernière peut être appliquée en lieu et place de l'**EN 1998-1** ;
- pour les établissements scolaires (catégorie d'importance III), situés en zone de sismicité 2 et conformes au domaine d'application de la norme dite PS-MI89 (référence AFNOR **NF P 06-014** mars 1995 amendée A1 février 2001), cette dernière peut être appliquée en lieu et place de l'**EN 1998-1** ;
- pour les maisons individuelles appartenant à la catégorie d'importance II, situées en zones de sismicité 5, le document « CP-MI Antilles » (rédigé par l'AFPS, édition 2004) peut être appliqué en lieu et place de l'**EN 1998-1**.

Pour les bâtiments existants, l'arrêté du 22 octobre 2010 définit les conditions particulières pour l'application de la réglementation.

Zone de sismicité		Catégorie d'importance du bâtiment	Code de dimensionnement
1		Toutes (I, II, III et IV)	Pas de réglementation parasismique
2		I et II	
3		III*	Etablissements scolaires : PS-MI89
		IV*	Eurocode 8
4		I	Pas de réglementation parasismique
		II*	Maisons individuelles et assimilées : PS-MI89
5		III et IV*	Eurocode 8
5		I	Pas de réglementation parasismique
		II*	Maisons individuelles : Guide CP-MI Antilles
		III et IV*	Eurocode 8

\* : L'existence d'un Plan de Prévention des Risques Sismique (PPRS) local peut modifier les modalités d'application des règles.

Tableau 1.3 : Codes de dimensionnement parasismique autorisés.

### 1.2.4 Accélération du sol et spectres de calcul des composantes horizontales de l'action sismique

L'action du séisme qui doit être prise en compte pour le dimensionnement des bâtiments se détermine à partir des « spectres de réponse élastique ». Pour les composantes horizontales de l'action sismique, ceux-ci dépendent des paramètres suivants :

- l'accélération de calcul  $a_g$  pour un sol de classe A, définie par  $a_g = \gamma_1 a_{gr}$  ( $\gamma_1$  coefficient d'importance donné dans le tableau 1.1 et  $a_{gr}$  accélération maximale de référence donnée dans le tableau 1.2) ;
- le paramètre de sol  $S$ , représentant la nature du sol ;
- les périodes  $T_B$ ,  $T_C$ , respectivement limites inférieure et supérieure des périodes définissant le plateau d'accélération spectrale et  $T_D$ , la période définissant le début de la branche à déplacement spectral constant.

Le tableau 1.4 donne les valeurs de  $a_g$  à considérer en fonction de la zone de sismicité et de la catégorie d'importance. Le tableau 1.5 donne les valeurs de  $S$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  et  $T_D$  en fonction de la nature du sol, représentée par sa classe (de A à E selon les critères du paragraphe de l'EN 1998-1), tels qu'ils sont définis par l'Arrêté du 22 octobre 2010.

Accélération de calcul $a_g = \gamma_1 a_{gr}$ (m/s <sup>2</sup> ) pour un sol de classe A				
Zone de sismicité	Catégorie d'importance			
	I	II	III	IV
1				
2		0,70	0,84	0,98
3		1,10	1,32	1,54
4		1,60	1,92	2,24
5		3,00	3,60	4,20

Tableau 1.4 : Accélération  $a_g$  pour un sol de classe A.

Classe de sol	Zones de sismicité 1 à 4				Zone de sismicité 5			
	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,00	0,03	0,20	2,50	1,00	0,15	0,40	2,0
B	1,35	0,05	0,25	2,50	1,20	0,15	0,50	2,0
C	1,50	0,06	0,40	2,00	1,15	0,20	0,60	2,0
D	1,60	0,10	0,60	1,50	1,35	0,20	0,80	2,0
E	1,80	0,08	0,45	1,25	1,40	0,15	0,50	2,0

Tableau 1.5 : Paramètres du spectre de réponse pour les directions horizontales de l'action sismique, en fonction de la nature du sol.

### 1.2.5 Traitement de la composante verticale de l'action sismique

On verra par la suite dans ce guide les conditions pour lesquelles la prise en compte de la composante verticale de l'action sismique est obligatoire (cf. le paragraphe 4.5.7.2). Dans ce cas, les paramètres du spectre de réponse élastique dans la direction verticale sont définis par l'Arrêté du 22 octobre 2010 et rappelés dans le tableau 1.6.

