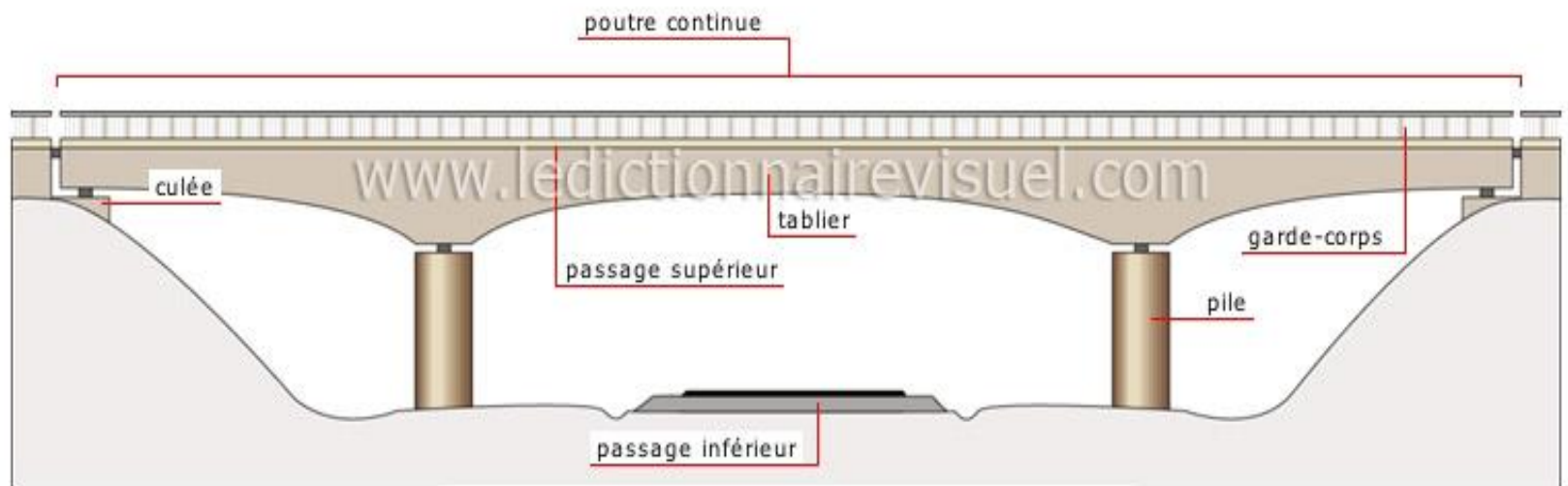


Calcul Sismique des Ponts





INTRODUCTION

Lors d'un séisme les fondations d'un pont vont subir une succession de déplacements rapides de translation dans les trois directions x , y et z . Dans le cas où le pont est assez long ou si les caractéristiques géotechniques du terrain sont très variables d'un point à un autre, on doit tenir compte du déplacement différentiel dans les trois directions au droit des piles et culées.

I. CLASSIFICATION

I-I Classification des ponts

Les ponts sont classés en trois groupes :

Groupe I : Ponts stratégiques

Ils doivent rester circulables après avoir subi l'action sismique.
Ils comportent :

- les ponts dont l'utilisation est primordiale pour la sécurité civile et de la défense nationale ;
- les ponts supportant des pistes de desserte pour avions appartenant à des aérodomes ;
- les ponts sur itinéraires d'acheminement des secours et de desserte des installations d'importance vitale (Groupe IA du RPA 99/2003) ;
- les ponts ferroviaires.

Groupe 2 : Ponts importants

Ils franchissent ou portent au moins une des voies terrestres ci après:

- autoroutes, routes express et voies a grande circulation;
- liaisons assurant la continuité du réseau autoroutier ;
- grandes liaisons d'aménagement du territoire ;
- les ponts situés dans les emprises des ports commerciaux maritimes ;
- les ponts sur un itinéraire de desserte des installations de grande importance (Groupe IB du RPA 99/2003).

Groupe 3 : Ponts d'importance moyenne

Les ponts qui ne sont ranges ni en groupe I ni en groupe 2.

I-2 Classification des zones sismiques

Le territoire national est divisé en cinq (5) zones de sismicité croissante :

