

Dynamique des structures

Abdellatif MEGNOUNIF

e-mail: abdellatif_megnounif@yahoo.fr

Chap. 17C

Règles Parasismiques Algériennes (RPA 2024) **Partie II : Méthodes de calcul et Justifications**

1. Règles de calcul

2003, 2024

Idem

i. Choix de la méthode

03
méthodes

MSE



Méthodes
dynamiques



Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes : Détaillée (Chap 3.3.4)

- ✓ Méthode statique équivalente
- ✓ Méthode d'analyse modale spectrale
- ✓ Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes

- ❖ Bâtiments réguliers en plan et en élévation avec une hauteur max de 65 m en zones I, II et III et 32 m en zone IV, V et VI
- ❖ Bâtiments irréguliers de hauteur max de 65 m en zones I, II et III et 32 m en zone IV, V et VI avec, en plus :
 - ✓ Zone I et II : tous groupes. Pas de limite de niv ou hauteur
 - ✓ Zone III et IV : Gr 3; Gr 2 si $h \leq 7$ niv et ≤ 23 m ; Gr 1B si $h \leq 5$ niv et ≤ 17 m ; Gr 1A si $h \leq 3$ niv et ≤ 11 m
 - ✓ Zones V et VI : Gr 3 et 2 si $h \leq 5$ niv et ≤ 17 m ; Gr 1B si $h \leq 3$ niv et ≤ 11 m ; Gr 1A si $h \leq 2$ niv et ≤ 8 m.

- ❖ Méthode d'analyse modale spectrale dans tous les cas, et en particulier dans le cas où la MSE n'est pas permise.
- ❖ Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes au cas par cas par un personnel qualifié, ayant justifié les choix des séismes de calcul et des lois de comportement utilisées ainsi que la méthode d'interprétation des résultats et les critères de sécurité à satisfaire.

Push
Over ?

ii. Méthode statique équivalente

MSE

- ✓ Les forces et déplacements obtenus par la MSE sont **inférieures** aux forces et déformations observées lors d'un séisme majeur.
- ✓ Ce dépassement est équilibré par le comportement **ductile** fourni par les dispositions constructives.

Méthode statique équivalente

- Très ancienne, plus simple et la plus utilisée.
- Consiste à remplacer les forces dynamiques par des forces statiques équivalentes.
- Le **mouvement du sol** peut se faire dans une direction quelconque dans le plan horizontal.
- Les forces sismiques horizontales équivalentes seront considérées appliquées successivement suivant **02 directions orthogonales caractéristiques choisies par le projeteur ou bien** généralement les axes principaux du plan horizontal de la structure.
- Valable pour des structures **régulières moins élevée**.
- Utilise uniquement le **mode de vibration fondamental**.
- La distribution des **charges horizontales statiquement** appliquée est proche du premier mode.
- La force est de type inertie qui s'oppose à l'accélération sismique maximale du sol.

Attention !!!

L'utilisation de la MSE ne peut être dissociées de l'application rigoureuse des **dispositions constructives** garantissant à la structure:

- **Une ductilité** suffisante
- La **capacité de dissiper** l'énergie vibratoire transmise à la structure par des secousses sismiques majeurs.

ii. Méthode statique équivalente

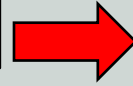
Modélisation

Méthode statique équivalente

- Principe du **plancher rigide**. Dans chacune des 02 directions, modèle plan à 1 seul DDL (translation horizontale) et masses concentrées au centre de gravité des planchers, sous réserve que les systèmes de contreventement dans les 02 directions puissent être découplés.
- La rigidité latérale des éléments porteurs du système de contreventement est calculée à partir des sections non fissurées pour les structures en BA ou maçonnerie.
- Seul le mode fondamental de vibration de la structure est à considérer dans le calcul de la force sismique latérale.

ii. Méthode statique équivalente

Force sismique totale



Attention !!!