Zones de sismicité	$a_{vg} / a_g$	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
1 à 4	0,8	1,0	0,03	0,20	2,5
5	0,9	1,0	0,15	0,40	2,0

Tableau 1.6 : Paramètres du spectre de réponse pour la direction verticale de l'action sismique.

### **1.2.6 Exigences fondamentales**

Les exigences fondamentales de l'EN 1998-1 sont abordées plus loin au paragraphe 2.2. Le Décret 2010-1254 ajoute à celles-ci l'exigence de continuité de fonctionnement après séisme des installations, équipements et bâtiments de la catégorie d'importance IV, pour pouvoir garantir l'organisation des secours et l'assistance à la population. Ceci aura pour conséquence l'adoption de mesures spécifiques pour cette catégorie de structures, qui ne sont pas abordées dans le cadre de ce guide.

La valeur du coefficient  $\nu$  à considérer pour l'exigence de limitation des dommages (cf. le paragraphe 2.2.2) est fixée par l'Arrêté à  $\nu = 0,4$ , quelle que soit la catégorie d'importance du bâtiment.

### **1.3 Avertissement**

Les dimensionnements proposés dans les exemples doivent être considérés du point de vue pédagogique et ne peuvent en aucun cas servir de justification, ni être repris en l'état pour un projet réel. Les États Limites Ultimes (ELU) non accidentels en particulier, incluant les effets des actions climatiques, n'ont pas été considérés dans ce document.

En outre, il appartient au lecteur de prendre en compte et d'appliquer la réglementation en vigueur à la date du projet qu'il traitera, susceptible d'avoir évolué depuis la rédaction de ce guide.

## 2. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE DIMENSIONNEMENT APPLICABLES AUX BÂTIMENTS EN ACIER

### 2.1 Présentation de l'EN 1998-1

L'EN 1998-1, publiée comme norme NF par l'AFNOR en septembre 2005, est applicable au dimensionnement des bâtiments et des ouvrages de génie civil en zone sismique. Elle se décompose en dix chapitres, en particulier :

- le chapitre 2 contient les exigences de performance qu'impose la norme et les critères à satisfaire pour être conforme à ces exigences ;
- le chapitre 4 contient des règles de calcul générales, applicables à tous les bâtiments ;
- le chapitre 6 fournit des règles spécifiques pour les bâtiments en acier.

### 2.2 Exigences de performance

#### 2.2.1 Exigence de non-effondrement

L'exigence de base, dite de « non-effondrement », a pour objectif d'éviter de mettre en danger la sécurité des personnes. Elle signifie que la structure doit être conçue, dimensionnée et réalisée de manière à résister aux actions sismiques de calcul (définies au chapitre 3 de l'EN 1998-1), sans effondrement local ou général, conservant ainsi son intégrité structurale et une capacité portante résiduelle après l'événement sismique (cf. le paragraphe 2.1 (1)P).

#### 2.2.2 Exigence de limitation des dommages

Une autre exigence, dite de « limitation des dommages », a pour objectif d'éviter que n'apparaissent des dommages trop importants dans la structure (en particulier dans ses éléments non structuraux) sous des actions sismiques plus faibles que celles considérées pour l'exigence de non-effondrement, mais de probabilité d'occurrence plus élevée. Cette deuxième exigence a donc un caractère plutôt économique.

Le coefficient de réduction de l'action sismique à appliquer pour satisfaire cette exigence est le coefficient  $\nu$ , dont la valeur est définie par l'Arrêté (cf. le paragraphe 1.2.6).

## 2.3 Critères de conformité

Pour satisfaire à l'exigence de non-effondrement, la structure résistante aux actions sismiques doit être vérifiée aux États Limites Ultimes (ELU) associés à la résistance et à la stabilité de cette structure et de ses éléments primaires (cf. le paragraphe 2.4 du présent guide). Par opposition aux éléments secondaires, les éléments sismiques primaires sont définis comme ceux conçus et vérifiés pour assurer seuls la résistance et la stabilité aux actions sismiques, et en conséquence ils sont modélisés dans l'analyse de la structure résistante pour la situation sismique de calcul (cf. le paragraphe 1.5.2 (1)).

