ANNEXE 4-3
Les Spectres de réponse
Bâtiment « à risque normal »

ANNEXE A L'USAGE DES CONCEPTEURS D'OUVRAGE

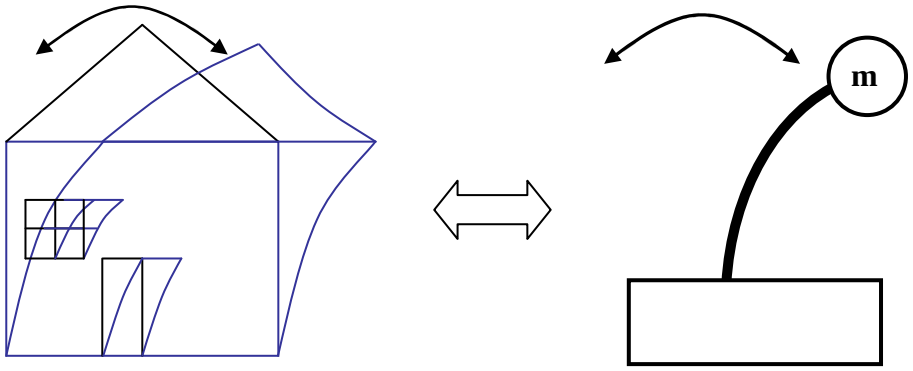
Spectres de réponse spécifiques aux différentes zones identifiées sur la commune de Grans – bâtiment « à risque normal »

D'une manière générale, la vibration du sol induite par le tremblement de terre est représentée par des mouvements sismiques contre lesquels il convient de se prémunir. Ils dépendent à la fois de la région et du site (plaine, vallée, colline, etc.) où l'on se trouve. La réglementation en vigueur définit les mouvements sismiques en fonction du zonage sismique nationale.
Toutefois le Plan de Prévention des Risques (PPR) peut proposer des niveaux de protection différents de ces niveaux forfaitaires. Ces niveaux font suite à une étude technique appelée **« microzonage sismique »** menée à l'échelle communale et peuvent être considérés comme mieux adaptés au contexte sismique local. Cette évaluation de l'aléa local ou « microzonage sismique » se substitue aux mouvements sismiques définis par la réglementation nationale (spectre de réponse).

Spectre de réponse

Les mouvements sismiques sont caractérisés par un spectre de réponse élastique (par la réglementation ou dans le cadre du microzonage), ancré à **période nulle** (T=0) à une accélération de calage (notée $\mathbf{a_g}$ dans les normes EC8 et sur le graphique ci-après) dépendant de la catégorie d'importance de l'ouvrage et du type de sol (zones).
Le spectre de réponse est une courbe représentant l'**accélération maximale** induite par les vibrations sismiques en fonction de la période propre d'un oscillateur harmonique simple (pendule, ressort,…) et de son amortissement critique.
Le spectre de réponse est un outil utilisé par les **concepteurs** d'ouvrage (bâtiments, ouvrage d'art…).

La période propre : Pour un pendule de masse m, par exemple, lorsque celui-ci est écarté de sa position d'équilibre au repos puis relâché, la période propre correspond à la durée séparant deux passages consécutifs par le même point, dans le même sens. La période propre d'un oscillateur harmonique correspond à la durée d'une oscillation libre.



Bâtiment *Oscillateur harmonique*

L'intérêt principal du spectre de réponse vient de ce qu'en première approximation, un bâtiment ou un ouvrage peut être assimilé à un oscillateur simple (pendule, ressort,…) : la seule connaissance de sa période propre T (liée au type de structure, à la taille et aux propriétés du matériau constitutif) et de son amortissement (lié au matériau et aux dispositions constructives) permet d'estimer l'accélération, la vitesse et le déplacement maximaux subis par l'ouvrage, et, par conséquent, les forces et contraintes à l'intérieur de la structure.

L'expression des équations des différentes branches du spectre de réponse est standardisée. Le spectre de réponse est entièrement déterminé par la connaissance de l'accélération d'ancrage (accélération à la période nulle **agr**) et des valeurs des périodes caractéristiques des branches du spectres {**TB**, **TC** et **TD**} ainsi que des paramètres (**S**, **γ_I**, **η**) définies dans le tableau ci-après.

Article 3.2.2.2 (1)P (Eurocode 8-1)

Les branches du spectre de réponse élastique $S_e(T)$ sont définies par les équations suivantes:

Période	**Equation**
0 < T < TB	Se(T)= agr.S.γ_I.[1 + T/TB (η. 2,5 -1)]
TB < T < TC	Se(T)= agr.S.γ_I.η. 2,5
TC < T < TD	Se(T)= agr.S.γ_I.η. 2,5.(TC /T)
TD < T	Se(T)= agr.S.γ_I.η. 2,5 (TC .TD /T²)

S_e (T) ordonnée du spectre de réponse élastique,
T période de vibration d'un système à un degré de liberté,
a_{gr} accélération de calcul au niveau d'un sol de classe A,
T_B, T_C, T_D périodes caractéristiques des branches du spectre,
T_B : limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante,
T_C : limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante
T_D : valeur définissant le début de la branche à déplacement constant
S paramètre du sol,
γ_I coefficient d'importance du bâtiment,
η coefficient de correction d'amortissement (η=1 pour l'amortissement 5%).