Zone 0 : négligeable

Zone I : faible

Zone IIa : moyenne

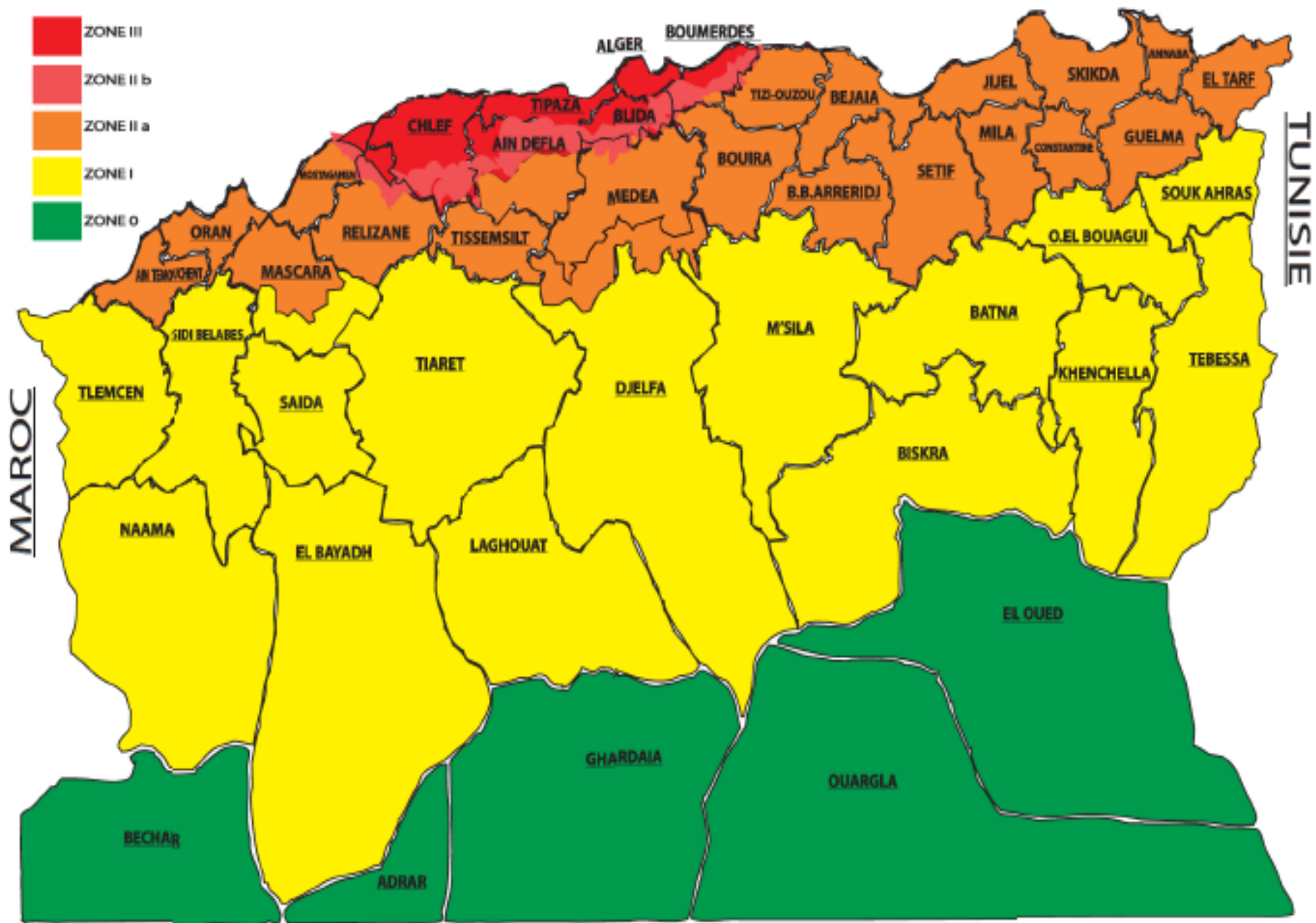
Zone IIb : élevée

Zone III : très élevée

La figure I représente la carte des zones sismiques de l'Algérie. L'annexe B du RPOA 2008 précise cette classification par Wilaya et par Commune.

Remarque : Tout pont qui a des fondations dans deux zones de sismicité différentes est considéré comme étant situé tout entier dans la zone de sismicité supérieure

Fig. 1 Carte de zonage sismique de l'Algérie



I-3 Classification des sites

Les sites sont classés en quatre (04) catégories en fonction des propriétés mécaniques des couches de sols qui les constituent.

Catégorie S1 : (site rocheux)

Rocher sain ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse d'onde de cisaillement $V_s \geq 800$ m/s

Catégorie S2 : (site ferme)

Dépôts de sables et graviers denses à très denses, marnes ou argiles raides très surconsolidées sur 10 à 20m d'épaisseur avec $V_s \geq 400$ m/s à partir de 10m de profondeur.

Catégorie S3 : (site meuble)

Dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec $V_s \geq 200$ m/s à partir de 20m de profondeur.

Catégorie S4 : (site très meuble)

Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle pour $V_s < 200\text{m/s}$ dans les 20 premiers mètres.

Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec $V_s < 200\text{m/s}$ dans les 20 premiers mètres.

2.ACTIONS SISMIQUES

2-1 Coefficient d'accélération de zone "A"

Il représente le rapport entre l'accélération horizontale $\ddot{x}_s$ du sol et l'accélération terrestre g ($g=9.81\text{ m/s}^2$),

$$A = \frac{\ddot{x}_s}{g}$$

A est représenté dans le tableau I en fonction de l'importance du pont et de la zone sismique.

