

Développement de spectres de calcul réglementaires pour l'Algérie à partir d'une base de données accélérométriques régionale

Introduction

Par Dr. Nasser Laouami

Séisme → propagation des ondes → accélérogramme (domaine temporel) → spectre de réponse (domaine fréquentiel)

Outil indispensable pour l'ingénieur

Actuellement

Classes de sols définies dans les RPA99-2003

Classe de Sol	Description	q_c (MPa)	N	P (MPa)	E_p (MPa)	Q_u (MPa)	V_{s30} m/s	$f=V_s/4xH$ Hz
S ₁	Rocher	-	-	>5	>100	>10	≥ 800	> 6.6
S ₂	Ferme	>15	>50	2-5	20-100	0.4-10	400-800	3.3 – 6.6
S ₃	Meuble	1.5-15	10-50	1-2	5-20	0.1-0.4	200-400	1.6 – 3.3
S ₄	Très meuble	<1.5	<10	<1	<5	<0.1	100-200	0.8 – 1.6

Spectres de réponse élastique des RPA99-2003

$$S_a(\%g) = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} (2.5\eta - 1) \right) & 0 \leq T < T_1 \quad (1) \\ 2.5\eta(1.25A) & T_1 \leq T < T_2 \quad (2) \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T < 3s \quad (3) \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T > 3s \quad (4) \end{cases}$$

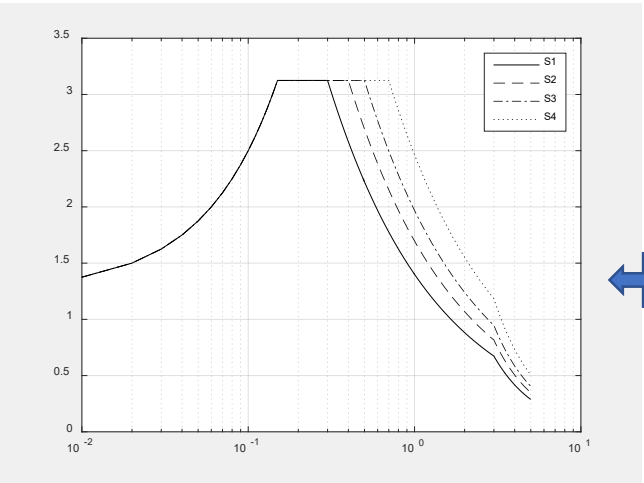
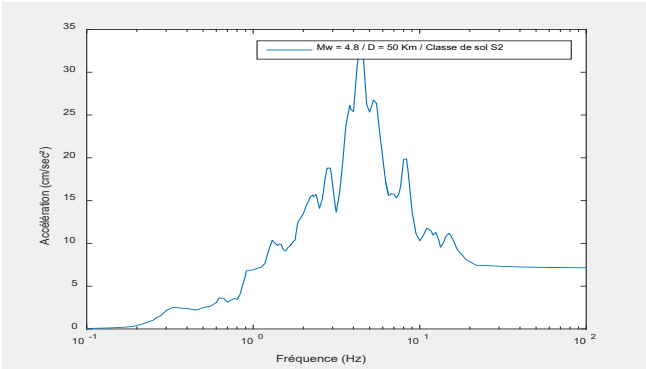
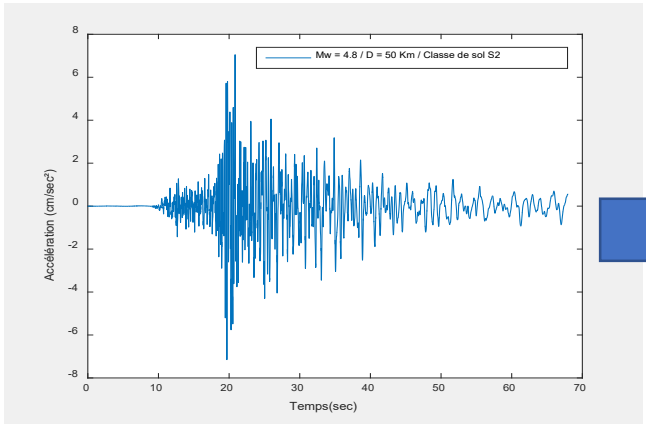
(a)

Classe de sol	S1	S2	S3	S4
T1 (sec)	0.15s	0.15s	0.15s	0.15s
T2 (sec)	0.30s	0.40s	0.50s	0.70s

(b)

L'amplitude, le contenu fréquentiel et la durée dépendent des paramètres sismologiques :