Tableau 1 : formule des branches du spectre de réponse élastique en représentation standard (Eurocode 8)

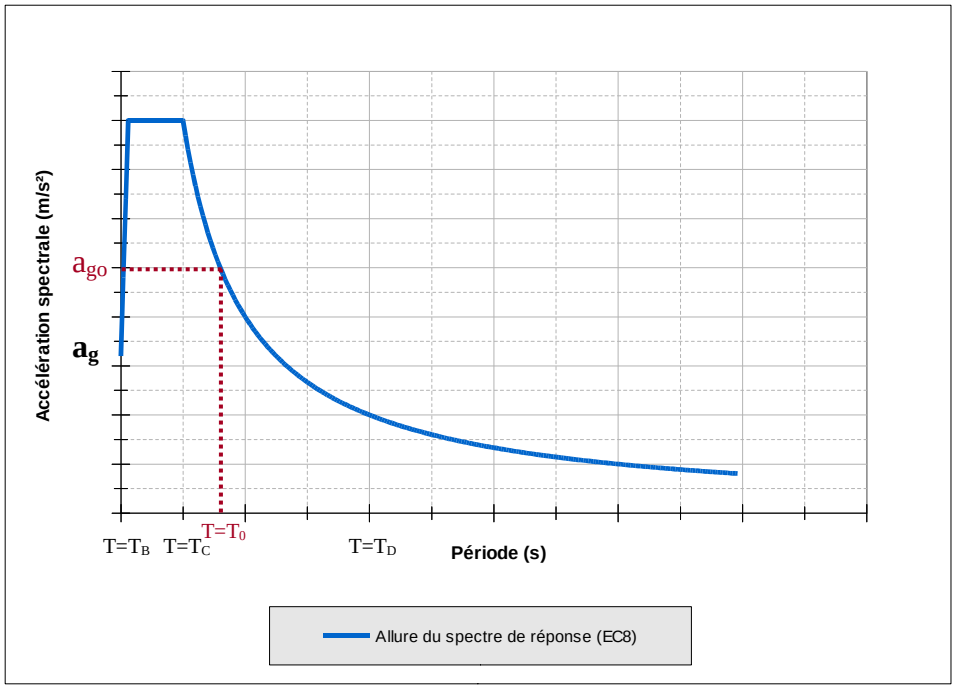


Illustration 1 : Allure du spectre de réponse élastique selon l'EC8

Pour une période propre donnée d'un bâtiment (de typologie simple), il est possible, à partir du spectre de réponse élastique (courbe), de connaître l'accélération maximale de référence subie par le bâtiment. Cette connaissance permet de dimensionner ce dernier afin qu'il puisse résister aux secousses sismiques. Exemple de l'illustration 1: pour une période T_0, on peut facilement déterminer, par simple lecture graphique, la valeur de l'accélération a_{g0}.

La prise en compte d'un mouvement sismique, défini sous la forme d'un spectre de réponse élastique est obligatoire pour les bâtiments de catégorie d'importance II, III et IV (notamment en zone de sismicité 4, Grans). Néanmoins, pour les bâtiments de catégorie d'importance II de configuration « simple » remplissant les conditions du paragraphe 1.1 (Domaine d'application) de la norme « NF P 06-014 mars 1995 amendée A1 février 2001 des règles simplifiées adaptées (dites règles PS-MI) peuvent se substituer aux règles générales.

Spectres de réponse issus du microzonage

L'aléa sismique concerne l'ensemble du territoire communal. Le spectre de réponse élastique à 5% du sol rocheux (zone Z1) proposé par le CEREMA est celui de l'aléa régional (sol de classe A au sens de la norme NF EN 1998-1 – Eurocode 8-, bâtiment de catégorie d'importance II)) défini par la réglementation nationale. Pour les zones à effet de site lithologique, le bureau d'études a réalisé un calcul numérique afin de déterminer les spectres de réponse élastique propres aux zones soumises aux effets de site lithologiques (zone Z3, Z4 et Z5). Ce microzonage modifie les spectres de réponse normatifs de la réglementation nationale pour les zones à effets de site.

Les spectres de réponse élastique issus du microzonage sont caractérisés par :

- ✓ un paramètre de calage a_{gr} égale à 1.6 m/s², traduisant la composante locale liée aux sources sismiques à considérer,
- ✓ un type de site, correspondant à une forme spectrale, propre à chacune des configurations locales capables de modifier le mouvement vibratoire caractérisé par le paramètre de sol S,
- ✓ une catégorie d'importance de l'ouvrage caractérisé par un coefficient d'importance γ_I (les bâtiments sont classés en quatre catégories d'importance croissante de la catégorie I à faible enjeu (hangar agricole par exemple) à la catégorie IV regroupant les bâtiments nécessaire à la gestion de crise,
- ✓ des cœfficients caractéristiques de chaque zone (T_B, T_C, T_D, p).

Ils respectent le mode de représentation de l'action sismique défini dans l'article 3.2.2.2(1)P de l'Eurocode 8-1 (tableau 1).