Appliquée à la base, à calculer successivement dans 02 directions horizontales orthogonales

2003

$$V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} W$$



2024

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g}(T_0) \cdot W \quad (17C.1)$$

Avec:

$\frac{S_{ad}}{g}(T_0)$: Ordonnée du spectre de calcul pour la période (T_0) (Voir 4.iii.c)

T_0 : Période fondamentale du bâtiment, pour le mouvement de translation dans la direction considérée (voir ci-après : estimation de la période fondamentale)

λ : Coefficient de correction

$$\lambda = \begin{cases} 0.85 & \text{si } T_0 \leq (2 \cdot T_2) \text{ et si le bâtiment a plus de 02 niv} \\ 1 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (17C.2)$$

W : Poids sismique total du bâtiment.

$$(V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} W = R^* D W)$$

ii. Méthode statique équivalente

D'où vient cette formule ?

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g} (T_0) \cdot W$$

Amplification de W
(principe de la MSE)

(17C.1)

Déjà vu (Chap 12) L'effort maximal (12.22):

$$F_{kjmax} = \Gamma_j \omega_j^2 M \phi_j q_{jmax}(t) = \omega_j^2 M \phi_j y \frac{L_j}{M_j} y_{jmax}(t) = M \phi_j \frac{L_j}{M_j} S_A(\omega_j, \xi_j)$$

L'effort tranchant à la base

$$V_{0max} = \sum_{j=1}^n \frac{L_j^2}{M_j} S_A(\omega_j, \xi_j)$$

$$L_n = \phi_n^T M \{\Delta\}$$

Pour le 1^{er} mode, on aura $V_{0max} = \frac{L_1^2}{M_1} S_A(\omega_1, \xi_1)$ (17.1b) $L_1 = \phi_1^T M \{\Delta\}$

En comparant (17.1) et (17.1b), on aura

$$\frac{L_1^2}{M_1} = \frac{W}{g}$$

D'où

$$V_{0max} = \frac{W}{g} S_A(\omega_1, \xi_1) = D \cdot W$$

Avec

$$D = \frac{S_A(\omega_1, \xi_1)}{g}$$

D : accélération spectrale exprimée en « g »

W : poids total supposé être le poids effectif dans le 1^{er} mode.

λ : Pour tenir compte de la masse modale du 1er mode reste inférieure de 15% de la masse total (85%)

Transformation du spectre de réponse en spectre de calcul, par introduction des coefficients Q_f/R

W : Poids total de la structure

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g} (T_0) \cdot W$$

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad (17C.3)$$

Avec: $W_i = W_{Gi} + \psi W_{Qi}$

- ✓ W_{Gi} : Poids dus aux charges permanentes et à celles des équipements fixes éventuels, solidaires de la structure
- ✓ W_{Qi} : Charges d'exploitation
- ✓ ψ : Coefficient d'accompagnement, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation donné par la tableau

Cas	Type d'ouvrage	ψ
1	Bâtiments d'habitation, bureaux ou assimilés	0,20
2	Bâtiments recevant du public temporairement:	
2a	✓ Salles d'exposition, de sport, lieux de culte, salles de réunions avec places debout	0,30
2b	✓ Salles de classes, restaurants, dortoirs, salles de réunions avec places assises	0,40
3	Entrepôts, hangars	0,50
4	Archives, bibliothèques, réservoirs et ouvrages assimilés	1,00
5	Autres locaux non visés ci-dessus.	0,60

1
seule

Estimation de la période fondamentale de la structure

$$\frac{S_{ad}}{g}(T_0) ?$$



$$\ll T_0 \gg ?$$

Formule empirique ou méthodes analytiques

Empirique

$$T_{empirique} = CT h_N^{3/4} \quad (17C.4)$$

✓ h_N : Hauteur mesurée en (m) à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau (N)

✓ C_T : Coefficient, fonction du système de contreventement, du type de remplissage donné par le tableau

Cas	Système de contreventement	C_T
1	Ossatures spatiales en BA sans remplissage en maçonnerie	0,075
2	Portiques spatiaux en acier sans remplissage en maçonnerie	0,085
3	Ossatures en portiques en BA ou en acier avec remplissage en maçonnerie	0,050
4	Autres types de structures	0,050

2003

02 formules empiriques pour les 04 cas

2024

01 seule formule empirique pour les 04 cas

Estimation de la période fondamentale de la structure

Ou bien

Formule de Rayleigh

$$T_{calcul} = 2\pi \sqrt{\left(\sum_i^n W_i \delta_i^2 \right) / \left(g \sum_i^n f_i \delta_i \right)} \quad (17C.5)$$