- Magnitude
- Distance (Km)
- Classe de sol (S1, S2, S3, S4)



Paramètres clés

- les limites des branches d'accélération spectrale constante (périodes T1 et T2)
- Les facteurs de site s
- l'indice d'atténuation (la branche descendante)

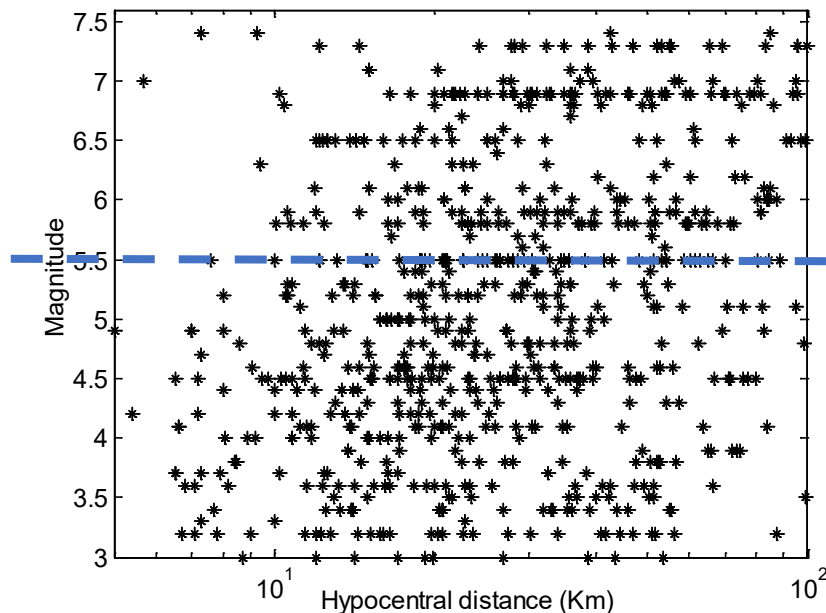
Partie 1 : Base de données des mouvements forts et classification des sites

A/ Distribution Magnitude - Distance

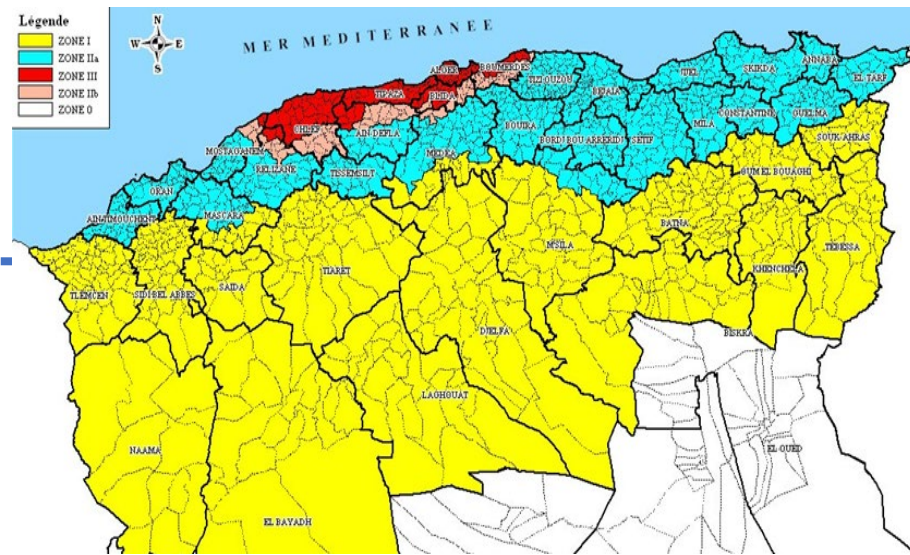
Jusqu'à 2018

Chaque enregistrement doit être défini par les 03 paramètres sismologiques (Mag, Dist, Classe de sol)

- 153 séismes
- 773 enregistrements à 3 composantes (773x2 composantes horizontales ; 773 composantes verticales)
- magnitudes comprises entre 3,0 et 7,4
- distances hypocentrales inférieures à 200 km
- 614 et 307 enregistrements horizontaux et verticaux respectivement à partir de la base de données Algérienne
- 774 et 387 enregistrements horizontaux et verticaux respectivement à partir de la base de données Européenne
- 158 et 79 enregistrements horizontaux et verticaux respectivement de l'USGS et de la CDMG.



Distribution des enregistrements en fonction de la magnitude et de la distance hypocentrale



La distribution de la sismicité est représentée par quatre (04) zones sismiques, les zones sismiques IIb et III pour une activité modérée à forte , et I et IIa pour une activité faible à modérée.