Les spectres de réponse spécifiques sont représentés pour un ouvrage de catégorie d'importance II (γ_I =1) et un amortissement de 5%.

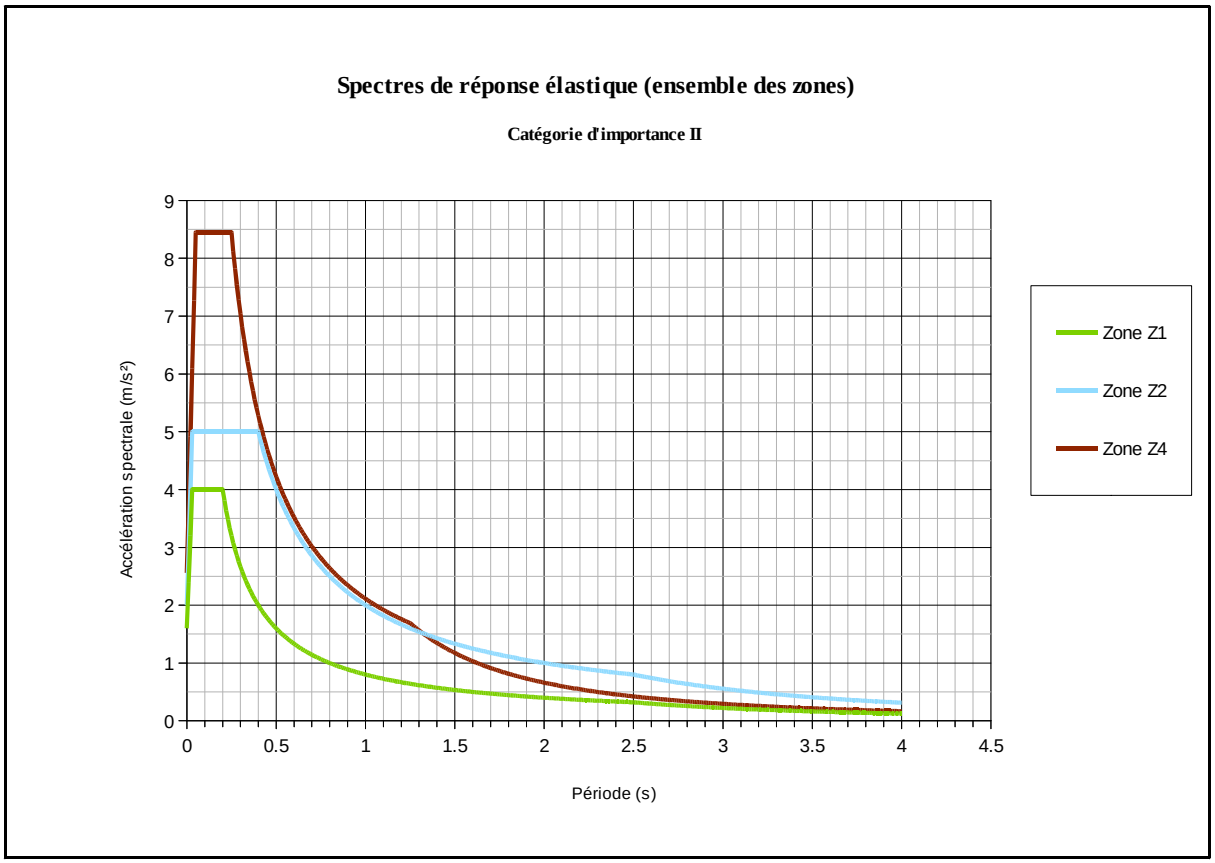
a_{gr} est l'accélération maximale de référence au niveau d'un sol de classe Z1 (sol de type rocheux, S=1) et γ_I le coefficient d'importance attribué au bâtiment en fonction de sa catégorie d'importance.
En effet, pour les bâtiments de catégorie d'importance I, III et IV (risque normal), il faut appliquer à ces spectres un coefficient multiplicatif γ_I donné par la réglementation en vigueur au moment du dépôt du permis de construire. La réglementation en vigueur le jour de l'approbation du présent Plan de prévention des Risques (PPR) fixe ces coefficients à 0,8 (catégorie I), 1,2 (catégorie III) et 1,4 (catégorie IV).

Pour l'application des règles parasismiques, l'ordonnée du spectre spécifique de chaque zone proposée dans le règlement du Plan de Prévention des Risques (PPR), devra être multipliée par le coefficient d'importance γ_I de l'ouvrage.

Le spectre de calcul pour l'analyse élastique (référence 3.2.2.5 NF EN 1998-1) est déduit à partir des valeurs des paramètres S, TB, TC et TD fixées dans le présent règlement. En cas de représentation temporelle de l'action sismique conformément à l'article 3.2.31 de NF EN 1998-1, les accélérogrammes employés doivent correspondre aux spectres de réponses élastiques définis dans le présent document.

Les valeurs de S, T_B, T_C et T_D sont indiquées dans les tableaux figurant sous les spectres de réponse élastique et les équations des branches des spectres applicables sur le territoire communal sont détaillées pour chaque zone lithologiquement homogène.