- ✓ f_i : système de forces horizontales, distribuées selon les formules de répartition suivant la verticale
- ✓ δ_i : Flèches horizontales dues aux forces f_i calculées à partir d'un modèle élastique linéaire de la structure qui prend en compte tous les éléments participant à sa rigidité
- ✓ W_i : Poids calculé à chaque niveau (i)

Ou bien

Version simplifiée de la formule de Rayleigh

$$T_{calcul} = 2\sqrt{\delta_N} \quad (17C.6)$$

- ✓ δ_N : Fleche horizontale au sommet, mesurées en (m) due aux forces latérales

Les valeurs de « T » calculées à partir des formules de Rayleigh ou des méthodes numériques ne doivent pas dépasser celles estimées empiriquement de plus de 30%

Estimation de la période fondamentale de la structure

MSE ?



« T_0 » ?

$$T_{\text{calcul}} \text{ (Rayleigh ou numérique)} < 1.30 T_{\text{empirique}} \quad (17C.7)$$

D'où :

Cas	Valeur T_0 à utiliser
$T_{\text{calcul}} < 1.3 T_{\text{empirique}}$	$T_0 = T_{\text{calcul}}$
$T_{\text{calcul}} \geq 1.3 T_{\text{empirique}}$	$T_0 = 1.3 T_{\text{empirique}}$

Mieux expliquée



Plus claire pour les utilisateurs

Type 1

Zones IV, V et VI

S, T1, T2 et T3 ?

Site	S	T1(s)	T2(s)	T3(s)
S1	1,00	0,10	0,40	2,0
S2	1,20	0,10	0,50	2,0
S3	1,30	0,15	0,60	2,0
S4	1,35	0,15	0,70	2,0

Type 2

Zones I, II et III

Site	S	T1(s)	T2(s)	T3(s)
S1	1,00	0,05	0,25	1,20
S2	1,30	0,05	0,30	1,20
S3	1,55	0,10	0,40	1,20
S4	1,80	0,10	0,50	1,20

Type 1

Zones IV, V et VI

 A_v , T1, T2, T3 et α ?

Site	A_v/A	T1(s)	T2(s)	T3(s)	α
S1	0,90	0,05	0,20	1,0	0,6
S2	0,90	0,05	0,30	1,0	0,6
S3	0,90	0,05	0,40	1,0	0,6
S4	0,90	0,05	0,50	1,0	0,6

Type 2

Zones I, II et III

Site	A_v/A	T1(s)	T2(s)	T3(s)	α
S1	0,55	0,05	0,15	1,0	0,8
S2	0,55	0,05	0,20	1,0	0,8
S3	0,55	0,05	0,25	1,0	0,8
S4	0,55	0,05	0,30	1,0	0,8

2003

Spectre de calcul horizontal

2024

Spectre de Calcul
Spectre inélastique (réduit)

Horizontal

Spectre de calcul

$$\frac{S_{ad}}{g} = \begin{cases} A I S \left(\frac{2}{3} + \frac{T}{T_1} \left(2.5 \frac{Q_F}{R} - \frac{2}{3} \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ A I S \left(2.5 \frac{Q_F}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ A I S \left(2.5 \frac{Q_F}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right) & T_2 \leq T \leq T_3 \\ A I S \left(2.5 \frac{Q_F}{R} \right) \left(\frac{T_2 T_3}{T^2} \right) & T_3 \leq T \leq 4.0 s \end{cases}$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25 A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5 \eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0 s \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T > 3.0 s \end{cases}$$

(17B.6)

Les valeurs du spectre de calcul ne doivent pas être inférieures à (0.2 A.I)

- ✓ **R**: Coefficient de comportement de la structure
- ✓ **Q_F** : Facteur de qualité

Spectre de calcul
Vertical

2024

Spectre de Calcul

Vertical

Avec $S=1$
Et $Q_F=1$

$$\frac{S_{vd}}{g} = \begin{cases} A_v I \left(\frac{2}{3} + \frac{T}{T_1} \left(\frac{2.5}{R} - \frac{2}{3} \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ A_v I \left(\frac{2.5}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ A_v I \left(\frac{2.5}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^\alpha & T_2 \leq T \leq T_3 \\ A_v I \left(\frac{2.5}{R} \right) \left(\frac{T_2 T_3}{T^2} \right)^\alpha & T_3 \leq T \leq 4.0 \text{ s} \end{cases} \quad (17B.7)$$