02 types de sismicité sont considérées (EC8)

Type 1 $M > 5,5$

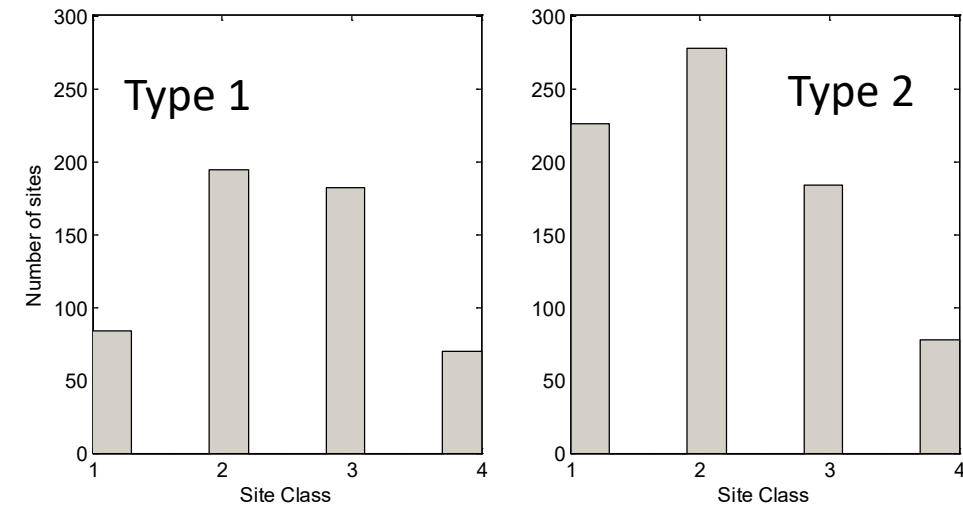
Type 2 $M < 5,5$

Partie 1 : Base de données des mouvements forts et classification des sites

B/ Classification des sites des stations d'enregistrement

- i) Nasser Laouami et al. (2018a) Proposal of an empirical site classification method based on target simulated horizontal over vertical spectral ratio. Bulletin of Earthquake Engineering doi.org/10.1007/s10518-018-0420-y
- ii) Nasser Laouami et al. (2018b) Ground motion prediction equations for Algeria and surrounding region using site classification based H/V spectral ratio. Bulletin of Earthquake Engineering doi.org/10.1007/s10518-018-0310-3
- iii) Nasser Laouami (2019) Vertical ground motion prediction equations and vertical-to-horizontal (V/H) ratios of PGA and PSA for Algeria and surrounding region. Bulletin of Earthquake Engineering doi.org/10.1007/s10518-019-00635-y
- iv) Nasser Laouami. (2020) Proposal for a new site classification tool using microtremor data. Bulletin of Earthquake Engineering (2020) doi.org/10.1007/s10518-020-00882-4

Classe de sol	SCS1		SCS2		SCS3		SCS4		NCR		UNR	
Classe de magnitu de	Type1	Type2	Type1	Type2	Type1	Type2	Type1	Type2	Type1	Type2	Type1	Type2
Enregist 3-comp	42	113	97	139	91	92	35	39	41	22	19	43
	155		236		183		74		63		62	
Total	773											



Nombre d'enregistrements par classe de sol pour les classes de magnitude de type 1 et de type 2.

Distribution de la base de données des mouvements forts en fonction de la classe de sol