Tab.I Coefficient d'accélération de zone A

Groupe de pont	Zone sismique			
	I	Ila	Ilb	III
1	0.15	0.25	0.30	0.40
2	0.12	0.20	0.25	0.30
3	0.10	0.15	0.20	0.25

2-2 Spectre de réponse

La réponse sismique au niveau de la structure du pont est amplifiée selon la nature du sol sous-jacent, du taux d'amortissement critique du pont, et de ses périodes propres qui sont à leur tour liées aux matrices de masse et rigidité de sa structure. Cette amplification sismique est donnée par les spectres de réponse élastiques et de dimensionnement.

2-2-1 Spectre de réponse élastique

a- Composante horizontale

L'accélération élastique horizontale (S_{ae}) représentée dans la figure 2 est exprimée en fonction de la période élastique (T) et du taux d'amortissement (ξ) de l'ouvrage par

$$S_{ae}(T, \xi)_{(m/s^2)} = \begin{cases} AgS(1 + \frac{T}{T_1}(2.5\eta - 1)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta AgS & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta AgS \left(\frac{T_2}{T} \right) & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta AgS \left(\frac{3T_2}{T^2} \right) & T \geq 3.0s \end{cases}$$

g : accélération de la pesanteur ($g=9,81 m/s^2$),

T_1, T_2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site.

S : coefficient de site (tableau 2),

η : facteur de correction de l'amortissement $\eta = \sqrt{\frac{7}{(2+\xi)}}$

ξ : taux d'amortissement (tableau 3) du matériau constituant les appuis du pont (piles, culées, appareils d'appui, bloqueurs sismiques, etc.) et non pas celui du tablier.

Tab.2 Valeurs de T_1, T_2 et S pour la composante horizontale

Site	S1	S2	S3	S4
T_1	0,15	0,15	0,20	0,20
T_2	0,30	0,40	0,50	0,70
S	1	1,1	1,2	1,3

Tab.3 Valeurs du taux d'amortissement (ξ)

Matériau	Acier soudé	Acier boulonné	Béton précontraint	Béton non armé	Béton armé	Elastomère fretté
ξ (%)	2	4	2	3	5	7