Pour satisfaire à l'exigence de limitation des dommages, il faut respecter certaines limitations de déformation entre étages (cf. le paragraphe 2.5 du présent guide), en considérant une action sismique réduite par le coefficient  $\nu$ , dont la valeur est fixée par l'Arrêté, et en introduisant éventuellement d'autres vérifications (paragraphe 4.4.3.1 (2) de l'EN 1998-1) pouvant être requises dans le cas de bâtiments essentiels pour la protection civile ou contenant des équipements sensibles (cf. le paragraphe 1.2.6 du présent guide).

## 2.4 Vérifications aux États Limites Ultimes

### 2.4.1 Généralités

Pour effectuer les vérifications aux ELU, l'EN 1998-1 met à profit la capacité de dissipation d'énergie de la structure sous des forces sismiques alternées, dite « capacité de dissipation hystérétique », dans la mesure où elle fait appel au comportement plastique et cyclique. Cette capacité de dissipation hystérétique est traduite par une certaine valeur du facteur de comportement  $q$  de la structure (cf. le paragraphe 2.2.2 (2)). L'EN 1998-1 considère que ce facteur ne dépend que du système de contreventement utilisé pour s'opposer aux actions sismiques horizontales (cf. le paragraphe 3 du présent guide), de la régularité en élévation de ce système (cf. la minoration par 0,8 au tableau 4.1), parfois de la régularité en plan du bâtiment (cf. le paragraphe 6.3 (4)), et de la classe de ductilité adoptée pour la structure résistante.

Les structures en acier peuvent appartenir à trois classes de ductilité différentes, à savoir DCL pour une faible ductilité, DCM pour une ductilité moyenne et DCH pour une ductilité élevée (il en va de même pour les structures en béton, mais avec des critères de classification différents). Ces classes correspondent successivement à une capacité accrue de la structure en dissipation hystérétique.

### 2.4.2 Classe de ductilité DCL

La classe DCL est attribuée aux structures n'ayant pas véritablement un fonctionnement dissipatif, ce qui leur permet d'être vérifiées selon les règles habituelles, c'est-à-dire non sismiques (en particulier, l'EN 1993-1-1 pour les structures et leurs éléments en acier, l'EN 1993-1-8 [8] pour les assemblages en acier, etc.). Pour les bâtiments courants en acier qui n'ont pas de système d'isolation sismique à leur base (cf. le paragraphe 10), l'EN 1998-1 « recommande » dans le paragraphe 6.1.2 (4) l'adoption de la classe DCL « uniquement pour les cas de faible sismicité », c'est-à-dire pour les cas dans lesquels l'accélération de calcul du sol  $a_g$  n'est pas supérieure à  $0,8 \text{ m/s}^2$  ou pour les cas dans lesquels le produit  $a_g S$  n'est pas supérieur à  $1 \text{ m/s}^2$  ( $S$  étant le paramètre de sol ; cf. le paragraphe 3.2.2.2).

Cette recommandation doit être prise comme telle, faisant que l'utilisation de la classe DCL n'est pas interdite dans les zones de sismicité 3, 4 ou 5. Dans ce cas, par mesure de sécurité et selon une pratique admise en construction métallique dans d'autres pays européens, il est recommandé de majorer les sollicitations engendrées par l'action sismique par un coefficient de 1,25 lorsque le système de stabilité primaire comporte des éléments avec des sections de classe 4.

En outre, il faut noter que l'analyse d'une structure en comportement purement élastique linéaire reste également une option toujours possible (c'est d'ailleurs le type d'analyse généralement utilisé dans l'EN 1998-3 [9] pour l'évaluation et le renforcement des bâtiments existants). Les vérifications se font là aussi selon les règles habituelles, les sollicitations étant déterminées à l'aide des spectres correspondant à ce type de comportement, tels qu'ils sont définis par les paragraphes 3.2.2.2 et 3.2.2.3 de l'EN 1998-1. Ces spectres dépendent de l'amortissement critique  $\xi$  représentatif de la structure, pour lequel les valeurs suivantes peuvent être utilisées :

- structure en acier avec assemblages soudés :  $\xi = 2 \%$  ;
- structure en acier avec assemblages boulonnés :  $\xi = 4 \%$  ;
- structure mixte acier/béton avec assemblages soudés (pour la partie acier) :  $\xi = 3 \%$  ;
- structure mixte acier/béton avec assemblages boulonnés (pour la partie acier) :  $\xi = 4 \%$ .