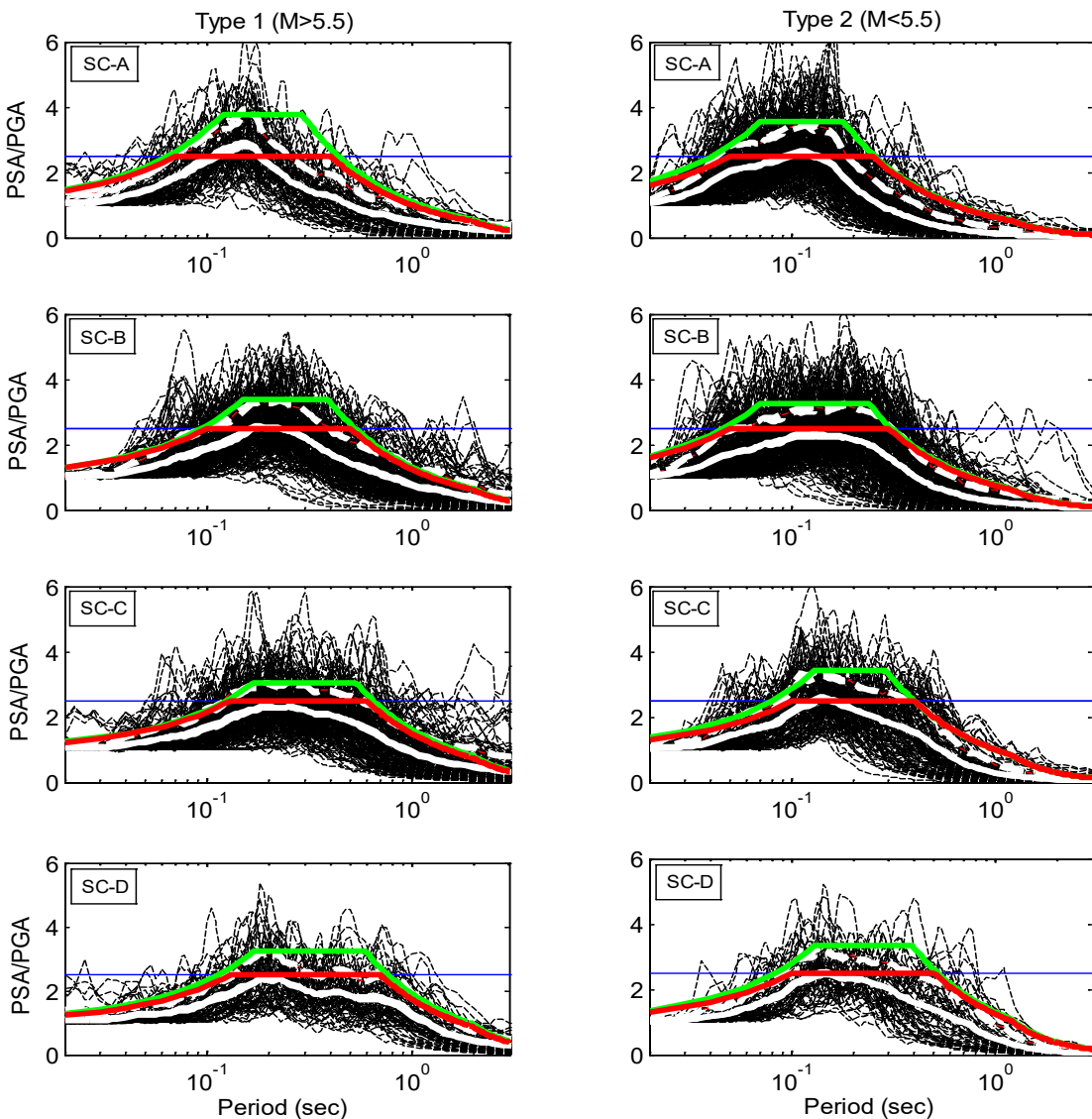
Partie 2 : Proposition de Spectres de Réponse Élastiques

A/ Périodes T_B et T_C

La formule générale utilisée pour étalonner les spectres de réponse horizontaux et verticaux normalisés

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g S \left[1 + \frac{T}{T_B} (\beta \eta - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_B \\ \beta a_g S \eta & T_B \leq T \leq T_C \\ \beta a_g S \eta \left[\frac{T_C}{T} \right]^\alpha & T_C \leq T \leq T_D \\ \beta a_g S \eta \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]^\alpha & T_D \leq T \leq 4s \end{cases}$$

Soil classes	S1		S2		S3		S4		Average β
Seismicity types	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
β	2.8	2.66	2.57	2.34	2.33	2.47	2.40	2.43	



Les spectres normalisés PSA/PGA horizontaux enregistrés (en noir), les spectres médians (ligne blanche continue), le 16^e percentile (moyenne moins un écart-type, ligne blanche en pointillés) et le 84^e percentile (moyenne plus un écart-type, ligne blanche en pointillés), avec le spectre de réponse réglementaire moyen proposé (en rouge) et la forme réglementaire du spectre de réponse enveloppe (en vert).