Critères de classification

Coefficient d'accélération de référence de zone **A**

Zone	Niveau	A
0	Très faible	/
I	Faible	0.07 (0.05)
II	Faible à moyen	0.10
III	Moyen	0.15
IV	Moyen à élevée	0.20
V	Elevée	0.25
VI	Elevée	0.30 (0.35)

I: Coefficient d'importance

Importance	Groupe d'importance			
	1A	1B	2	3
I	1,40	1,20	1,0	0,80

R: Coefficient de comportement global de la structure

		Système de contreventement	R
Béton armé	1	Système à ossature	5,5 ^(a)
	2	Système à contreventement mixte, équivalent à une ossature	5,5 ^(a)
	3	Système à ossature ou mixte équivalent à ossature avec remplissage maçonnerie rigide	3,5 ^(a)
	4	Système à contreventement mixte, équivalent à des voiles	4,5 ^(b)
	5	Système de contreventement constitué par des voiles	4,5 ^(b)
	6	Système à ossature à noyau ou à effet noyau	3,0 ^(b)



viii. Facteur de qualité

$$Q_F = 1 + \sum_1^5 P_q \quad (17B.8)$$

2024

Dépend de :

- ✓ La redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent
- ✓ La régularité en plan et en élévation
- ✗ ~~La qualité du contrôle de la construction~~

Cat	Critère q	P_q	
		Obs ervé	Non observé
(a)	1. Régularité en plan	0	0,05
	2. Régularité en élévation	0	0,20
	3. Conditions minimales sur le nombre étage. La structure doit comporter au moins 02 niveaux	0	0,20
	4. Conditions minimales sur les travées. La structure doit présenter, à chaque niveau, au minimum 03 travées.	0	0,10
(b)	1. Régularité en plan	0	0,05
	2. Régularité en élévation	0	0,20
	3. Redondance en plan Chaque étage, en plan, au moins 04 files de voiles dans la direction des forces latérales. Condition valable uniquement les systèmes de contreventement (4) et (5)	0	0,05

Catégories de pondération (c)



$Q_F=1$

Distribution verticale de la force sismique résultante

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g} (T_0) \cdot W$$

Suivant la hauteur

$$V = Ft + \sum F_i \quad (17C.8)$$

✓ F_t : Force concentrée au sommet (influence des modes supérieurs de vibration).

Avec

$$F_t = 0,07 T_0 V \leq 0,25 V \quad \text{Pour : } T_0 \geq 0,7 \text{ s}$$

$$F_t = 0 \quad \text{Pour : } T_0 \leq 0,7 \text{ s} \quad (17C.9)$$

La partie restante ($V - F_t$),
suivant la hauteur

$$F_i = \frac{(V - Ft) W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (17C.10)$$

F_i : Effort horizontal revenant au niveau (i)
 h_i : niveau du plancher où s'exerce la force (F_i)
 h_j : Niveau du plancher quelconque
 W_i, W_j : poids revenant aux planchers (i) et (j) respectivement

ii. Méthode statique équivalente

D'où vient cette distribution verticale ?

$$F_i = \frac{(V - Ft)W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (17C.10)$$

Déjà vu (Chap 12) L'effort maximal (12.22):

$$F_{kjmax} = \Gamma_j \omega_j^2 M \phi_j q_{jmax}(t) = \omega_j^2 M \phi_j y \frac{L_j}{M_j} y_{jmax}(t) = M \phi_j \frac{L_j}{M_j} S_A(\omega_j, \xi_j)$$

Pour le 1^{er} mode, on aura

$$F_k = M \phi_1 \frac{L_1}{M_1} S_A(\omega_1, \xi_1) \quad (17C.11) \quad L_n = \phi_n^T M \{\Delta\}$$

Or (17.1b) $V_{0max} = \frac{L_1^2}{M_1} S_A(\omega_1, \xi_1)$

En remplaçant dans (17C.11) $F_k = \frac{M \phi_1}{L_1} V_{0max}$ **Or** $L_1 = \phi_1^T M \{\Delta\} = \sum_{j=1}^n M_j \phi_{1j}$