**Remarque**

En ce qui concerne le coefficient de comportement en classe DCL, l'EN 1998-1 considère que tous les bâtiments de différents matériaux (béton armé, acier, mixte acier-béton, bois, maçonnerie) possèdent toujours une certaine sur-résistance au-delà du fonctionnement dans le domaine élastique, autorisant à prendre la valeur  $q = 1,5$  sans dispositions constructives particulières (cf. le paragraphe 2.2.2 (2)). Toutefois, pour les bâtiments en acier (ainsi que pour les bâtiments mixtes acier-béton), dans le cadre de l'initiative laissée à l'Annexe Nationale (cf. la note 1 du paragraphe 6.1.2 (1)P), il est possible d'adopter  $q = 2$  en classe DCL, sous réserve de satisfaire à certaines exigences, entre autres l'interdiction d'utiliser des éléments de classe de section 4 dans le système résistant à l'action sismique, la nécessité d'utiliser des assemblages non dissipatifs ou tout au moins faiblement dissipatifs dans ce système, celle d'utiliser pour les assemblages boulonnés des boulons HR à serrage contrôlé (ou des boulons calibrés fonctionnant en pression diamétrale dans les assemblages en cisaillement), etc. Ces exigences minimales permettent en outre l'emploi de la classe DCL pour les cas de sismicité où  $a_g S$  n'est pas supérieur à  $2,5 \text{ m/s}^2$ , conformément à une pratique qui a fait ses preuves en construction métallique depuis plusieurs années. L'énoncé plus précis des exigences à satisfaire peut être trouvé à l'article 2.8 du *Guide de recommandations du CTICM* [10].

**2.4.3 Classes de ductilité DCM et DCH**

Les classes DCM et DCH, qui mettent pleinement à profit le comportement dissipatif hystérétique de la structure résistant à l'action sismique, sont en fait celles pour lesquelles l'EN 1998-1 fournit des règles spécifiques de vérification, en particulier au chapitre 6 pour les bâtiments en acier. Ce chapitre établit une distinction bien nette entre les éléments conçus pour comporter des zones dissipatives (par exemple, les poutres d'un portique ou les barres de triangulation d'une palée) et les éléments qui doivent rester non dissipatifs (poteaux d'un portique, poutres et poteaux d'une palée triangulée). Ce qui différencie essentiellement la classe DCH de la classe DCM, c'est la plus grande capacité de déformation plastique cyclique des éléments dissipatifs, obtenue au prix de dispositions constructives plus exigeantes (limitation plus forte des élancements des éléments et de leurs parois pour se prémunir contre le risque d'instabilité, catégorie supérieure de fonctionnement des assemblages boulonnés, résistance suffisante à la rupture fragile (ténacité) des soudures, etc.). Des critères quantitatifs sur cette différenciation seront donnés au paragraphe 3.1.

Lors d'un projet, le choix entre les deux classes peut ne pas être évident, en précisant bien que la classe de ductilité choisie doit être la même pour l'ensemble des systèmes de contreventement, même si le facteur de comportement  $q$  a des valeurs différentes pour les deux directions horizontales de l'action sismique (cf. le paragraphe 3.2.2.5 (3)P). Dans la mesure où, pour un type donné de structure, la valeur du facteur de comportement est plus élevée en classe DCH qu'en classe DCM, le choix de la classe DCH va conduire à une meilleure optimisation en résistance

sur le plan sismique, donc à des sections moins importantes des éléments primaires. En revanche, ce choix va se traduire par des coûts plus élevés pour la phase d'étude du projet, et surtout les phases d'exécution et de contrôle technique en raison des exigences plus sévères sur les dispositions constructives. Par ailleurs, l'optimisation en résistance des sections peut rendre plus difficile à satisfaire l'exigence de limitation des dommages qui est en fait une limitation des déplacements relatifs entre étages, comme on le précisera au paragraphe 2.5.