Partie 2 : Proposition de Spectres de Réponse Élastiques

A/ Périodes T_B et T_C

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g S \left[1 + \frac{T}{T_B} (\beta \eta - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_B \\ \beta a_g S \eta & T_B \leq T \leq T_C \\ \beta a_g S \eta \left[\frac{T_C}{T} \right]^\alpha & T_C \leq T \leq T_D \\ \beta a_g S \eta \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]^\alpha & T_D \leq T \leq 4s \end{cases}$$

Les résultats mettent en évidence que les limites de la branche d'accélération spectrale constante (T_B - T_C) se déplacent vers les longues périodes

		This study		EC8 [2]		RPA99 [1]		Pitilakis et al. [20]*	
Soil Class	Magnitude Class	T_B	T_C	T_B	T_C	T_B	T_C	T_B	T_C
S1	Type 1	0.10	0.40	0.15	0.40	0.15	0.30	0.10	0.40
	Type 2	0.05	0.25	0.05	0.25			0.05	0.30
S2	Type 1	0.10	0.50	0.15	0.50	0.15	0.40	0.10	0.40-0.50
	Type 2	0.05	0.30	0.05	0.25			0.05	0.25-0.30
S3	Type 1	0.15	0.60	0.20	0.60	0.15	0.50	0.10	0.60-0.90
	Type 2	0.10	0.40	0.10	0.25			0.10	0.25-0.40-0.50
S4	Type 1	0.15	0.70	0.20	0.80	0.15	0.70	0.10	0.70
	Type 2	0.10	0.50	0.10	0.30			0.10	0.70

- Lorsque la classe de sol passe de S_1 vers S_4
- Lorsque la magnitude passe du type 2 ($M < 5,5$) au type 1 ($M > 5,5$).
- Même ordre de grandeur que Pitilakis et à un degré moindre que l'EC8
- Les RPA99 semblent plus proches du type 1

Partie 2 : Proposition de Spectres de Réponse Élastiques

B/ Facteur de site en utilisant l'intensité du spectre de Housner

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g \beta \left[1 + \frac{T}{T_B} (\beta \eta - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_B \\ \beta a_g \eta & T_B \leq T \leq T_C \\ \beta a_g \eta \left[\frac{T_C}{T} \right]^\alpha & T_C \leq T \leq T_D \\ \beta a_g \eta \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]^\alpha & T_D \leq T \leq 4s \end{cases}$$

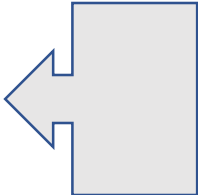
NB : Cette approche a été utilisé pour le calcul des facteurs de site de l’actuelle version des EC8 et reprise dans les travaux de Pitilakis pour la révision des spectres des EC8 en utilisant une base de données mondiale.

Nombre d'enregistrements de mouvements forts pour chaque intervalle de magnitude et classe de sismicité

Soil Class	Type 2				Type 1			
	3.5<M<4.0	4.0<M<4.5	4.5<M<5.0	5.0<M<5.5	5.5<M<6.0	6.0<M<6.5	6.5<M<7.0	7.0<M<7.5
SCA	106	30	56	32	46	18	14	6
SCB	84	58	72	64	80	32	58	24
SCC	60	42	48	34	76	22	58	26
SCD	12	24	32	10	28	6	26	10

4-Facteur de site

$$SF_B = \frac{S_B}{SR_B} \quad SF_C = \frac{S_C}{SR_C} \quad SF_D = \frac{S_D}{SR_D}$$



1-l'intensité du spectre de Housner normalisé par rapport à la distance hypocentrale

$$I_{A,B,C,D} = \int_{0.05}^{2.5} \overline{R \cdot S_a(T)} dt$$

2-Amplification moyenne

$$S_B = \frac{I_B}{I_A} \quad S_C = \frac{I_C}{I_A} \quad S_D = \frac{I_D}{I_A}$$

3-Rapport de forme spectrale » (SR)

$$SR_{B,C,D} = \frac{\int_{0.05}^{2.5} S_e^{B,C,D}(T) dt}{\int_{0.05}^{2.5} S_e^A(T) dt}$$

