

---

# Spectres de planchers et justification des équipements en zones sismiques, proposition d'une nouvelle formulation

**JUSTER-LERMITTE S.<sup>1\*</sup>, FOURNELY E.<sup>2,3\*</sup>**

<sup>1</sup> *ARCADIS, Direction technique, 9 av. Réaumur 92354 Plessis-Robinson, France  
(sandrine.juster@arcadis-fr.com)*

<sup>2</sup> *Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France  
(eric.fournely@univ-bpclermont.fr)*

<sup>3</sup> *CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France*

---

*RÉSUMÉ. La principale exigence des codes actuels pour la construction dans la situation sismique est la préservation des vies humaines. Cette exigence s'applique à la structure dans sa globalité, bien évidemment aux éléments structuraux, mais aussi aux éléments non-structuraux. Pour ces derniers, une analyse globale de la structure avec éléments structuraux et non structuraux est rarement possible, principalement en raison de la méconnaissance des caractéristiques des éléments non structuraux. Cependant, l'interaction entre ces deux parties existe et se retrouve aussi bien pour des bâtiments industriels que pour des bâtiments d'habitations ou de bureaux. Cette étude propose une formulation simplifiée de la force latérale appliquée à un élément non structural ou à un équipement. Dans le cas d'équipement fixé en un seul point, la problématique est de définir l'accélération subie par un élément intégré dans une structure soumise à un séisme. Cet élément est soumis à une accélération due à l'amplification entre le sol et l'étage ou est fixé l'équipement et à celle entre l'étage et l'équipement lui-même. La démarche proposée est appliquée à un exemple simple et comparée à des formulations d'autres codes et guides.*

*ABSTRACT. The main requirement of actual codes for building in seismic situation is the preservation of human lives, These requirements are obviously applied to structural elements, but also to non-structural ones. For these non-structural elements a global analysis with the whole structure with structural and non-structural elements is rarely possible, mainly due to the lack of knowledge of physical and mechanical characteristics fore non structural elements. Nevertheless, the interaction between these two parts exists; the objective of this paper is to propose a simplified formulation of the lateral force applied to the non structural element or equipment. The general methodology is presented at first with the domain of validity. Then this formulation is compared to an analytical study and finally, a comparison with French and foreign regulations is presented.*

*MOTS-CLÉS : séisme, éléments non structuraux, équipements, spectre de plancher, méthode simplifiée.*

*KEY WORDS: earthquake, non structural element, equipment, floor response spectra, simplified method.*

---

## 1. Introduction

Outre le non-effondrement de la structure et donc de ses éléments structuraux, la préservation des vies humaines pendant et après séisme nécessite de prendre en compte la résistance des éléments non structuraux et de leur fixations. Ces critères sur les éléments non structuraux et les équipements sont intégrés dans les codes parasismiques actuels [CEN 05], [AFN 95], [FEM 368]. Cependant, des écarts importants dans la prise en compte de cette exigence peuvent apparaître. Cette prise en compte traduit les interactions qui existent entre le sol, les éléments structuraux et les éléments non structuraux de la structure. Cette problématique concerne la majorité des constructions, que ce soit des bâtiments industriels avec leurs équipements ou des bâtiments d'habitation avec ses cloisons et d'une manière plus générale ses éléments non structuraux. Cette étude a pour objectif de proposer une formulation simplifiée de la force latérale appliquée à un élément non structural ou à un équipement. Par la suite, nous utiliserons pour tous ces éléments non structuraux ou équipements le terme générique "*éléments*".

Cette étude présente dans un premier temps quelques rappels sur les exigences de fixation d'un *élément*, leurs conditions d'applications et sur l'état de connaissance ou de manque de connaissance des paramètres nécessaires à ce type d'étude [FOU 14]. Dans un deuxième temps, la démarche générale d'une telle étude est décrite et justifiée. Cette démarche peut être conduite avec un comportement non linéaire de la structure [VUK 14] ou plus communément en considérant un comportement linéarisé de cette structure, c'est ce qui est considéré dans cette étude. Puis, cette démarche est appliquée à une structure à 3 niveaux avec un *élément* fixé en tête et comparée à des résultats analytiques. Enfin la formulation proposée est comparée aux propositions ou prescriptions de différents guides et règlements, en particulier avec la prescription de l'Eurocode 8 [CEN 05] qui est actuellement sujette à commentaires et critiques.