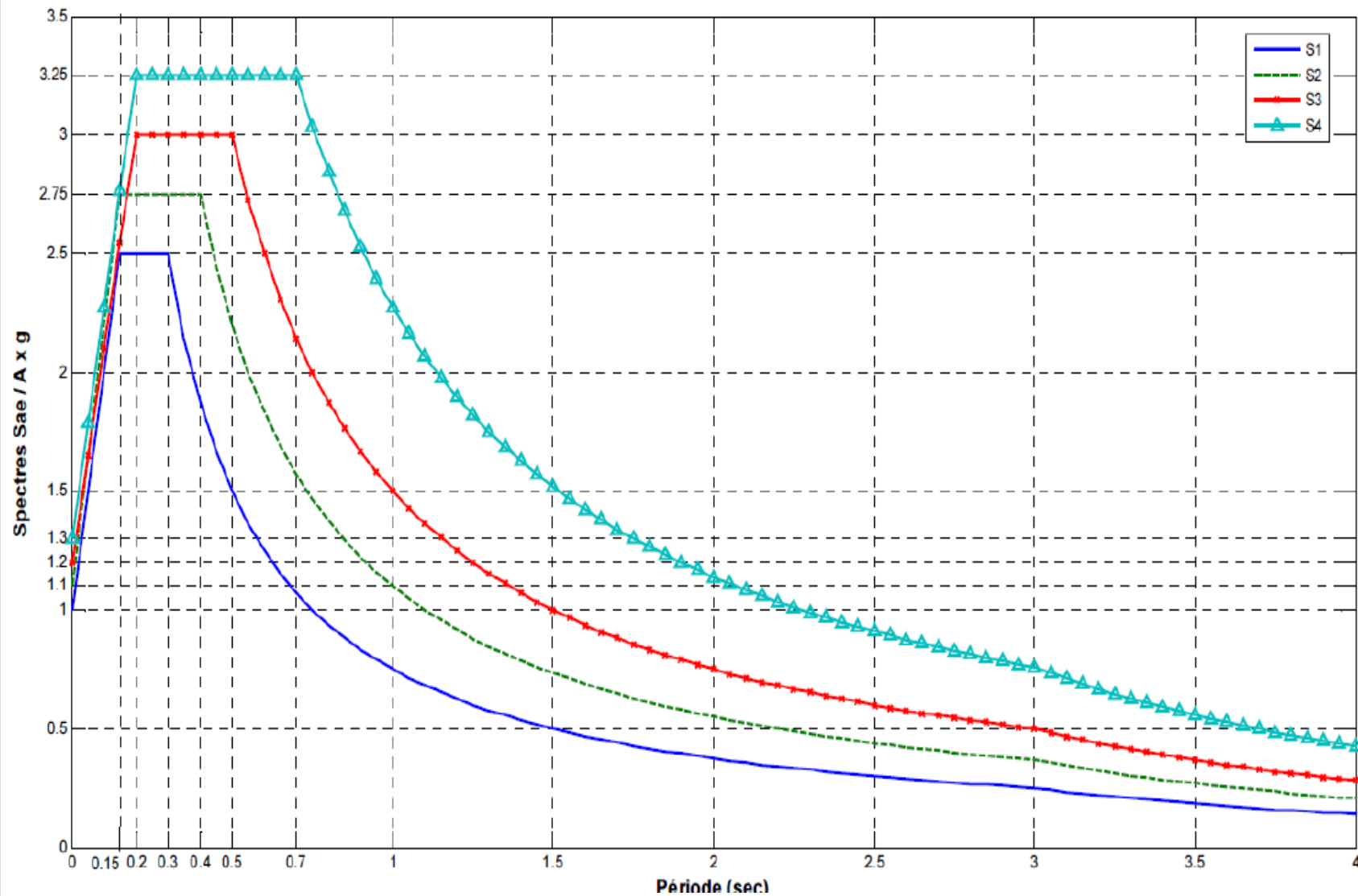


Fig. 2 Spectre de réponse élastique, composante horizontale de l'accélération, $\xi = 5\%$

b- Composante verticale

L'accélération élastique verticale (S_{ae}^v) (figure 3) est exprimée en fonction de la période élastique (T) et du taux d'amortissement (ξ) de l'ouvrage par

$$S_{ae}^v(T) \text{ (m/s}^2\text{)} = \begin{cases} \alpha A g \left(1 + \frac{T}{T_1} (2.5\eta - 1) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\alpha A g \eta & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\alpha A g \eta \left(\frac{T_2}{T} \right) & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\alpha A g \eta \left(\frac{3T_2}{T^2} \right) & T \geq 3.0s \end{cases}$$

T_1, T_2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site données dans le tableau 4.

α : coefficient qui tient compte de l'importance de la composante verticale (tableau 5),

Le coefficient S de site, dans le cas de la composante verticale, est pris égal à 1.