Partie 2 : Proposition de Spectres de Réponse Élastiques

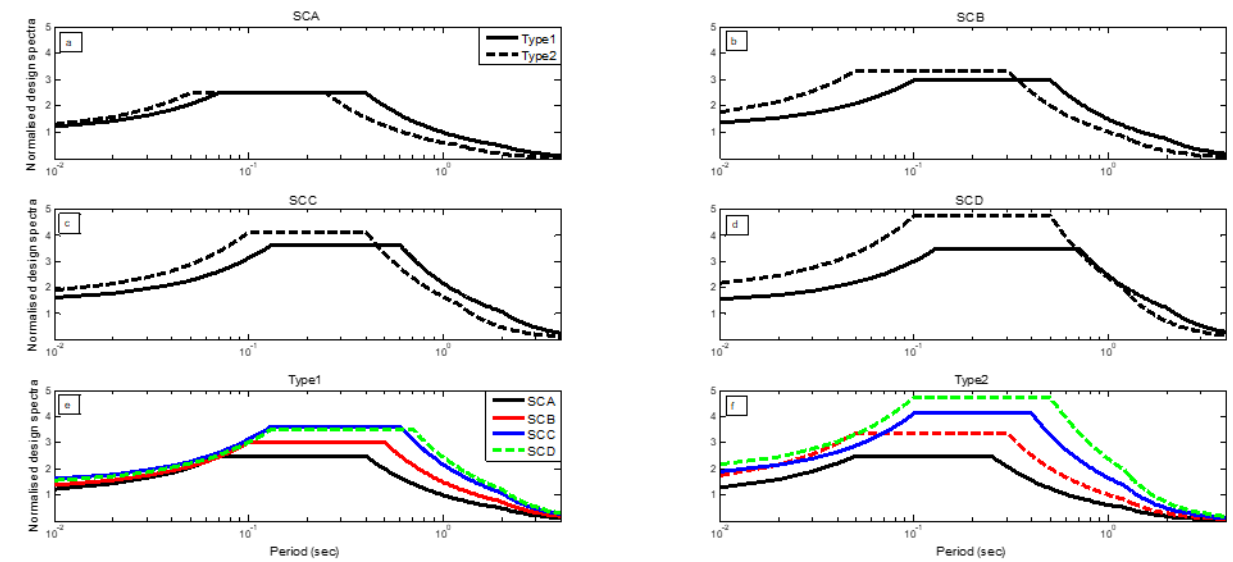
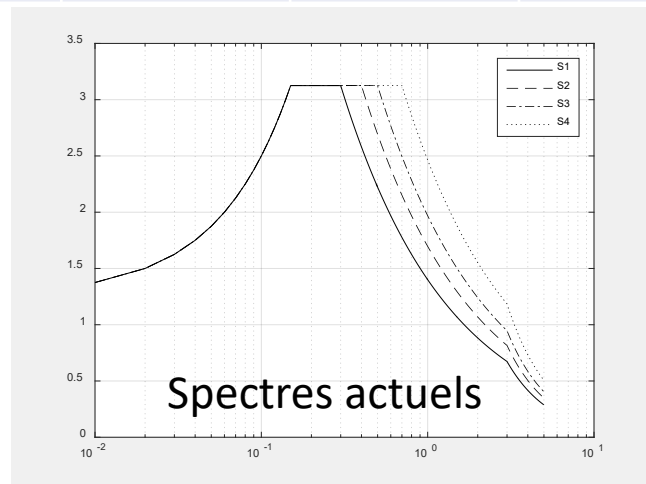
B/ Facteur de site en utilisant l'intensité du spectre de Housner

Seismicity category	Soil Class	This study	Pitilakis et al. [22]	Pitilakis et al. [20]*	EC-8 [2]
Type 1 M>5.5	SCA	1.0	1.0	1.0	1.0
	SCB	1.20	1.30	1.1 -1.3 (1.20)	1.20
	SCC	1.40	1.70	1.7 -1.3 -1.3 (1.43)	1.15
	SCD	1.35	1.35	1.8	1.35
Type 2 M<5.5	SCA	1.0	1.0	1.0	1.0
	SCB	1.35	1.40	1.2-1.5 (1.35)	1.35
	SCC	1.65	2.10	1.8 -1.7 -2.1 (1.86)	1.50
	SCD	1.85	1.80	2.0	1.80

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g \mathbf{S} \left[1 + \frac{T}{T_B} (\beta \eta - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_B \\ \beta a_g \mathbf{S} \eta & T_B \leq T \leq T_C \\ \beta a_g \mathbf{S} \eta \left[\frac{T_C}{T} \right]^\alpha & T_C \leq T \leq T_D \\ \beta a_g \mathbf{S} \eta \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]^\alpha & T_D \leq T \leq 4s \end{cases}$$