Spectres de réponse pour un ouvrage de catégorie d'importance II et un amortissement de 5%
Ensemble des zones
Commune de Grans



Zone	S	T_B	T_C	T_D	p	a_{gr} (m/s²)	APN[1] (m/s²)
Z1	1,0	0,03	0,2	2,5	2,5	1,6	1,6
Z2	1,25	0,03	0,4	2,5	2,5	1,6	2,0
Z4	1,6	0,05	0,25	1,25	3,3	1,6	2,56

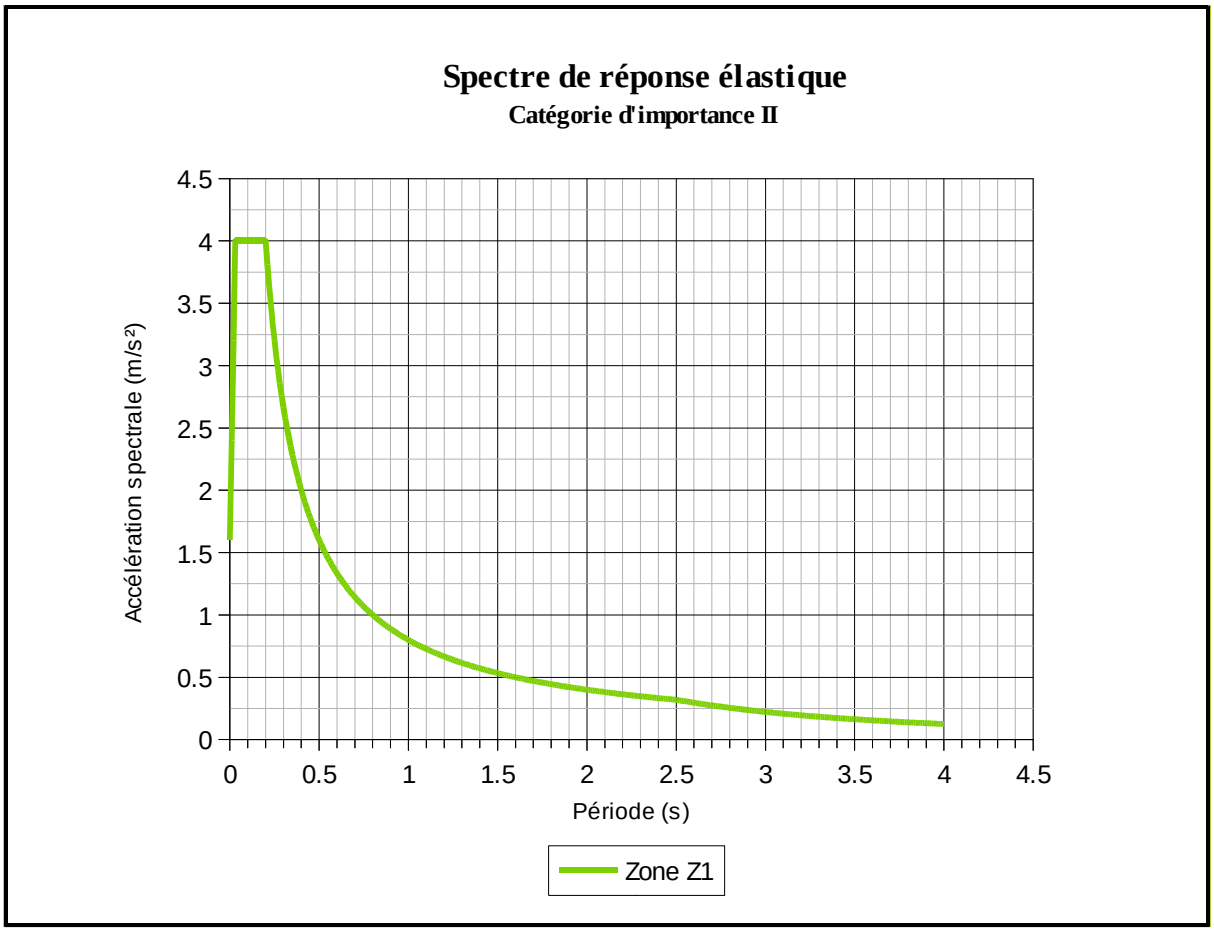
Tableau 2 : Paramètres des spectres de l'ensemble des zones présentes sur le territoire communal

NOTE - Pour l'application des règles parasismiques, l'ordonnée du spectre de chaque zone, doit être multipliée par le cœfficient d'importance γ_I de l'ouvrage.