Tab.4 Valeurs de T_1 , T_2 pour la composante verticale

Site	S1	S2	S3	S4
T_1	0,15	0,15	0,20	0,20
T_2	0,30	0,40	0,40	0,40

Tab.5 Valeurs de α

Zone sismique	I	IIa	IIb	III
α	0.7	0.7	0.7	1.0

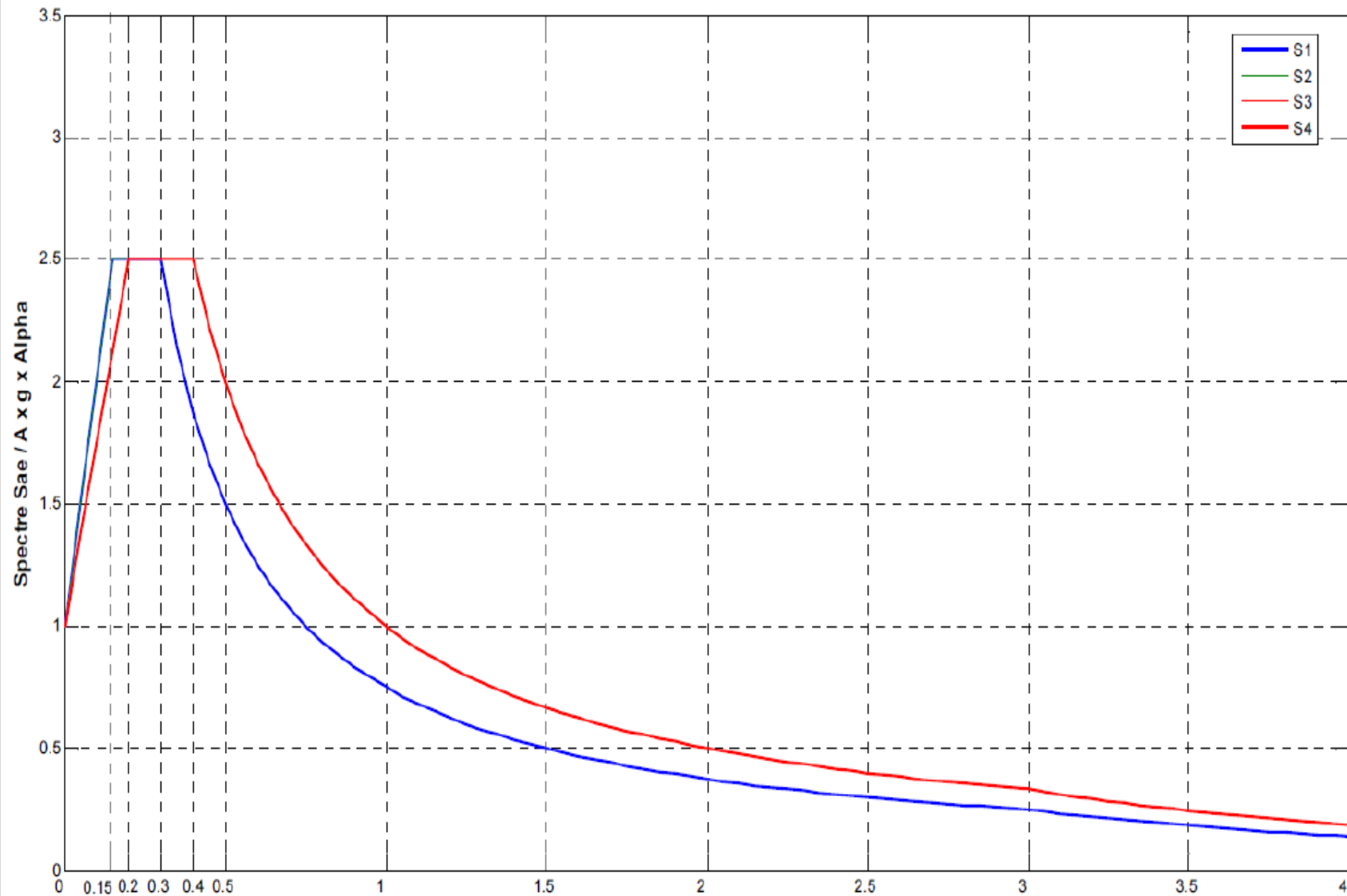


Fig. 3 Spectre de réponse élastique, composante verticale de l'accélération, $\xi = 5\%$

2-2-2 Spectre de dimensionnement

Utilisé pour le calcul de résistance des appuis du pont vis-à-vis de la composante horizontale du séisme (figure 4), ce spectre tient en compte le comportement post-élastique de ces appuis en tenant compte du coefficient de comportement ($q > 1$). Le spectre de dimensionnement de l'accélération horizontale est exprimé par :

$$S_{ad}(T, \xi) = \begin{cases} 2.5\eta Ag S & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta Ag S \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta Ag S \left(\frac{T_2}{3.0} \right)^{2/3} \left(\frac{3.0}{T} \right)^{5/3} & T \geq 3.0s \end{cases}$$

T_2 : période caractéristique associée à la catégorie de site,
 S : coefficient de site donné dans le tableau 2.