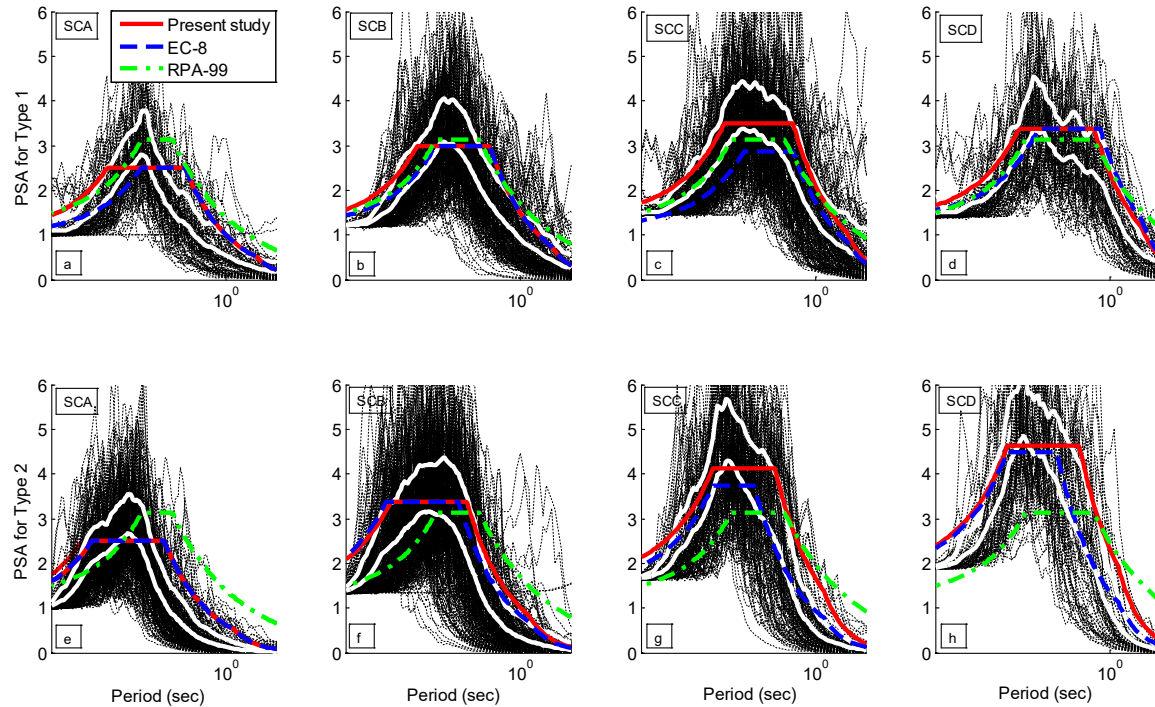
Résultats très similaires avec ceux obtenus par Pitilakis et al, pour la révision des EC8.

Il faut rappeler que les RPA 99 version 2003 ne considèrent pas de facteur de site dans sa version actuelle.

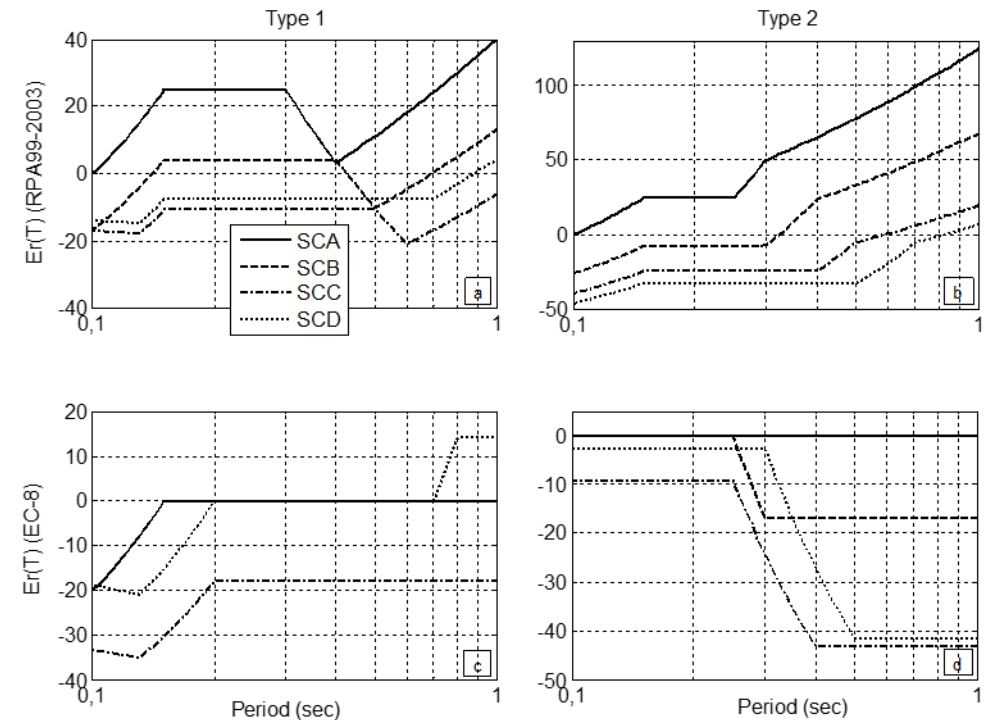


Partie 2 : Proposition de Spectres de Réponse Élastiques

C/ Marges avec les RPA99version2003



$$Er(T) = 100 \frac{SD(T)^{RPAorEC8} - SD(T)^{This\ study}}{SD(T)^{This\ study}}$$