[1] Accélération à période nulle (agr.S)

Spectre de réponse horizontal élastique
pour un ouvrage de catégorie d'importance II et un amortissement de 5%

Zone Z1 (zones rocheuses)



Zone	S	T_B	T_C	T_D	p	a_{gr} (m/s²)	APN[2] (m/s²)
Z1	1,0	0,03	0,2	2,5	2,5	1,6	1,6

Tableau 3 : Paramètres du spectre de la zone 1

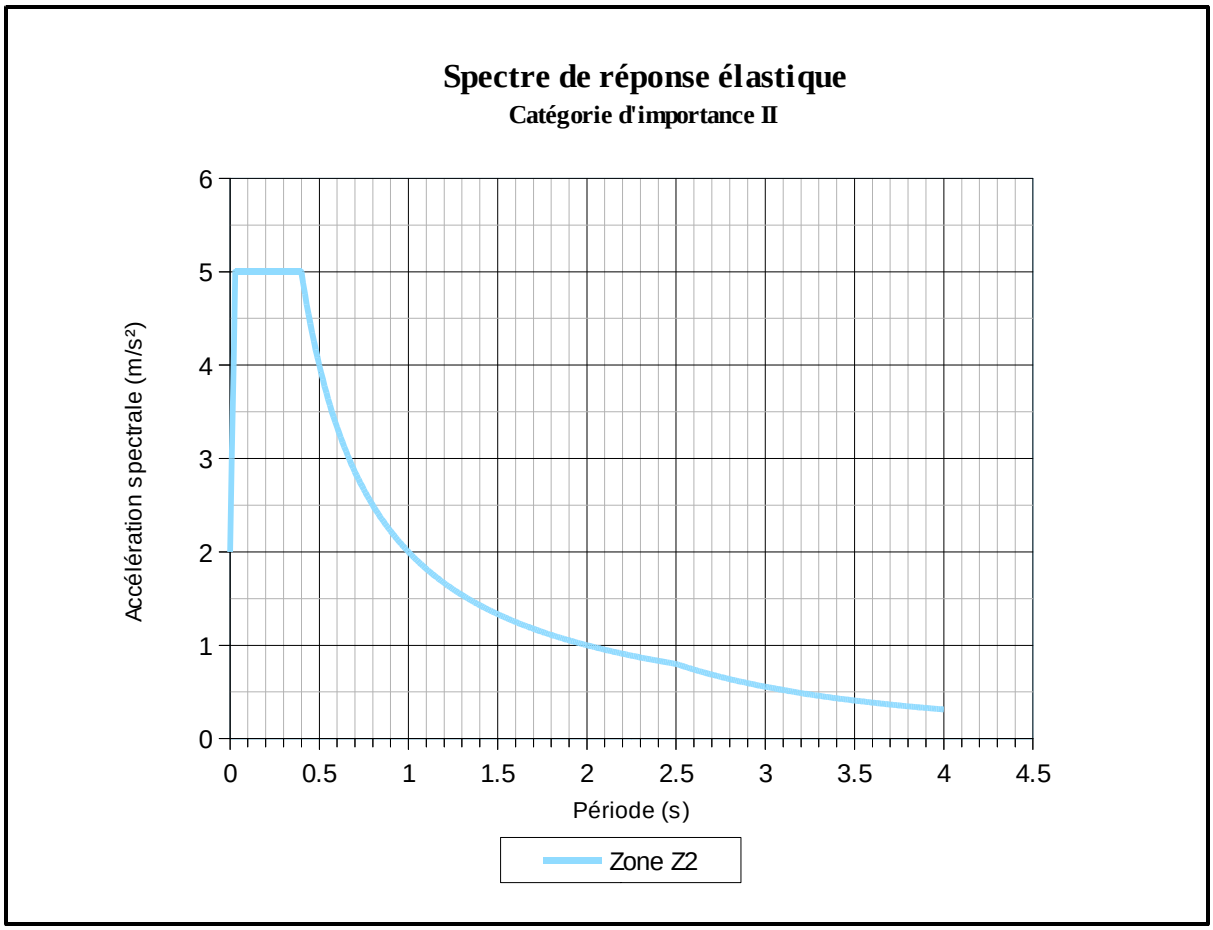
Zone 1				
Grans Zone de sismicité moyenne (a_{gr} = 1,6 m/s²)	Equation des branches des spectres de réponses élastiques (m/s²)			
	Catégorie d'importance I (m/s²)	Catégorie d'importance II (m/s²)	Catégorie d'importance III (m/s²)	Catégorie d'importance IV (m/s²)
Branche (0 à T_B) Plateau (T_B à T_C) Branche (T_C à T_D) Branche (T > T_D)	Se(T) = 1,28 + 64T Se(T) = 3,2 Se(T) = 0,64/T Se(T) = 1,6/T²	Se(T) = 1,6 + 80T Se(T) = 4 Se(T) = 0,8/T Se(T) = 2/T²	Se(T) = 1,92 + 96T Se(T) = 4.8 Se(T) = 0,96/T Se(T) = 2,4/T²	Se(T)= 2,24+ 112T Se(T) = 5,6 Se(T) = 1,12/T Se(T) = 2,8/T²

Tableau 4 : Equation des différentes branches pour la zone 1

[2] Accélération à période nulle (agr.S)

Spectre de réponse horizontal élastique
pour un ouvrage de catégorie d'importance II et un amortissement de 5%

Zone Z3 (Bassin Miocène et Eboulis)



Zone	S	T_B	T_C	T_D	p	a_{gr} (m/s²)	APN[3] (m/s²)
Z2	**1,25**	**0,03**	**0,4**	**2,5**	**2,5**	**1,6**	**2,0**