D'où $F_k = \frac{M \phi_1}{\sum_{j=1}^n M_j \phi_{1j}} V_{0max} \quad (17C.12)$

En comparant, on remarque que la formule du RPA (17.8) représente la réponse d'un système à masses concentrées dont le mode (déformée) est une droite ($\phi_{1j} = h_i/H$). Cette hypothèse découle des observations que le 1^{er} mode est généralement proche d'une ligne droite

Distribution horizontale des forces sismiques

L'effort tranchant au niveau de l'étage « k »

$$V_k = F_t + \sum_{i=k}^n F_i \quad (17C.13)$$

Dans le cas de **planchers rigides** dans leur plan, est distribué aux éléments verticaux proportionnellement à leurs **rigidités relatives**

Rigidité relative de niveau

La rigidité relative R_k est l'effort tranchant T_k qu'il faut appliquer au niveau « k » pour avoir un déplacement relatif unitaire.

Les rigidités relatives permettent de calculer les centres de rigidité pour les comparer aux centres de masses.

$$R_k = \frac{T_k}{\Delta_k} \quad (17C.14)$$

Avec:

$$\Delta_k = u_k - u_{k-1}$$

Déplacement relatif entre 02 étages consécutives

(17C.15)

Efforts tranchants T_k ?



Efforts appliqués par étage et cumulés

Effet de la torsion verticale

Effort tranchant additionnel dû à la torsion d'axe vertical due à l'excentricité entre centre de gravité et centre des rigidités.

Les efforts tranchants négatifs dus à la torsion sont **négligés**

Cas des planchers ou diaphragmes horizontaux rigides, on prend:

$$\text{Excentricité} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 5\% \text{ direction de calcul du bâtiment à ce niveau} \\ \text{Excentricité théorique résultant des plans} \end{array} \right\}$$

Excentricité à prendre de part et d'autre du centre de torsion

2003

$$\text{Excentricité} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 5\% \text{ de la plus grande dimension du bâtiment} \\ \text{Excentricité théorique résultant des plans} \end{array} \right\}$$

Effort tranchant additionnel

$$T_{j,Supp} = \varphi_j d_j R_j \quad (17C.16)$$

$\Delta_{j,Supp}$: Déplacement supplémentaire dû à la torsion
 φ_j : Rotation par torsion au niveau « k »
 d_j : Bras de levier (avec son signe)

Sachant que la force de torsion est $F_{k,Torsion} = T_{k,Supp} - T_{k+1,Supp}$

$$\begin{array}{ll} \text{La force sismique totale} & F_{k,Totale} = F_{k,Trans} + F_{k,Torsion} \quad \text{Si } F_{k,Torsion} > 0 \\ \text{(Translation + Rotation)} & F_{k,Totale} = F_{k,Trans} \quad \text{Si } F_{k,Torsion} < 0 \end{array} \quad (17C.17)$$

Avec

Rigidité à la torsion

$$J_k = \sum_{j=1}^3 R_{jx} d_{jy}^2 + \sum_{j=1}^5 R_{jy} d_{jx}^2 \quad (17C.18)$$

Moment de torsion au niveau « k »

$$M_{t,k} = T_x e_y + T_y e_x \quad (17C.19)$$

Rotation par torsion au niveau « k »

$$\varphi_{t,k} = \frac{M_{t,k}}{J_k} \quad (17C.20)$$

Composante verticale de l'action sismique

Les effets de la composante verticale sont pris en compte dans les calculs si :

Obligatoire

$$A_v \cdot I \cdot g > 0.25 g \quad (17C.21)$$

Dans les cas suivants

- ✓ Eléments de structure horizontaux ou presque horizontaux de 15 m de portée ou plus;
- ✓ Eléments horizontaux ou presque horizontaux en console de plus de 2.00 m de long;
- ✓ Eléments précontraints horizontaux ou presque horizontaux;
- ✓ Poutres supportant des poteaux;
- ✓ Structures sur appuis parasismiques

$A_v = f(\text{zone sismique, groupe d'importance})$

Zone	Coef. D'accélération					
	A.I Horizont al	A_v/A	$A_v \cdot I$ Vertical			
			Catégorie . D'importance			
			1A	1B	2	3
		$I=1.40$	$I=1.20$	$I=1.0$	$I=0.80$	
I	0.07 I	0.55	0.054	0.046	0.039	0.031
II	0.10 I	0.55	0.077	0.066	0.055	0.044
III	0.15 I	0.55	0.116	0.099	0.083	0.066
IV	0.20 I	0.90	0.252	0.216	0.180	0.144
V	0.25 I	0.90	0.315	0.270	0.225	0.180
VI	0.30 I	0.90	0.378	0.324	0.270	0.216

En gras, obligatoire

iii. Méthode dynamique modale spectrale

MDMS

Attention !!!