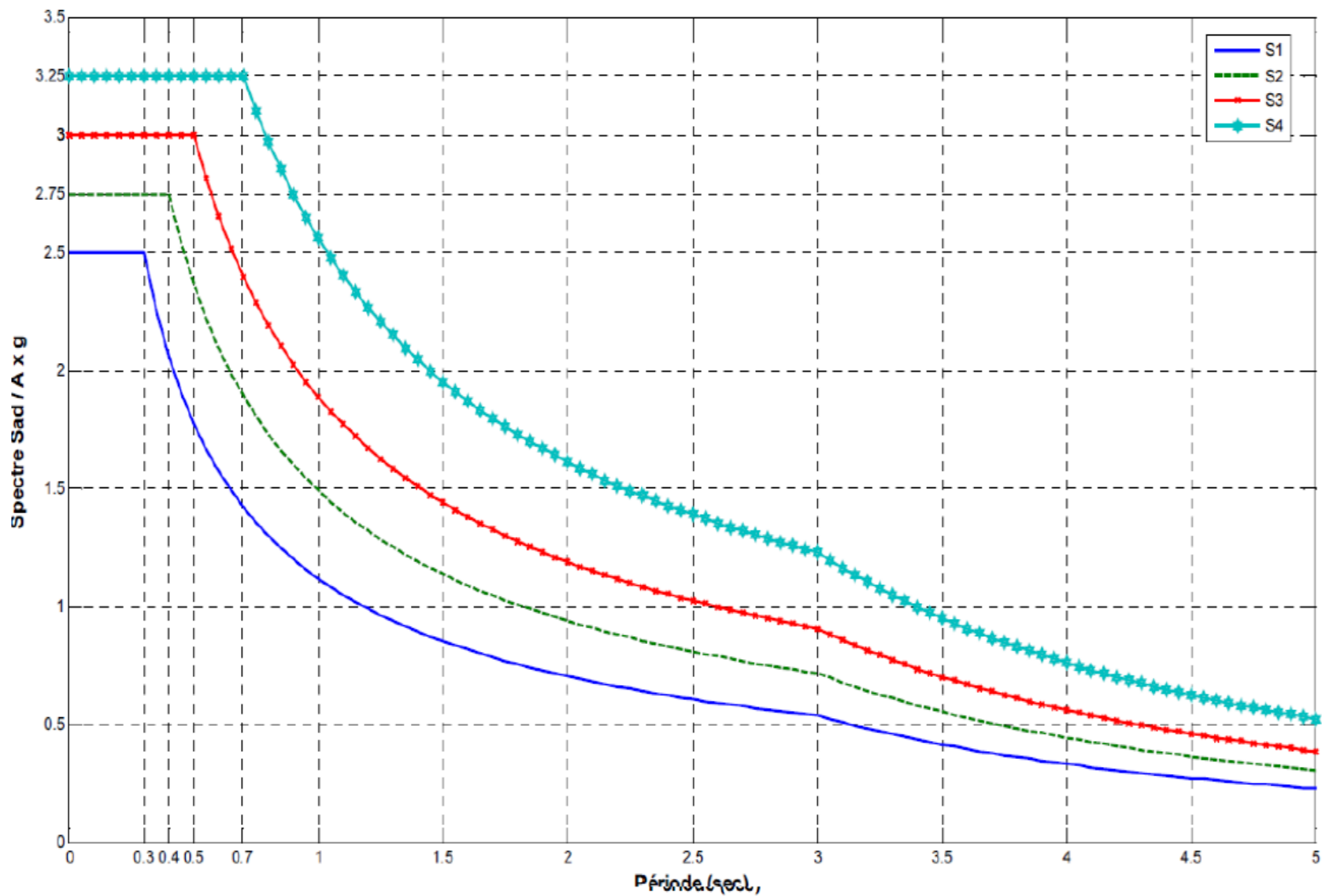


Fig. 4 Spectre de dimensionnement, composante horizontale de l'accélération,, $\xi = 5\%$

3 ANALYSE

Pour analyser le comportement dynamique de l'ouvrage, il faut définir sa masse, sa raideur, et son amortissement. On pourra considérer que la masse de l'ouvrage est concentrée dans le tablier, elle se calcule en tenant compte des valeurs moyennes des charges permanentes du pont.

Pour les ponts supportant un trafic intense, on peut considérer une part des charges d'exploitation :

- 20% des charges d'exploitations routières pour ponts routiers urbains,
- 30% des charges d'exploitations ferroviaires,
- 0% pour les autres cas.



De manière générale, l'analyse d'un pont se fait par la méthode spectrale monomodale (mode fondamental) ou par la méthode du spectre de réponse (analyse dynamique linéaire).

Il existe d'autres méthodes (spectre de puissance, analyse temporelle linéaire ou non linéaire) qui peuvent être utilisées pour des ouvrages non courants.

3-1 Analyse spectrale monomodale

Cette méthode utilise le mode fondamental de vibration selon les trois directions x , y et z . Dans chacune des directions, il y a lieu de considérer le mode fondamental sur lequel on reporte la totalité de la masse vibrante.

La méthode spectrale monomodale ne s'applique pas aux ponts spéciaux : arcs, ponts à béquilles, ponts à câbles (de suspension ou de haubanage), ponts cantilever.



Elle s'applique aux ponts remplissant les critères suivants simultanément :

- la masse modale du mode fondamental doit être supérieure à 70% de la masse totale de la structure, y compris la masse des appuis en élévation (fut et chevêtre),
- le biais géométrique est supérieur à 70 grades,
- l'angle balayé d'un pont courbe en plan est inférieur à 30 grades,
- la symétrie transversale c'est à dire la distance entre le centre de masse du tablier et le centre élastique des appuis transversaux n'excède pas 5% de la distance entre appuis extrêmes pour l'étude du séisme transversal.

3-1-1 Séisme longitudinal

$$K = \sum K_i$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

$$F = MS_a(T)$$

Déplacement longitudinal du tablier : $d = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \cdot S_a(T)$

Force en tête de chaque appui : $F_i = \frac{K_i}{K} F$

3-1-2 Séisme transversal

a- Tablier rigide : ($\frac{L}{B} \leq 5$) même procédure que le séisme longitudinal

L : est la longueur totale du tablier continu ;

B : est la largeur du tablier ;

b- Tablier flexible : ($\frac{L}{B} > 5$)

Méthode de Rayleigh utilisant un système généralisé à un seul

degré de liberté :
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m_i \mu_i^2}{\sum f_i \mu_i}}$$

m_i : est la masse concentrée au i-ème point nodal ;

μ_i : est le déplacement dans la direction étudiée, lorsque la structure est soumise aux forces ; $f_i = m_i g$ agissant à tous les points nodaux dans la même direction.