Tableau 5 : Paramètres du spectre de la zone 2

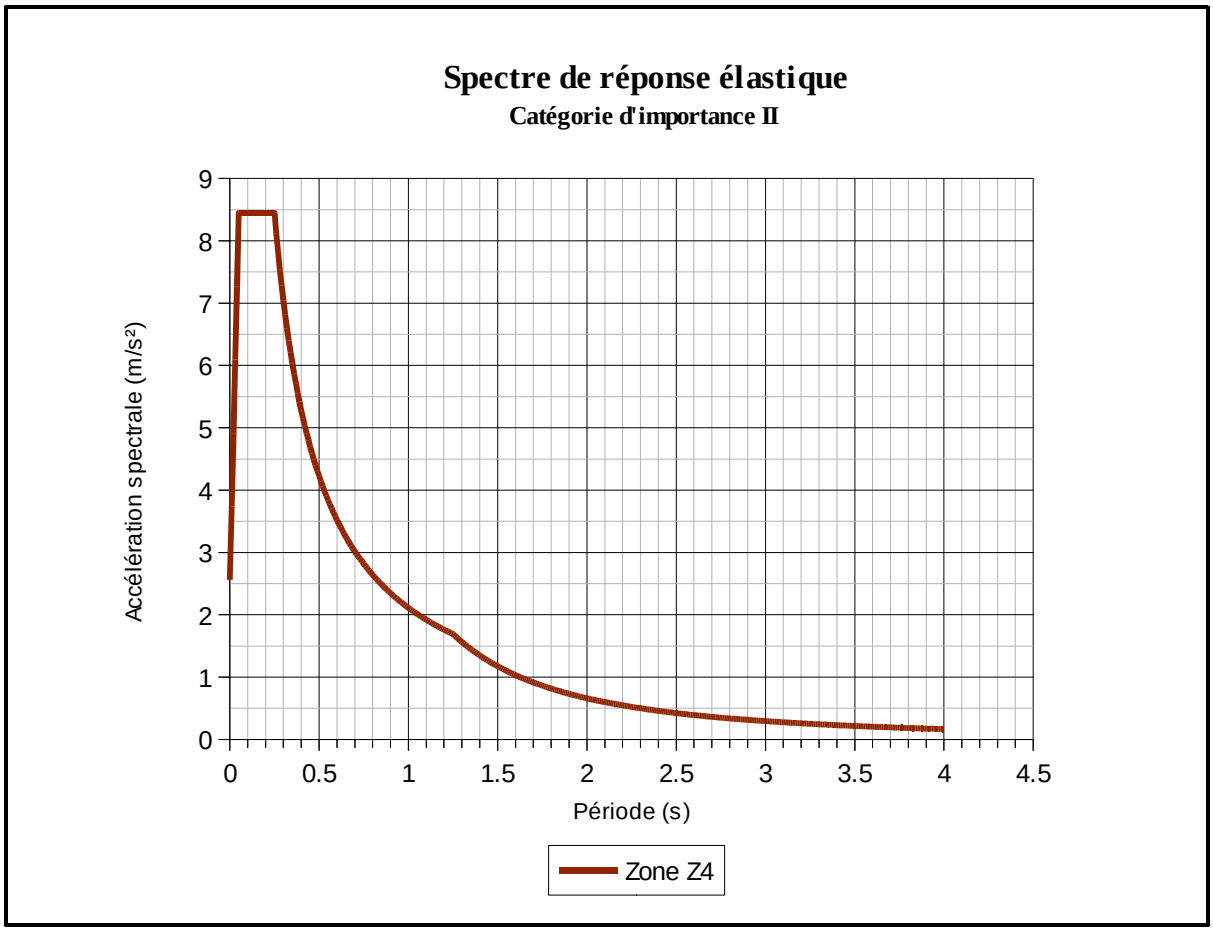
Zone 2				
Grans Zone de sismicité moyenne (a_{gr} = 1,6 m/s²)	Equation des branches des spectres de réponses élastiques (m/s²)			
	Catégorie d'importance I (m/s²)	Catégorie d'importance II (m/s²)	Catégorie d'importance III (m/s²)	Catégorie d'importance IV (m/s²)
Branche (0 à T_B) Plateau (T_B à T_C) Branche (T_C à T_D) Branche (T > T_D)	Se(T) = 1,6+ 80T Se(T) = 4 Se(T) = 1,6/T Se(T) = 4/T²	Se(T) = 2 + 100T Se(T) = 5 Se(T) = 2/T Se(T) = 5/T²	Se(T) = 2,4 + 120T Se(T) = 6 Se(T) = 2,4/T Se(T) = 6/T²	Se(T)= 2,8 + 140T Se(T) = 7 Se(T) = 2,8/T Se(T) = 7/T²

Tableau 6 : Equation des différentes branches pour la zone 2

[3] Accélération à période nulle (agr.S)

Spectre de réponse horizontal élastique
pour un ouvrage de catégorie d'importance II et un amortissement de 5%

Zone Z4 (Alluvions de la Touloubre)



Zone	S	T_B	T_C	T_D	p	a_{gr} (m/s²)	APN[4] (m/s²)
Z4	1,6	0,05	0,25	1,25	3,3	1,6	2,56