Par cette méthode, il est recherché pour chaque mode, le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul (voir 4.iii.c) . Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

Modélisation : Méthode dynamique modale spectrale

- La méthode constitue la base du calcul sismique des structures dans le cas de structures particulières (là où les méthodes statiques équivalentes ne peuvent pas être appliquées).
- Pour les structures régulières en plan avec des planchers rigides, utiliser un modèle plan, encastré à la base avec concentration des masses au centre de gravité des planches à 01 SDDL en translation horizontale et ceci dans chacune des 02 directions de calcul.
- Pour les structures irrégulières en plan (risque de torsion) avec planchers rigides, prévoir modèle 3D à masses concentrées au CDG à 03 DDL (02 translations horizontales et 01 rotation)
- Structures à planchers flexibles (Régulières ou non), modèle 3D à plusieurs DDL par plancher (Le plus exacte).
- Déformabilité du sol à prendre en compte en cas de nécessité.
- Le modèle du bâtiment doit représenter fidèlement les distributions de rigidités et des masses pour prendre en compte tous les modes de déformation significatifs dans le calcul.
- Bâtiment en BA ou maçonnerie, la rigidité des éléments porteurs doit être calculée en considérant les sections non fissurées. ~~En cas de nécessité (déplacements critiques), il faut estimer correctement les rigidités pour prendre en compte les fissures~~

Nombre de modes à considérer

Le nombre de modes translationnels à retenir dans chacune des 02 directions sera tel que :

- ✓ La somme des masses modales effectives pour les mode retenus soit égale à 90% au moins de la masse totale.
- ✓ Ou bien que tous les modes ayant une masse modale effective $>$ à 5% de la masse totale soient retenus.

Un minimum de 03 modes dans chaque direction

Sinon, due à l'influence des modes de torsion : ?

Le nombre minimal « K » à retenir :

$$K \geq 3\sqrt{N} \quad \text{Et} \quad T_K \leq 0,2 \text{ s} \quad (17C.22)$$

N: Nombre de niveaux au dessus du sol et T_k période du mode « K »

Combinaison des réponses modales

Les réponses de 02 modes **successifs** « i » et « j » sont indépendantes si les valeurs des **périodes** qui leur sont associées **différent de plus de 10%**

Cas où toutes les réponses modales retenues sont indépendantes les unes des autres ?

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^K E_i^2} \quad (17C.23)$$

E : Réponse totale. Effet de l'action sismique considérée

E_i : valeur modale de E selon le mode « i »

K : nombre de modes retenus

Cas où 02 réponses modales ne sont pas indépendantes ?

2024

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^k E_i r_{ij} E_j} \quad (17C.24)$$

Avec

$$r_{ij} = \frac{8\xi^2(1 + \rho_{ij})\rho_{ij}^{2/3}}{(1 - \rho_{ij}^2)^2 + 4\xi^2\rho_{ij}(1 + \rho_{ij})^2}$$

$$\rho_{ij} = \frac{T_i}{T_j}; T_i \leq T_j$$

ξ : Valeur unique du % d'amortissement critique retenue pour tous les modes considérés

2003

$$E = \sqrt{(|E_1| + |E_2|) + \sum_{i=3}^K E_i^2}$$

Résultante des forces sismiques de calcul

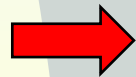
V_t obtenue par combinaison des valeurs modales $> 80\%$ de V_{MSE} pour ($T_{empirique}$)

Cas où $V_t \leq 0,80 V_{MSE}$?

Augmenter tous les paramètres de la réponse (forces, déplacements, moments,...) dans un rapport $0,8 V_{MSE}/V_t$

Effets de la torsion accidentelle

Cas des modèles plans
dans 02 directions ?



Effets de la torsion accidentelle d'axe vertical à prendre en charge (voir cas MSE)

Cas des modèles 3D ?