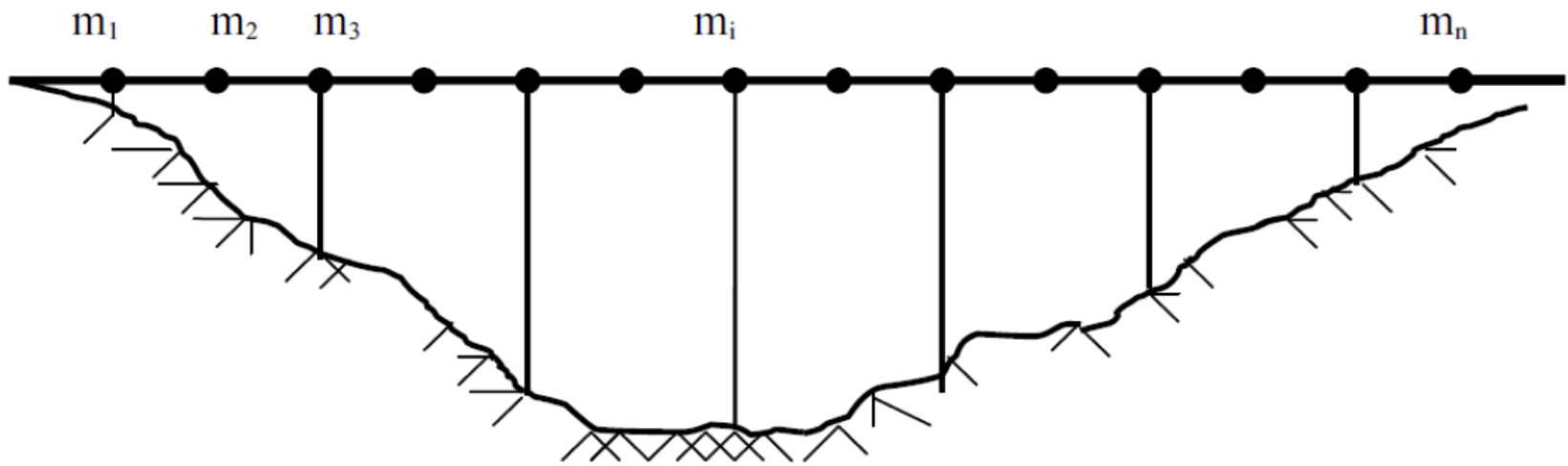


Fig. 5 Séisme transversal

$$F_i = \frac{4\pi^2}{T^2} \frac{S_a(T)}{g} \cdot \mu_i \cdot m_i$$

3-1-2 Séisme longitudinal

Le tablier est flexible quand il oscille dans le plan vertical. On peut donc utiliser l'une des deux méthodes :

- la méthode monomodale de Rayleigh, avec des forces dynamiques appliquées aux masses m_i

$$F_i = \frac{4\pi^2}{T^2} \frac{S^v_{ae}(T)}{g} \cdot v_i m_i$$

- la méthode multimodale (plusieurs modes de vibrations).

3.2 Analyses multimodales

- Lorsque les ouvrages ne répondent pas aux critères de régularité pour l'emploi de la méthode monomodale, ils peuvent être étudiés avec la méthode multimodale.
- Ces méthodes multimodales consistent à calculer et à combiner quadratiquement, direction par direction, les contributions des différents modes de vibration de la structure.
- Les sollicitations obtenues dans une direction donnée (efforts, déplacements contraintes...) résultent alors de la combinaison quadratique des contributions de chacun des modes.

➤ Elle ne s'applique qu'aux ponts qui satisfont aux critères suivants :

- La masse mise en mouvement est supérieure à 90% de la masse totale de la structure (masse du tablier et masse des appuis en élévation).

- La masse totale mise en mouvement est supérieure à 70 % de la masse totale de la structure et les valeurs finales des effets de l'action sismique sont multipliées par $\frac{M}{(SM_i)_c}$

3.2.1 Combinaison des réponses modales

Dans une direction donnée, les sollicitations, E_i , issues de chacun des modes i (efforts, déplacements, contraintes...) sont alors combinées quadratiquement par la méthode SRSS (racine carrée de la somme des carrés).

$$E = \sqrt{\sum E_i^2}$$

Si deux modes ont des périodes naturelles voisines la méthode SRSS n'est pas sécuritaire.

Deux périodes T_i, T_j sont considérées comme voisines si:

$$\frac{0.1}{0.1 + \sqrt{\xi_i \xi_j}} \leq \rho_{ij} = \frac{T_i}{T_j} \leq 1 + 10\sqrt{\xi_i \xi_j}$$

ξ_i et ξ_j sont les amortissements de chacun des modes i et j .

Dans ce cas on applique la méthode de Combinaison Quadratique Complète (CQC) :

$$E = \sqrt{\sum_i \sum_j E_i r_{ij} E_j}$$

Avec: $i=1 \dots n, j=1 \dots n$.