## 2. Contexte et objectifs

La problématique est de pouvoir définir l'accélération subie par un *élément* intégré dans une structure soumise à une action dynamique telle qu'un séisme. Cet *élément* est soumis à une accélération qui est due à deux phénomènes :

- $f_{onct_1}$ , amplification de l'accélération entre le sol et l'étage sur lequel est fixé l'*élément*,
- $f_{onct_2}$ , amplification de l'accélération entre l'étage et l'accélération perçue par l'*élément*.

Les combinaisons possibles de ces deux fonctions, ainsi que leurs paramètres sont nombreux ; il est nécessaire de se placer dans des cas spécifiques pour développer au mieux cette approche.

### 2.1. Domaine d'étude

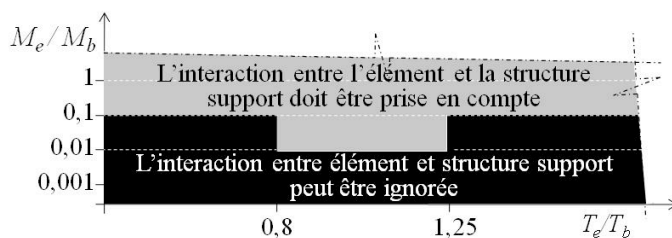
Nous nous plaçons dans le cas où l'*élément* est fixé à la structure en un seul point ou en plusieurs points suffisamment proches pour que leurs déplacements relatifs, dans le plan et hors plan de la surface d'attache, puissent être considérés nuls. La problématique de compatibilité de déformation de la structure avec celle de l'*élément* n'est pas à prendre en compte. Le problème se limite donc à la définition de l'accélération subie par un *élément*.

Dans le cas d'une approche par spectre de réponse, l'accélération spectrale à prendre en compte pour l'*élément*,  $S_a(T_e)$ , peut se mettre sous la forme du produit de ces deux fonctions sous la forme suivante :

$$- S_a(T_e) = f_{ct_1}(T_b, \zeta_b, \Phi_b, z/H) * f_{ct_2}(T_e, T_b, \zeta_e, \zeta_b) * a_g \quad (1)$$

Ces fonctions dépendent de huit paramètres principaux qui sont : la période fondamentale du bâtiment -  $T_b$ , la période de l'*élément* -  $T_e$ , le mode fondamental du bâtiment -  $\Phi_b$ , la hauteur du bâtiment où se situe l'*élément* -  $z$ , la hauteur totale du bâtiment -  $H$ , l'amortissement réduit du bâtiment -  $\zeta_b$  (valeur codifiée), l'amortissement réduit de l'*élément* -  $\zeta_e$  et l'accélération du sol -  $a_g$ .

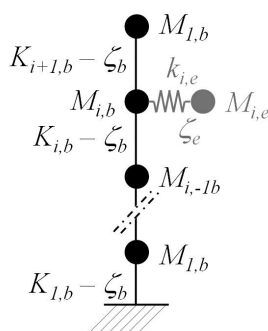
Les paramètres sont nombreux et il est difficile de connaître les caractéristiques des *éléments*, mais en classant les attaches par familles et en se plaçant sous certaines hypothèses (structures quasi monomodale, forme de déformée modale...), il est possible de simplifier ce problème d'interaction en s'appuyant par exemple sur une structure du type brochette multimodale complétée par des masses annexes fixées en des points singuliers de la brochette. Le choix d'un rapport de rigidité entre celle de la structure et celle du support de l'*élément* permet également de simplifier le problème [AFP 90]. La figure 1 rapporte succinctement la proposition des recommandations de l'AFPS [AFP 90].



**Figure 1.** Proposition de l'AFPS sur la nécessité ou non de prise en compte de l'interaction dynamique entre élément non structural et structure [AFP 90].

## 2.2. Méthodologie de la méthode proposée

Plaçons-nous donc dans le cas d'une structure brochette telle que schématisée en figure 2. Cette brochette présente à l'étage  $i$  une masse additionnelle  $M_{i,e}$  représentant la masse de l'élément. Cet élément est lié à l'étage  $i$  de la structure par un ressort de rigidité  $k_{i,e}$  et un amortisseur présentant un amortissement critique  $\zeta_{i,e}$ . La masse  $M_{i,e}$  est petite devant chacune des masses  $M_{i,b}$ .