Excentricité théorique calculée + excentricité accidentelle = $\pm 0,05 L$ (L: dimension du plancher perpendiculaire à la direction de l'action sismique.
Au niveau de chaque plancher et suivant chaque direction

MSE et MDMS en commun

Stabilité au renversement ?

Le moment de renversement causé par l'action sismique doit être calculé par rapport au niveau du contact sol-fondation

Le moment stabilisant calculé en tenant compte du poids total de la construction, des poids des fondations et éventuellement du poids du remblai.

Faire une vérification de la stabilité au renversement (Voir 5.5 RPA)

MSE et MDMS en commun**Calcul des déplacements ?**

Le déplacement horizontal à chaque niveau « k » de la structure

2024

$$\delta_k = \frac{R}{Q_F} \delta_{ek} \quad (17C.25)$$

δ_{ek} : déplacement du aux forces sismiques (F_i) (y compris l'effet de torsion)

R : coefficient de comportement

QF: Coefficient de qualité

2003

$$\delta_k = R \delta_{ek}$$

Le déplacement relatif au niveau « k » par rapport au niveau « k-1 »

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \quad (17C.26)$$

2. Justification de la sécurité

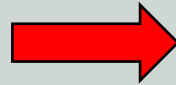
2003, 2024

Idem

La sécurité de la structure soumise à l'action sismique est atteinte si les 08 justifications sont satisfaites

08
Justifications

Vis à vis



- ✓ La résistance
- ✓ La ductilité
- ✓ L'équilibre d'ensemble
- ✓ La résistance des planchers
- ✓ La stabilité des fondations
- ✓ La largeur des joints sismiques
- ✓ L'effet $P-\Delta$
- ✓ Déplacements inter-étages

2. Justification de la sécurité

2024

New

i. Combinaisons d'action

- ✓ 02 composantes horizontales E_x et E_y , suivant 02 directions orthogonales dans le plan de la structure
- ✓ Une composante verticale E_z suivant l'axe vertical de la structure

Combinaisons horizontales

$$\begin{aligned} G + \psi Q + E_1 \\ G + \psi Q + E_2 \end{aligned} \quad (17C.27)$$

Avec

$$\begin{aligned} E_1 &= \pm E_x \pm 0.3 E_y \\ E_2 &= \pm 0.3 E_x \pm E_y \end{aligned} \quad \text{(Le plus défavorable)} \quad (17C.28)$$

Avec

$$E_x \text{ ou } E_y = F_{k, \text{ final}}$$

(Trans + Torsion)

G : Charges permanentes
Q : Charges d'exploitation non pondérées
 ψ : Coefficient d'accompagnement fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation (Voir poids total MSE).

Pas de combinaison suivant les 02 axes

Pour

Bâtiments respectant la régularité en plan et pour lesquels des voiles ou des systèmes triangulés indépendants dans les 02 directions sont les seuls éléments de contreventement.

Combinaisons verticales

$$G + \psi Q + E_3$$

$$G + \psi Q + E_4$$

$$G + \psi Q + E_5$$

(17C.29)

Avec

$$E_x \text{ ou } E_y =$$

$$F_{k, \text{ final}}$$

(Trans + Torsion)

Avec

$$E_3 = \pm E_x \pm 0.3 E_y \pm 0.3 E_z$$

$$E_4 = \pm 0.3 E_x \pm E_y \pm 0.3 E_z$$

$$E_5 = \pm 0.3 E_x \pm 0.3 E_y \pm E_z$$

(Le plus défavorable)

(17C.30)

G : Charges permanentes

Q : Charges d'exploitation non pondérées

ψ : Coefficient d'accompagnement fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation (Voir poids total MSE).

ii. Justification vis-à-vis de la résistance

Pour tous les éléments, leurs assemblages ainsi que les éléments non structuraux critiques

$$S_d = R_d \quad (17C.31)$$

S_d : Sollicitation agissante de calcul due aux différentes combinaisons, incluant l'effet du 2^{ème} genre

R_d : Sollicitation résistante de calcul de l'élément calculée en fonction des propriétés des matériaux

iii. Justification vis-à-vis de la ductilité

Exigences de ductilité satisfaites si toutes les dispositions constructives relatives au matériau et aux éléments structuraux définies dans les RPA sont appliquées

iv. Justification vis-à-vis l'équilibre d'ensemble

Se réfère à la stabilité d'ensemble du bâtiment ou de l'ouvrage, soumis à des effets de renversement et/ou de glissement dus aux sollicitations résultant des combinaisons d'actions.