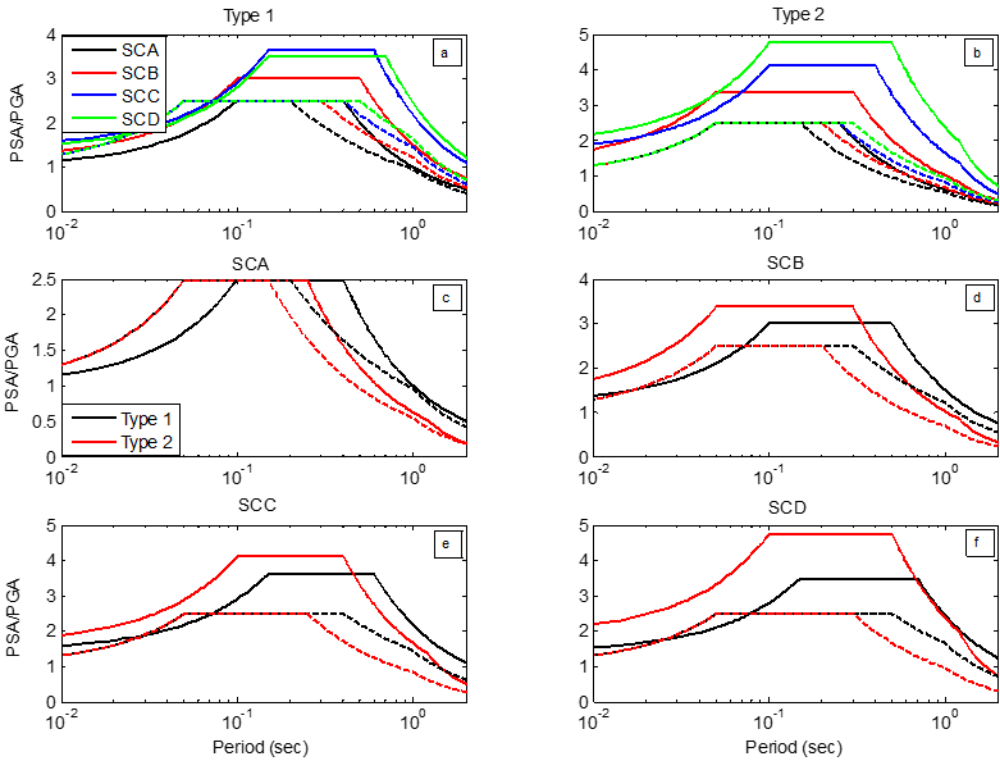
L'analyse des résultats obtenus montre que l'utilisation des spectres élastiques actuels RPA99/2003 dans des régions à sismicité faible à modérée ($M < 5,5$) et modérée à forte ($M > 5,5$) peut induire des sous ou surestimations considérables sur les accélérations spectrales à utiliser pour la conception des bâtiments. Ces écarts dépendent de la classe de sol et de la période fondamentale du bâtiment considéré.

Partie 2 : Proposition de Spectres de Réponse Élastiques
D/ Composante verticale

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g S \left[1 + \frac{T}{T_B} (\beta \eta - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_B \\ \beta a_g S \eta & T_B \leq T \leq T_C \\ \beta a_g S \eta \left[\frac{T_C}{T} \right]^\alpha & T_C \leq T \leq T_D \\ \beta a_g S \eta \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]^\alpha & T_D \leq T \leq 4s \end{cases}$$

Valeurs des paramètres recommandées pour les spectres élastiques horizontaux et verticaux proposés pour l'Algérie

		Type 1 (M>5.5)				Type 2 (M<5.5)			
Parameters		TB	TC	α	S	TB	TC	α	S
Horizontal	SCA	0.10	0.40	1	1	0.05	0.25	1	1
	SCB	0.10	0.50	1	1.20	0.05	0.30	1	1.35
	SCC	0.15	0.60	1	1.45	0.10	0.40	1	1.65
	SCD	0.15	0.70	1	1.40	0.10	0.50	1	1.90
Vertical	SCA	0.05	0.20	0.6	1	0.05	0.15	0.8	1
	SCB	0.05	0.30	0.6	1	0.05	0.20	0.8	1
	SCC	0.05	0.40	0.6	1	0.05	0.25	0.8	1
	SCD	0.05	0.50	0.6	1	0.05	0.30	0.8	1



FIN