**Figure 2.** Modèle brochette à plusieurs degrés de liberté avec éléments non structural localisé.

Dans le cas de structures représentées par des modèles brochettes, il est alors possible de mettre l'équation [1] sous la forme d'un produit de 6 fonctions  $\phi_i$  [AFP 11] :

$$S_d(T_e) = \text{Fonct}_1 * \text{Fonct}_2 * \text{Fonct}_3 * \text{Fonct}_4 * \text{Fonct}_5 * \text{Fonct}_6 \quad [2]$$

avec  $\text{Fonct}_1$ , la réponse dynamique de la structure,  
 $\text{Fonct}_2$ , l'emplacement de l'élément / structure,  
 $\text{Fonct}_3$ , l'interaction élément / structure,  
 $\text{Fonct}_4$ , le nombre de points d'accroche de l'élément (1 pour notre étude),  
 $\text{Fonct}_5$ , le facteur de résonance entre l'élément et la structure :  $\text{Fonct}_5(\zeta_e, \zeta_b)$ ,  
 $\text{Fonct}_6$ , le mode fondamental de l'élément.

Dans la suite de ce document, nous nous plaçons dans le cadre d'une structure avec un ou des élément(s) attaché(s) ponctuellement à cette structure avec les hypothèses suivantes :

- l'élément n'est pas fixé sur un plancher souple qui conduirait à une étude spécifique avec prise en compte des composantes verticales d'accélération ;
- l'élément est fixé sur un élément primaire ;
- la structure est supposée être régulière en élévation et pouvoir être correctement modélisée par un comportement monomodal avec une déformée de type  $\phi(z) = (z/H)^\alpha$  pour la composante horizontale, avec  $\alpha=1$  pour la méthode des forces latérales [CEN 05], ( $\phi(z) = 0$  pour la composante verticale) ;
- trois grands types d'éléments, peuvent être envisagés, nous ne retiendrons ici que le premier
  - éléments rigides, la réponse dépendra principalement des fixations,
  - éléments flexibles, besoin d'une modélisation à plusieurs degrés de liberté (tuyauteries, panneaux signalétiques...),
  - éléments suspendus : comportement de type pendule (éclairage...) ;
- la raideur de l'élément avec sa fixation est très faible par rapport à la raideur de la structure. De ce fait, il y a donc une forte probabilité que les fréquences propres de l'élément soient proches de celles de la structure (risque de résonance – la sollicitation sismique à prendre en compte peut être très grande) ;

- le coefficient d'amortissement de l'*élément* peut être faible ;
- les paramètres de l'*élément* et de la structure sont tels qu'on peut négliger l'effet de l'*élément* sur la vibration de la structure support, cf. figure 1.

Même si ces hypothèses peuvent paraître restrictives, elles correspondent à une grande majorité des cas rencontrés dans le domaine des bâtiments courants.

### 3. Démarche générale

#### 3.1. Spectre de réponse d'oscillateurs élastiques

L'équation du mouvement d'un oscillateur à un degré de liberté, soumis à une accélération à sa base s'écrit sous la forme de l'équation [3]. Suivant la nature de l'accélération à la base,  $\gamma(t)$  peut être exprimée de différentes façons (excitation harmonique, excitation aléatoire...). Pour un séisme donné,  $\gamma(t)$  est souvent disponible sous forme d'accélérogramme.

$$M\ddot{X}_r + C\dot{X}_r + KX_r = -M\gamma(t) \quad [3]$$

La projection sur la base modale permet de réécrire cette équation de sorte que la pseudo-accélération  $A_r$  prenant en compte tous les modes peut s'écrire sous la forme [4] [BET 03] :

$$A_r = \left[ \left( \sum_{i=1,N} \Gamma_i \phi_i S_a(T_i) \right)^2 + \bar{\gamma}^2 \left( 1 - \sum_{i=1,N} \Gamma_i \phi_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad [4]$$

avec  $\bar{\gamma}$ , la valeur du spectre à période nulle,

$\phi_i$ , le mode propre  $i$ ,

$\Gamma_i$ , le facteur de participation du mode  $i$ ,

$N$ , le nombre de modes à réponse dynamique de la structure.