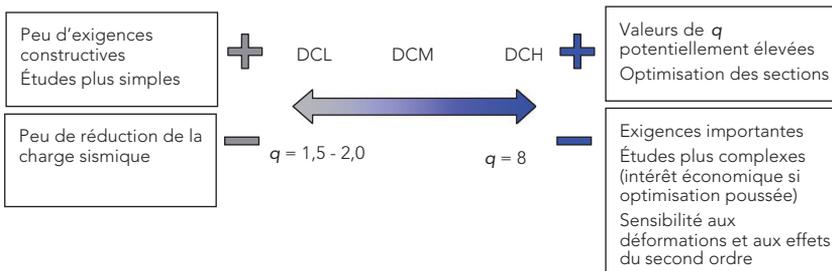


Figure 2.1 : Choix de la classe de ductilité et du coefficient de comportement.

Le tableau 2.1 propose une synthèse des différentes possibilités de conception dissipative offertes pour les structures en acier, décrites dans ce paragraphe et le précédent.

		Comportement des structures	
Type		Structure faiblement dissipative	Structure dissipative
Classe	Structure non dissipative	Classe DCL	Classe DCM et DCH
Spectre de calcul	EN 1998-1 § 3.2.2.2	EN 1998-1 § 3.2.2.5	
Action sismique	Pas de réduction des efforts sismiques	Faible réduction des efforts sismiques ( $q = 1,5$ ou $2$ selon les dispositions constructives) Pour les bâtiments en zone de sismicité 3,4 ou 5 et comportant des éléments de la structure primaire avec des sections de classe 4, majoration des efforts par 1,25	Réduction notable des efforts sismiques ( $q \geq 2$ )
Vérification de la Résistance	Dimensionnement selon Eurocode 3 ou 4 – pas d'exigences supplémentaires		Eurocode 3 ou 4 + Exigences spécifiques EN 1998-1 pour garantir la formation des zones dissipatives

Tableau 2.1 : Comportements des structures sous actions sismiques.

#### 2.4.4 Signification du coefficient de comportement $q$

Pour en revenir aux vérifications à effectuer aux États Limites Ultimes, il est essentiel de préciser que le coefficient de comportement  $q$  autorise à effectuer ces vérifications à un stade en deçà de celui de la première plastification significative de la structure résistante, voire juste à ce stade de première plastification, et par conséquent nettement en deçà du stade de la ruine vraie. Cette dernière peut être caractérisée par l'atteinte de la capacité de déformation plastique d'une zone dissipative (éventuellement endommagée par le phénomène de fatigue oligocyclique), ou par la formation d'une instabilité élasto-plastique globale au sens dynamique. Les valeurs de  $q$  spécifiées dans l'**EN 1998-1** sont présumées offrir toutes les garanties pour se prémunir contre ces types de ruine vraie (cf. la note du paragraphe 2.2.2 (2)) sous l'intensité des actions sismiques définies par les spectres de réponse élastique (cf. les paragraphes 3.2.2.2 et 3.2.2.3), alors que les vérifications aux ELU sont effectuées à des niveaux d'action sismique réduite par le facteur  $q$ , exprimés par le biais des spectres de réponse de calcul (cf. le paragraphe 3.2.2.5). Les sollicitations dans les éléments primaires de la structure résistante peuvent alors être déterminées par une analyse élastique linéaire, soit de caractère statique (dans le cas de la méthode dite « par forces latérales » ; cf. le paragraphe 4.3.3.2), soit de caractère dynamique (dans le cas d'une analyse modale et spectrale ; cf. le paragraphe 4.3.3.3). En fait, les vérifications à effectuer avec les sollicitations ainsi déterminées doivent être encore adaptées pour permettre de conserver la hiérarchie entre éléments dissipatifs et éléments non dissipatifs jusqu'au stade de la ruine vraie, en évitant que des éléments non dissipatifs ne soient trop sollicités et périssent prématurément par ruine fragile. On utilise dans l'**EN 1998-1** le terme de « dimensionnement en capacité » pour qualifier cette procédure d'adaptation (cf. le paragraphe 2.2.4.1 (2)P).