Tableau 7 : Paramètres du spectre de la zone 4

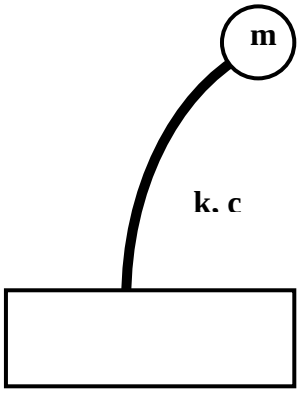
Zone 4				
Grans Zone de sismicité moyenne (a_{gr} = 1,6 m/s²)	Equation des branches des spectres de réponses élastiques (m/s²)			
	Catégorie d'importance I (m/s²)	Catégorie d'importance II (m/s²)	Catégorie d'importance III (m/s²)	Catégorie d'importance IV (m/s²)
Branche (0 à T_B) Plateau (T_B à T_C) Branche (T_C à T_D) Branche (T > T_D)	Se(T) = 2,05 + 94,21T Se(T) = 6,76 Se(T) = 1,69/T Se(T) = 2,12/T²	Se(T) = 2,56 + 117,76T Se(T) = 8,45 Se(T) = 2,12/T Se(T) = 2,64/T²	Se(T) = 3,08 + 141,32T Se(T) = 10,14 Se(T) = 2,54/T Se(T) = 3,17/T²	Se(T)= 3,59 + 164,87T Se(T) = 11,83 Se(T) = 2,96/T Se(T) = 3,70/T²

Tableau 8 : Equation des différentes branches pour la zone 4

[4] Accélération à période nulle (agr.S)

Méthode du spectre de réponse

Dans le cas le plus simple, le comportement d'un bâtiment sous sollicitation sismique est assimilable à celui d'un oscillateur harmonique caractérisé par sa masse m, sa constante de raideur ou rigidité k et une constante d'amortissement visqueux c.



Oscillateur à un degré de liberté[5]

L'équation du mouvement à laquelle obéit l'oscillateur est la deuxième équation de Newton (appelé également relation fondamentale de la dynamique) :

$$\sum F_{ext} = m\ddot{x}_a$$

Avec F_{ext} les forces extérieures agissant sur le corps
m la masse,
$\ddot{x}_a$ l'accélération absolue

soit $-c\ddot{x} - kx = m\ddot{x}_a$

avec $f = -c\ddot{x}$ force de frottement et $F = -kx$ force de réaction du ressort (ou de la structure) pour le cas d'un oscillateur simple linéaire.

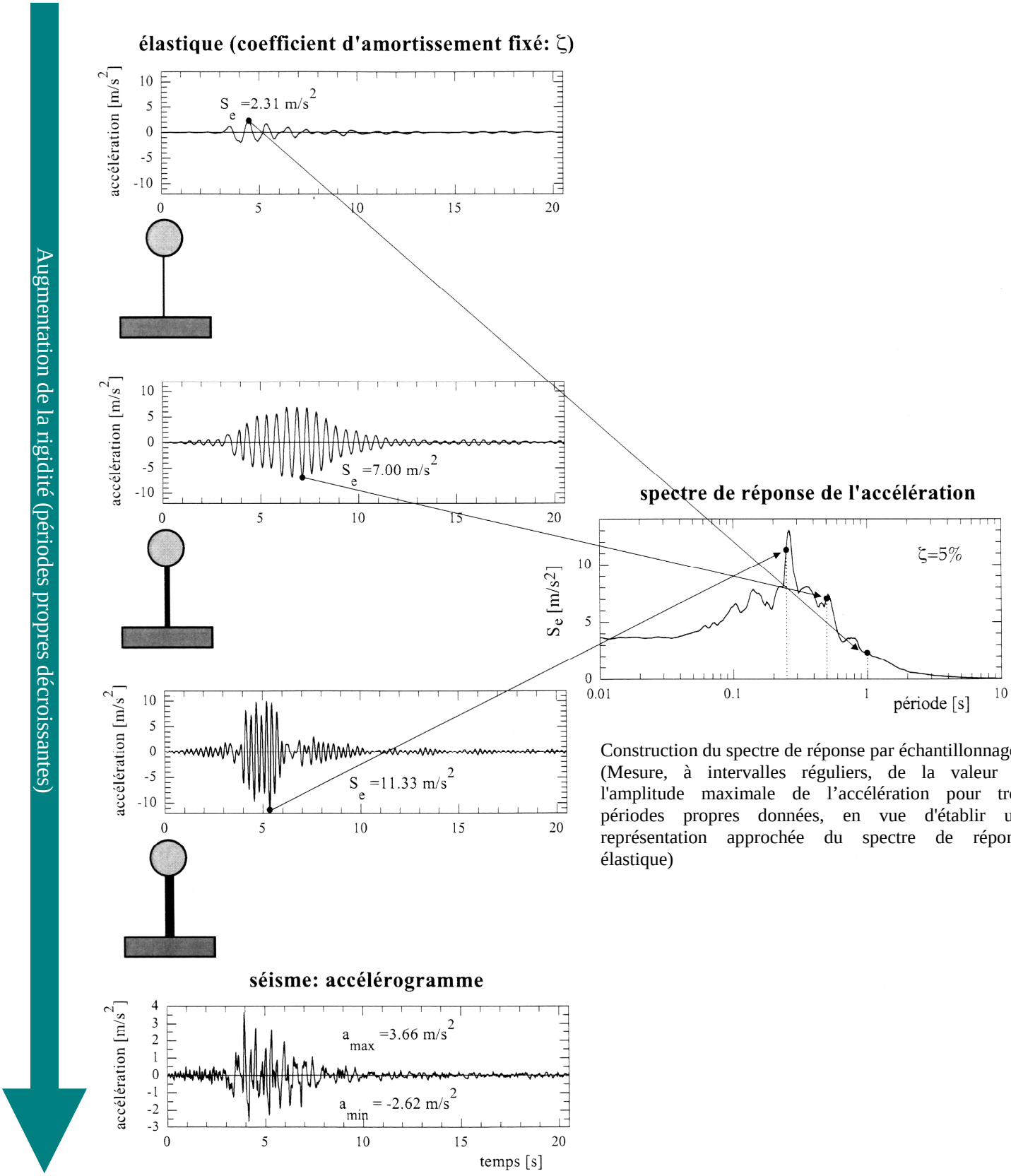
L'équation devient dans les cas de l'oscillateur harmonique :