Les modes à réponse rigide suivent sans déphasage l'accélérogramme appliqué au support et sont rassemblés sous le terme de pseudo-mode. Les  $N$  autres modes sont à réponse dynamique. Dans cette expression, le premier terme correspond à la recombinaison (par la méthode SRSS) des modes à réponse dynamique.

#### 3.2. cas particulier des structures quasi-modales

Dans le cas d'une structure de type monomodale, cette formule se simplifie et peut se mettre sous la forme [5] [AFP 11] :

$$A_r = \left[ (\Gamma_1 \phi_1 S_a(T_1))^2 + \bar{\gamma}^2 (1 - \Gamma_1 \phi_1)^2 \right]^{1/2} \quad [5]$$

En l'absence de spectres de planchers, nous proposons ci-après une formule simplifiée pour évaluer l'accélération à appliquer statiquement à la masse de l'*élément*. L'accélération forfaitaire proposée repose sur l'hypothèse d'un comportement monomodale du bâtiment et de l'*élément* et est calculée par la formule [6] :

$$a_H = \frac{A_r(T_b)}{q_b} \times \varphi \left( \frac{T_e}{T_b} \right) = \frac{A_r(T_b)}{q_b} \times K_T \quad [6]$$

avec  $a_H$ , l'accélération horizontale subie par l'*élément* implanté dans la structure ;

$A_r(T_b)$ , l'accélération absolue à la période  $T_b$  et pour l'amortissement  $\zeta_b$  du bâtiment. Cette accélération est fonction de la cote  $z$  du plancher et de la hauteur  $H$  du bâtiment ;

$q_b$ , le coefficient de comportement du bâtiment. La valeur de  $q_b$  sera prise égale à 1,5 sauf si une autre valeur peut être justifiée ;

$\varphi(T_e/T_b) \equiv K_T$ , la fonction définissant le coefficient d'amplification lié au rapport de la période propre de l'*élément*  $T_e$  à la période propre du bâtiment  $T_b$ . Le coefficient d'amplification est noté  $K_T$ . Il dépend notamment de l'amortissement de l'*élément*.

En supposant que la forme générale du mode fondamental du bâtiment s'écrit  $\phi=z/H$  (forme monomodale linéaire), le facteur de participation  $\Gamma$  est calculé par la formule [7] pour chaque mode:

$$\Gamma = \frac{\int_0^H \rho \Phi dz}{\int_0^H \rho \Phi^2 dz} = \frac{\rho \int_0^H \left( \frac{z}{H} \right) dz}{\rho \int_0^H \left( \frac{z}{H} \right)^2 dz} \frac{3}{2} \quad [7]$$

A partir de l'équation [4] l'accélération  $A_r(T_b)$  s'exprime sous la forme [8] et en développant cette expression, on obtient la relation [9].

$$A_r(T_b) = \left[ \Gamma^2 S_a^2(T_b) \left( \frac{z}{H} \right)^2 + a_g^2 \left[ 1 - \Gamma \left( \frac{z}{H} \right) \right]^2 \right]^{1/2} \quad [8] \quad A_r(T_b) = \sqrt{a_g^2 + \Gamma^2 S_a^2(T_b) \left( \frac{z}{H} \right)^2} \quad [9]$$

Si l'accélération spectrale n'est pas connue, et pour raisons conservatives, il est possible de retenir la valeur de l'accélération spectrale au plateau. Le coefficient d'amplification noté  $K_T$  est quant à lui donné par les formules suivantes [10] [BET 03] :

$$\frac{T_e}{T_b} < \frac{1}{2} \Rightarrow K_T = 1 \quad \frac{2}{3} \leq \frac{T_e}{T_b} \leq \frac{3}{2} \Rightarrow K_T = 5 \sqrt{\frac{50}{\zeta_b(\zeta_b + \zeta_e)}} \quad 2 \leq \frac{T_e}{T_b} \Rightarrow K_T = 1 \quad [10]$$