#### 2.4.5 Éléments primaires et éléments secondaires

Le paragraphe 1.5.2 (1) de l'**EN 1998-1** distingue :

- les éléments sismiques primaires qui sont les éléments de la structure résistant à l'action du séisme ;
- les éléments sismiques secondaires dont la résistance et la rigidité vis-à-vis des actions sismiques peuvent être négligées.

Les éléments primaires doivent être conçus et étudiés pour assurer la résistance de la structure aux séismes, conformément aux règles de l'**EN 1998-1**. Il n'est en revanche pas nécessaire de vérifier la résistance des éléments secondaires aux actions sismiques.

Tous les éléments par lesquels transitent des efforts sismiques doivent être considérés comme des éléments primaires, même s'ils ne font pas directement partie du système de contreventement. La figure 2.2 donne un exemple de la distinction entre éléments primaires et secondaires.

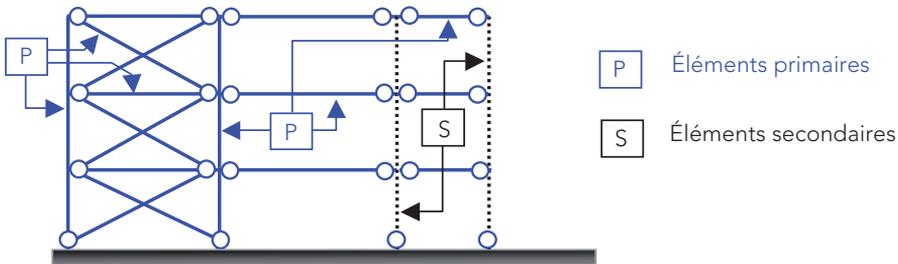


Figure 2.2 : Éléments primaires et secondaires d'une structure triangulée.

### 2.4.6 Dimensionnement en capacité des éléments primaires

Pour être plus précis, tout en s'appuyant sur la forme générale des relations de vérification du chapitre 6, les vérifications aux ELU à effectuer sous les actions de la situation sismique de calcul, donc réduites par le facteur  $q$ , se présentent de la manière suivante :

- cas a) : chaque élément dissipatif « i », soumis à la sollicitation de calcul  $E_{di}$ , doit posséder une résistance suffisante, soit :

$$E_{di} \leq R_{di}$$

où  $R_{di}$  est la résistance de calcul de l'élément, calculée selon les règles de l'EN 1993-1-1 pour les éléments en acier (ou de l'EN 1993-1-8 pour les assemblages), mais en utilisant des coefficients partiels des matériaux (donnés par l'Annexe Nationale dans le paragraphe 6.1.3 (1)) qui tiennent compte du caractère accidentel de l'action sismique et de l'éventualité d'une dégradation de résistance sous des déformations cycliques. Cette résistance est le plus souvent de type plastique pour un élément stable, mais elle peut concerner également l'instabilité de forme de certains éléments (par exemple, le flambement élasto-plastique des diagonales de triangulation en V ; cf. le paragraphe 3 du présent guide). Par ailleurs, la notation  $E_{di}$  de la condition précédente peut signifier une situation où plusieurs sollicitations interviennent conjointement (par exemple, un moment fléchissant avec un effort normal et un effort tranchant), auquel cas  $R_{di}$  doit être déterminée sur la base d'une relation appropriée d'interaction en résistance. Enfin, il convient de ne pas oublier que la vérification en résistance d'un élément dissipatif doit être doublée d'une vérification de sa capacité de déformation plastique dans la mesure où celle-ci doit être compatible avec la valeur du facteur de comportement adopté. Cette autre vérification est quasi immédiate lorsqu'elle peut se baser simplement sur la classe de section de l'élément dissipatif, soumis à de la flexion et/ou de l'effort normal (cf. le tableau 6.3 de l'EN 1998-1) ; elle peut nécessiter parfois une justification plus complexe de caractère expérimental, s'appuyant éventuellement sur une base de données existantes, notamment dans le cas d'assemblages à résistance partielle conçus pour constituer des zones dissipatives (cf. les paragraphes 6.5.5 (6) et (7)) ;