(n: étant le nombre de modes significatifs considérés)

$$Q_{ij} = \frac{8\omega_i\omega_j\sqrt{\xi_i\xi_j\omega_i\omega_j}(\xi_i\omega_i + \xi_j\omega_j)}{\left[(\xi_i\omega_i + \xi_j\omega_j)^2 + (\omega_i' - \omega_j')^2\right] \left[(\xi_i\omega_i + \xi_j\omega_j)^2 + (\omega_i' + \omega_j')^2\right]}$$

3.2.2 Effet maximal probable

La prise en compte simultanée des composantes de l'action sismique le long des axes horizontaux X, Y et de l'axe vertical Z pour évaluer l'effet maximal probable de l'action E, peut être calculé par la méthode SRSS à partir des effets maximaux de l'action sismique calculée de façon indépendante le long de chaque axe E_x , E_y et E_z :

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

De manière plus simple, l'effet maximal probable de l'action E peut être pris égal à l'effet le plus défavorable parmi les effets calculés par combinaisons sismiques des directions .

Ces efforts intègrent directement le cas échéant la prise en compte du coefficient de comportement q (intégré dans le spectre de calcul $S_d(T)$).

3.2.2 Effet maximal probable

Les effets des différentes composantes du mouvement d'ensemble sont combinés de la manière suivante :

$$E = E_x \pm 0.3 E_y \pm 0.3 E_z$$

$$E = E_y \pm 0.3 E_x \pm 0.3 E_z$$

$$E = E_z \pm 0.3 E_x \pm 0.3 E_y$$

3.4 Analyse par le spectre de puissance

Une analyse linéaire stochastique de la structure doit être effectuée, soit en appliquant l'analyse modale, soit par des matrices de réponse dépendant de la fréquence, à partir du spectre de densité de puissance en accélération.

Les effets élastiques de l'action doivent être définis comme la valeur moyenne de la distribution statistique de la valeur extrême maximale de la réponse pendant la durée considérée dans le modèle sismique.

Les valeurs de calcul doivent être déterminées en divisant les effets élastiques par le coefficient de comportement q approprié.

La méthode a le même domaine d'application que l'analyse par le spectre de réponse.

3.5 Analyse temporelle

Dans une analyse temporelle, les effets de l'action sismique sont obtenus en faisant la moyenne des échantillons de la réponse extrême, calculée pour chaque accelerogramme.

L'action sismique peut être décrite par un ensemble d'accelerogrammes construits artificiellement ou réels.

Cet ensemble doit contenir un nombre suffisant (une dizaine) d'accelerogrammes construits pour obtenir une estimation fiable des effets de l'action sismique. Il doit couvrir le spectre de réponse du site.

Toute utilisation de ce type de représentation de l'action sismique doit faire appel à une méthode scientifique validée.

3.5 Discontinuité mécanique

Dans le cas où l'on a plusieurs sites différents à considérer pour un même ouvrage, le mouvement d'ensemble à retenir pour l'ouvrage est obtenu en combinant, au moyen d'une méthode scientifiquement validée, les mouvements des différents sites. À défaut, l'enveloppe des spectres des différents sites peut être retenue.

3.3 Déplacements

3.3.1 Déplacements absolus horizontal $DM(H)$ et vertical $DM(V)$:

Tableau 6. Valeurs des déplacements absolus

Site	S1	S2	S3	S4
L_M (m)	600	500	400	300
$DM(H)$ (m)	0.03	0.05	0.07	0.09
$DM(V)$ (m)	0.02	0.04	0.06	0.08

L_M est la distance au delà de laquelle les mouvements des deux points peuvent être considérés comme indépendants.
Les déplacements D_M sont donnés pour une accélération unitaire (1m/s^2).

3.3.2 Déplacements différentiels

Sur un site sans discontinuité mécanique accusée, le déplacement différentiel maximal d entre deux points distants de X , en fonction du coefficient d'accélération de zone A , est égal à :

$$d = \eta \cdot A \cdot g \cdot X \quad \text{Si} \quad X < L_M \quad \text{avec} \quad \eta = \frac{D_M}{L_M} \sqrt{2}$$

$$d = A \cdot g \cdot D_M \cdot \sqrt{2} \quad \text{Si} \quad X \geq L_M$$

Le coefficient d'accélération de zone A est donné dans le tableau I.

Les valeurs de η selon le site sont données dans le tableau 6 :

Tableau 7 Valeurs de η

Site	S1	S2	S3	S4
$10^4 \eta$ en horizontal	0.7	1.4	2.5	4.2
$10^4 \eta$ en vertical	0.5	1.1	2.1	3.8

Dans le cas ou les deux points appartiennent au même type de site, mais sont situés de part et d'autre d'une discontinuité topographique accusée (vallée), en l'absence d'une démarche appropriée définie, la valeur de d est à majorer de 50%.

Dans le cas ou les deux points sont situés de part et d'autre d'une discontinuité mécanique (faille), le déplacement différentiel d est calculé par la relation :

$$d = A.g \sqrt{D_{M,1}^2 + D_{M,2}^2}$$

$D_{M,1}$ et $D_{M,2}$ étant les déplacements absolus des deux points.