Les zones de transition du coefficient  $K_T$ , pour  $T_e/T_b$  comprises entre 1/2 et 2/3 et entre 3/2 et 2, se raccordent aux valeurs constantes de façon linéaire par rapport à  $\log T_e/T_b$ . Si le rapport  $T_e/T_b$  n'est pas connu, on prend  $K_T = 5$  (pour un amortissement de l'élément égal à 5%) [BET 03]. Dans le cas général et sans précision concernant l'élément ou la structure porteuse, en se basant sur la formule [9], on peut utiliser la formule [11] [BET 03] :

$$S_a(T_e) = fct_1(T_b, \zeta_b, \Phi_b, z/H) \cdot fct_2(T_e, T_b, \zeta_e, \zeta_b) \cdot a_g^2 [a_g^2 + 1,5^2 S_a^2(T_b)]^{0,5} \quad [11]$$

#### 4. Illustration et synthèse de la démarche

Afin d'illustrer la démarche proposée, nous l'appliquons ici à un bâtiment pouvant être modélisé par une brochette à 3 DDL. Envisageons pour ce bâtiment un élément fixé au sommet de l'ouvrage. Nous pouvons mener une analyse analytique du comportement dynamique de cet ouvrage. Nous considérons ici une même rigidité et une même masse pour chaque étage, ce qui valide l'hypothèse de régularité en élévation nécessaire pour justifier une approche quasi monomodale. Les éléments qui suivent rapportent les étapes intermédiaires de cette analyse.

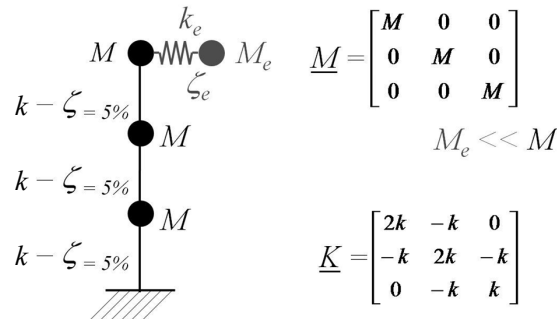


Figure 3. Exemple d'un bâtiment à 3 niveaux avec un élément en sommet d'ouvrage.

Les pulsations propres du système sont :  $\omega_1 = \sqrt{0,1981} \sqrt{k/M}$  ;  $\omega_2 = \sqrt{1,555} \sqrt{k/M}$  ;  $\omega_3 = \sqrt{3,247} \sqrt{k/M}$

Les modes propres de cet oscillateur sont :  $\phi_1 = \begin{bmatrix} 1,00 \\ 1,80 \\ 2,25 \end{bmatrix}$  ;  $\phi_2 = \begin{bmatrix} 1,00 \\ 0,45 \\ -0,81 \end{bmatrix}$  ;  $\phi_3 = \begin{bmatrix} 1,00 \\ -1,25 \\ 0,56 \end{bmatrix}$

On remarque que la première déformée modale est du type  $\phi(z) = (z/H)^\alpha$ , avec  $\alpha \in [0,55 ; 0,74]$ .

Pour notre système, le vecteur influence s'écrit  $\Delta = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ .

Les coefficients de masse partiels sont  $M_n = \Phi_n^T \cdot \underline{M} \cdot \Phi_n$ .  $M_1 = 9,3025M$  ;  $M_2 = 1,8586M$  ;  $M_3 = 2,8761M$

Les coefficients de participation sont définis par  $\Gamma_n = \frac{\Phi_n^T \underline{M} \Delta}{\Phi_n^T \underline{M} \Phi_n}$ .  $\Gamma_1 = 0,543$  ;  $\Gamma_2 = 0,344$  ;  $\Gamma_3 = 0,108$

En appliquant une combinaison SRSS, l'accélération par niveau est évaluée, pour un spectre uniforme de valeur  $S_a$  :

$$A_{r\_niveau\_1} = [0,54^2 S_a^2(T_1) + 0,35^2 S_a^2(T_2) + 0,11^2 S_a^2(T_3)]^{1/2} = 0,65 S_a$$

$$A_{r\_niveau\_2} = [0,97^2 S_a^2(T_1) + 0,16^2 S_a^2(T_2) + 0,13^2 S_a^2(T_3)]^{1/2} = 0,99 S_a$$