$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g$ (1)

avec $x = x_a - x_g$ le déplacement relatif et x_g le déplacement du sol (sollicitation sismique).

[5] Une seule grandeur varie, la longueur pour un ressort (allongement), l'angle pour un pendule... le nombre de variables indépendantes qui permettent de décrire le système (ressort, pendule,…) est égale à 1 ici. On parle de *système à un degré de liberté*

Outil de l'ingénieur:

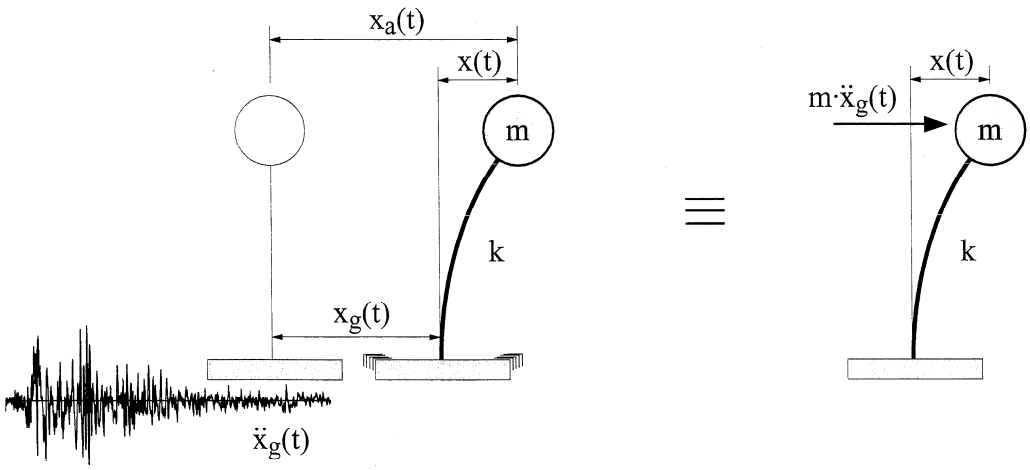


Construction du spectre de réponse par échantillonnage (Mesure, à intervalles réguliers, de la valeur de l'amplitude maximale de l'accélération pour trois périodes propres données, en vue d'établir une représentation approchée du spectre de réponse élastique)

Exemple de construction d'un spectre de réponse élastique
Calcul de la réponse en accélération de trois oscillateurs de période propre différente (équivalent à trois bâtiments « simple » de rigidité différente) pour un séisme donné (accélérogramme) et report des valeurs maximales estimées en vue d'établir le spectre de réponse.

Source Génie parasismique semestre d'été 2007 EPFL-ENAC-SGC. P. Lestuzzi

Equivalence pour la détermination des déplacements relatifs:



Source « Génie parasismique – Conception et dimensionnement des bâtiments » Auteurs : P. Lestuzzi et M.Badoux

<u>Construction du spectre de réponse</u> :

En résolvant l'équation (1) pour un accélérogramme de référence $\ddot{x}_g(t)$, la valeur du déplacement relatif $x(t)$ est établie à chaque instant.

$F(t) = -kx(t) = -m\omega^2 x(t) = -m\beta(t)$ avec la pulsation $\omega = (\frac{k}{m})^{1/2}$ par définition.

Le résultat $F(t) = -m\beta(t)$ est équivalent à l'équation d'un oscillateur harmonique soumis à une pseudo-accélération. La valeur maximale de $\beta(t)$ est alors reportée sur un diagramme $(\beta(T), T)$ avec $\beta(T) = \max \beta(t)$ pour une valeur de période propre T donnée[6] (soit une masse m et une rigidité k données). On fait varier la valeur propre de l'oscillateur[7] $T = \frac{2\pi}{\omega}$ et on obtient le spectre de réponse de l'accélération (diagramme $(\beta(T), T)$).

[6] La période propre T d'un oscillateur correspond à la période d'oscillation libre non amorti et est égale à $\frac{2\pi}{\omega}$.

[7] Cela revient à faire varier la masse m et la rigidité k et à résoudre l'équation (1) pour un nouveau couple (m, k) soit pour une nouvelle valeur de la période propre T.