Stabilité au **renversement** :
Coef Sécurité au min. **1.3**

Stabilité au **glissement** : Coef
Sécurité au min. **1.25**

v. Justification vis-à-vis de la résistance des planchers

La capacité des planchers doit permettre de transmettre aux éléments verticaux de contreventement les effets de forces sismiques de calcul

vi. Justification de la stabilité des fondations

Se référer aux prescriptions et/ou exigences données dans les RPA (voir chapitre X, Sols et fondations)

vii. Justification de la largeur des joints sismiques

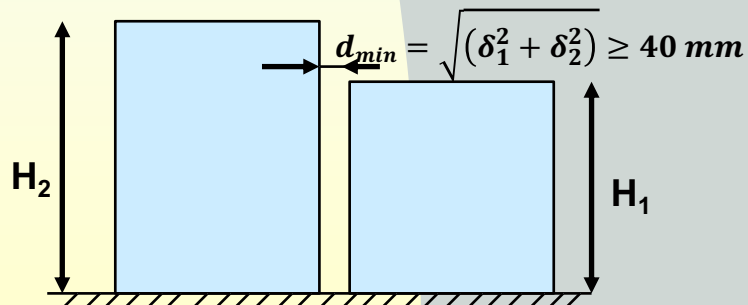
Le joint sismique entre 02 blocs voisins doit être :

2024

$$d_{min} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2)} \\ 40 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (17C.32)$$

2003

$$d_{min} = 15_{\text{mm}} + (\delta_1 + \delta_2)_{\text{mm}} \geq 40_{\text{mm}}$$



δ_1 et δ_2 : déplacements max des 02 blocs, calculés au niveau du sommet du bloc le moins élevé, y compris les composantes dues à la torsion et à la rotation des fondations

viii. Justification vis-à-vis de l'effet P-Δ

L'effet **P-Δ** peut être négligé si, à tous les niveaux

$$\theta_k = \frac{P_k \Delta_k}{V_k h_k} \leq 0,10 \quad (17C.33)$$

avec

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1}$$

$$P_k = \sum_{i=k}^n W_{Gi} + \psi W_{Qi} \quad V_k = \sum_{i=k}^n F_i$$

P_k : Poids total de la structure et des charges d'exploitation associées au dessus du niveau « k »

V_k : Effort tranchant d'étage au niveau « k »

Δ_k : Déplacement relatif du niveau « k » par rapport au niveau « k-1 »

h_k : hauteur d'étage « k »

- ✓ Si $0,10 \leq \theta_k \leq 0,20$ les effets P-Δ sont pris en compte de manière **approximative** en amplifiant les effets de l'action sismique calculés au moyen d'une analyse élastique du 1er ordre par le facteur $1/(1 - \theta_k)$
- ✓ Si $\theta_k \geq 0,20$, la structure est instable et doit être redimensionnée

ix. Justification vis-à-vis des déplacements inter-étages

Les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport à l'étage du dessous, réduits par le coefficient « ν » ne doit pas dépasser une valeur limite « $\overline{\Delta}_k$ » (voir tableau)

$$\nu_A \Delta_k \leq \overline{\Delta}_k$$

(17C.34)

type de structure	Déplacement « $\overline{\Delta}_k$ »
Bâtiments en acier	0.0100 h_k (1%)
Bâtiments en BA	0.0075 h_k (0.75 %)
Bâtiments en PAF	0.0050 h_k (0.50 %)
Bâtiments en bois	0.0075 h_k (0.75 %)
Bâtiments en maçonnerie chaînée	0.0050 h_k (0.50%)

ν_A : Coefficient réducteur pris égal à 0.50

h_k : hauteur d'étage « k »

2003

Les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents ne doivent pas dépasser **1% de la hauteur d'étage**

Merci. Fin du chapitre 17C

Dynamique des structures

Abdellatif MEGNOUNIF

Prochain Cours

Chap. 18B

**Prescriptions de dimensionnement
et dispositions constructives selon
les RPA (RPA 2024)**