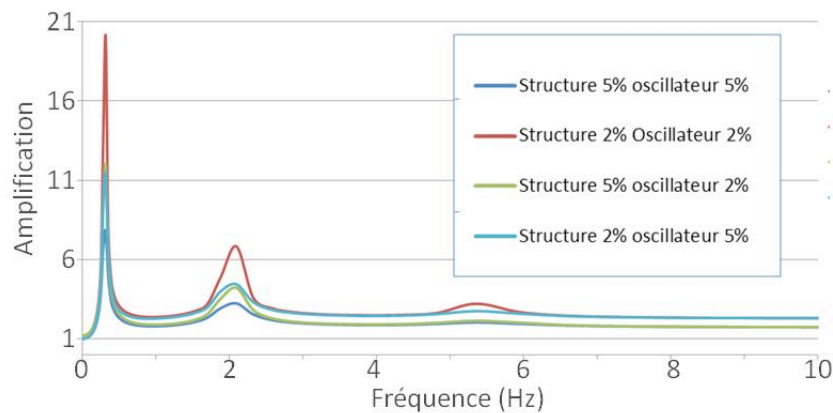
$$A_{r\_niveau\_3} = [1,22^2 S_a^2(T_1) + 0,28^2 S_a^2(T_2) + 0,06^2 S_a^2(T_3)]^{1/2} = 1,26 S_a$$

Ces résultats peuvent être comparés avec ceux de la formule [9] avec  $a_g = S_a$ , cf. tableau 1.

**Tableau 1.** Comparaison entre les résultats de la formule proposée et ceux d'un calcul 2D complet

Accélération au niveau	$A_r$ calcul complet 2D	$A_r$ : formule proposée fct <sub>1</sub> ( $S_a=2,5a_g$ )	Comparaison
1	0,65 $S_a$	0,64 $S_a$	98%
2	1,00 $S_a$	1,08 $S_a$	108%
3	1,26 $S_a$	1,55 $S_a$	123%

En prenant en compte une étude avec un *élément* en toiture du bâtiment, via le logiciel FSG [IGU 85], les amplifications des accélérations obtenues (par rapport au spectre de dimensionnement), avec un spectre unitaire à 1 g, sont présentées en figure 4. Le tableau 2 présente quant-à-lui les accélérations maximales subies par l'*élément* obtenues avec la méthode proposée, ainsi que la comparaison avec les maximums obtenus avec un modèle complet à 4 DDL.



**Figure 4.** Spectre de plancher généré à partir du logiciel FSG.

**Tableau 2.** Exemple d'accélération subies par l'*élément* pour un bâtiment régulier en élévation

	Formule proposée		Calcul 2D complet avec 4 masses		Surévaluation de la méthode simplifiée (%)	
	2%	5%	2%	5%	2%	5%
Amortissement de la structure	2%	5%	2%	5%	2%	5%
Amortissement de l' <i>élément</i> : 2%	22,53	17,03	20,02	11,4	12,56	49,43
Amortissement de l' <i>élément</i> : 5%	10,77	9,01	9,68	7,8	11,3	15,56

## 5. Comparaison avec d'autres formulations

Pour compléter l'illustration du potentiel de la méthode proposée, nous la confrontons ici à d'autres propositions réglementaires ou issues de guides. La comparaison porte ici sur la forme des expressions et sur les paramètres pris en compte.

### 5.1. Recommandations AFPS 90, §23

Les AFPS 90 proposent une formule avec un terme lié à l'amplification de l'accélération indexée sur l'étage considéré et un terme prenant en compte le ratio de période du bâtiment et de l'*élément* :

$$a_H = a_g \left( 1 + \frac{2}{q_b} \frac{z}{H} \right) K_T$$

avec  $a_g$ , l'accélération du sol ;  $q_b$ , le coefficient de comportement du bâtiment ;  $K_T$  le coefficient d'amplification fonction de  $(T_e/T_b)$ .

Les expressions du coefficient  $K_T$  sont définies sur les trois mêmes zones de  $T_e/T_b$  que celles de la méthode que nous proposons, avec également des transitions linéaires en échelle logarithmique. Cependant, la formule de  $K_T \neq 1$  est différente ( $K_T = 35/(2 + \zeta)$ ).

### 5.2. EC8 pour les éléments non structuraux §4

La formule 4.25 « éléments non structuraux » de la NF EN 19981-1 fait l'objet d'un certain nombre de critiques. Deux termes indépendants sont confondus (amplification induite par le bâtiment qui dépend du niveau de plancher, donc du coefficient ( $z/H$ ) et amplification due au rapport des périodes du bâtiment et de l'élément ( $T_e/T_b$ )). La comparaison de la formulation EC8 avec la méthode proposée et d'autres approches permet d'évaluer la pertinence ou non de cette formulation EC8. La formulation EC8 est la suivante :

$$a_H = S_a \gamma_a \frac{1}{q_a} \quad \text{avec} \quad S_a = \alpha S \cdot \left[ 3 \left( 1 + \frac{z}{H} \right) \right] / \left[ \left( 1 + \left( 1 - \frac{T_a}{T_1} \right)^2 \right) - 0,5 \right] \quad S_a > \alpha S$$

Les paramètres de  $a_H$  et  $S_a$  sont les suivants :  $\alpha$ , le rapport entre l'accélération de calcul au niveau d'un sol de classe A ;  $S$ , le paramètre su sol ;  $T_a$ , la période de l'élément ;  $T_1$ ,  $T_b$ , la période du bâtiment ;  $\gamma_a$ , le coefficient d'importance (comme  $I_p$  du FEMA 368 [FEM 368]) ;  $q_a$ , le coefficient de comportement de l'élément.

### 5.3. PS92 pour les éléments non structuraux § 7

La formulation pour les éléments non structuraux dans les PS 92 est proche de celle des AFPS90. Elle fait intervenir en plus un coefficient d'importance  $K_i$ . Le coefficient  $K_T$  est défini sur les mêmes zones  $T_e/T_b$  que celles définies précédemment avec les mêmes transitions, mais la valeur de  $K_T \neq 1$  est définie comme constante égale à 5.

$$a_H = a_N \left( 1 + \frac{2}{q_b} \frac{z}{H} \right) K_T K_i$$

### 5.4. FEMA 368 et commentaires du FEMA 369 [FEM 369] – NEHRP programm

La formulation FEMA est proche de celle des PS92 avec également un coefficient d'importance :

$$a_H = 0,4 S_{DS} \left( 1 + 2 \frac{z}{H} \right) a_p I_p \frac{1}{R_p} \quad 0,3 S_{DS} I_p < a_H < 1,6 S_{DS} I_p$$

Les paramètres de  $a_H$  sont les suivants :  $0,4 S_{DS} = a_N$ , l'accélération du sol ( $S_{DS} = 2,5 a_N$ ) ;  $a_p = K_T$ , un coefficient d'amplification fonction de ( $T_e/T_b$ ) ;  $I_p$ , un coefficient d'importance ;  $R_p = q_e$ , un coefficient de comportement de l'élément.  $K_T$  est défini sur 5 zones, 2 ou  $K_T = 1$ , 1 avec  $K_T = 2,5$  et 2 zones de transition avec interpolation linéaire en  $T_e/T_b$ . Les bornes de ces zones sont sensiblement les mêmes que les précédentes.

### 5.5. Récapitulatif

Le tableau 3 synthétise l'ensemble des formulations présentées : la formule proposée et les formulations présentées dans ce chapitre. On remarque que la formule proposée est cohérente par rapport aux approches proposées dans les autres codes sauf avec celle de l'EC8.

**Tableau 3.** Comparaison des différentes formulations et approches.

Paramètres	PS92	PS90	Proposition	FEMA	EC8
Accélération du sol	$a_N$	$a_N$	$a_g$	$0,4 S_{DS}$	$\alpha S$
$\varphi\left(\frac{z}{H}\right)$	$\left(1 + 2 \frac{z}{H}\right)$	$\left(1 + 2 \frac{z}{H}\right)$	$\sqrt{1 + 14 \left(\frac{z}{H}\right)^2}$	$\left(1 + 2 \frac{z}{H}\right)$	$3 \left(1 + \frac{z}{H}\right) / \left[ \left(1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2\right) \right] - 0,5$
$K_T$ ou $\varphi\left(\frac{T_e}{T_b}\right)$ $V_m$ : valeur d'amplification maximale	$K_T$ $V_m = 5$	$S_f = K_T$ $V_{m,5\%} = 5$ $V_{m,2\%} = 8,75$	$K_T$ $V_m = 5$	$a_p$ $V_m = 2,5$	
coef. d'importance	$K_i$	/	/	$I_p$	$\gamma_a$

coef.s de comportement	$q_b$ et $q_e$	$q_b$ et $q_e$	$q_b$ et $q_e$	$R_p = q_e$	$q_a = q_e$
------------------------	----------------	----------------	----------------	-------------	-------------

## 6. Conclusion

La méthode proposée dans cette étude pour des bâtiments réguliers en élévation a été comparée avec succès à une approche analytique complète. Cette méthode a été construite sur la base d'une approche par spectre de réponse linéaire ou linéarisée. Sa formulation s'inspire de celles présentes dans les principaux codes ou guides parasismiques actuels. Tout en restant facilement applicable, elle permet d'appréhender les phénomènes mécaniques mis en jeu. L'exemple traité montre que la formulation proposée permet d'obtenir des valeurs enveloppe de celles obtenues par des approches paramétriques plus précises et plus lourdes. La méthode proposée et la comparaison avec les formulations existantes montrent également que la formulation présente dans la version actuelle de l'Eurocode 8 n'est pas pertinente et mérite d'être révisée.

De manière synthétique, la méthode proposée peut se résumer à la succession des étapes suivantes :

- 1- Le bâtiment est considéré comme ayant un comportement monomodal. La forme de ce mode fondamental est du type :  $\varphi(z) = (z/H)$ .

$$A_r(T_b) = \sqrt{a_g^2 + \Gamma^2 S_a^2(T_b) \left(\frac{z}{H}\right)^2} = K_H a_g \quad \text{avec} \quad \Gamma = \frac{3}{2} \quad \text{et} \quad K_H = \sqrt{1 + \Gamma^2 \frac{S_a^2(T_b)}{a_g^2} \left(\frac{z}{H}\right)^2}$$

- 2- L'élément est considéré fixé en un seul point, ou en des points suffisamment rapprochés pour être considéré comme tel, à la cote  $z$  au bâtiment.
- 3- La structure et l'élément répondent indépendamment. L'effort de dimensionnement de l'élément est le suivant :

$$F_H = \frac{K_H K_T}{q_b} a_g W_e \quad \text{avec} \quad W_e, \text{ le poids de l'élément} \quad \text{et} \quad K_H = \sqrt{1 + \Gamma^2 \frac{S_a^2(T_b)}{a_g^2} \left(\frac{z}{H}\right)^2} \leq \sqrt{1 + 14 \left(\frac{z}{H}\right)^2}$$

$$K_T = 1 \text{ si } T_e/T_b \leq 1/2 \text{ ou } T_e/T_b \geq 2 \quad \text{et} \quad K_T = 5 \sqrt{\frac{50}{\xi_b(\xi_b + \xi_e)}} \text{ si } 2/3 \leq T_e/T_b \leq 3/2$$

## 7. Bibliographie

- [AFN 95] AFNOR, « NF P06-013 Règles de construction parasismique - Règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS 92 », 198 pages, décembre 1995.
- [AFP 11] AFPS, « Guide méthodologique pour la conception, l'installation et le diagnostic des équipements en zone sismique », cahier technique AFPS n°30, 2011.
- [AFP 90] AFPS, Recommandations AFPS 90 - Tome 1, pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes, 183 pages, Presses des Ponts et Chaussées, janvier 1993
- [BET 03] Betbeder-Matibet J., Génie parasismique – volume 3 Prévention parasismique, 396 pages, édition Hermes-Lavoisier, 2003
- [CEN 05] CEN250-TC8 « NF EN 1998-1 Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments », 186 pages, septembre 2005.
- [FEM 368] BSSC, NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions (FEMA 368), Building Seismic safety Council, Edition 2000.
- [FEM 369] BSSC, NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 2: Commentary (FEMA 369), Building Seismic safety Council, Edition 2000.



- [FOU 14] Fournely E., Bressolette Ph., « Anchorage of structural or non structural components for usual buildings in seismic area», Second european conference on earthquake engineering and seismology, Seismic Analysis and/or Testing of Structural Elements and/or Systems, Istanbul 2014, 8 pages
- [IGU 85] Igusa T., and Der Kiureghian A., « Floor Spectrum Generator, User's Manual », 1985
- [VUK 14] Vukobratović V., Fajfar P., « A method for the direct determination of approximate floor response spectra for SDOF, inelastic structures », Bulletin of Earthquake Engineering, August 2014