

Dynamique des structures

Abdellatif MEGNOUNIF

e-mail: abdellatif_megnounif@yahoo.fr

Chap. 17

Règles Parasismiques Algériennes (RPA 99 Version 2003)

1. Introduction

DTR B-C 2-48

Approuvé par la commission technique permanente pour le contrôle technique de la construction (CTP) le 04 décembre 1999.

RPA 99 version 2003 : Continuité des RPA 81, version 1983 et RPA 88 dont il garde la philosophie originelle

11

parties

1. Définit leur domaine d'application et les conditions d'application.
2. Présente les règles générales de conception en zone sismique.
3. Donne les critères de classification des zones sismiques, des ouvrages, des sites et des systèmes de contreventement.
4. Présente les règles de calcul en insistant sur la méthode statique équivalente.
5. Résume les différentes justifications vis-à-vis de la sécurité
6. Concerne les prescriptions complémentaires et surtout les éléments non-structuraux.
7. Présente les prescriptions au dimensionnement des structures ou éléments de structures en béton armé coulé en place ainsi que les dispositions constructives les concernant.
8. Présente les dispositions au dimensionnement des structures en ossatures métalliques.
9. Traite des constructions en maçonnerie porteuse chaînée.
10. Présente les prescriptions concernant les fondations et murs de soutènement
11. Une annexe de classification des wilayas et communes d'Algérie est donnée dans cette partie.

2. Domaines d'application et conditions d'application

A toutes les constructions courantes, sauf



Si action, du vent est défavorable



- ✓ Centrales nucléaires, installations GNL, installation de fabrication et de stockage des produits inflammables, explosifs, toxiques, ou polluants,...même un dommage léger n'est pas toléré
- ✓ Ouvrages d'art (barrages, ouvrages maritimes, ponts, tunnels,...)
- ✓ Réseaux et ouvrages enterrés
- ✓ Structures en plaques et coques minces

- ✓ Ne s'applique pas en zone de séismicité négligeable de la classification des zones sismiques

Ce sont ces actions qu'il faut prendre en considération pour la vérification de la résistance et de la stabilité de l'ouvrage, avec respect des dispositions constructives des règles RPA

3. Règles générales de conception

i. Choix du site

Faire attention



- ✓ Aux failles reconnues actives
- ✓ Aux zones suspectes de liquéfaction.
- ✓ Aux terrains instables (pentes instables, abords de falaises, rives et berges sujettes à affouillement, terrains tassants, inondables, cavités souterraines, remblais non compactés, ...)
- ✓ À la topographie superficielle accidentée (crêtes, pitons rocheux, bords de vallées encaissées, abords de changement de pente importante,...)
- ✓ À la présence d'alluvion d'épaisseur variable en pied de pente ou d'épaisseur importante en milieu de vallées.
- ✓ À la présence de formations géologiques différentes.

Choix du site : arrêté à la base des résultats d'investigations qui peuvent être orientées par les résultats d'études de micro zonage sismique là où elles existent

ii. Reconnaissance et étude de sol

Obligatoires pour les ouvrages d'importance moyenne ou plus, implantés en zones de sismicité moyenne à élevée.

Exception faite pour les R+2 au maximum ou 11m de hauteur moyenne.

Doivent permettre de classer le site et de détecter les zones liquéfiables et/ou instables

En zones liquéfiables ou instables et aussi pour le calcul des propriétés mécaniques des sols, prévoir des reconnaissances et études complémentaires

iii. Implantation des ouvrages

Eviter ?

- ✓ Eviter la proximité immédiate d'une faille. 100 m (de part et d'autre) pour les ouvrages importants et 50 m pour les ouvrages d'importance faible.
- ✓ Eviter les terrains instables, les terrains à topographie accidentée et le bord des falaises
- ✓ Eviter les sols liquéfiables, les sols fortement fracturés, les sols faiblement cimentés et les zones de remblais.

iii. Implantation des ouvrages

Recommandé ?

- ✓ **Prioriser les sols rocheux et les sols fermes.**
- ✓ **Une couche d'appui des fondations suffisamment épaisse et qu'elle ne repose pas sur une couche instable.**
- ✓ **Eviter le phénomène de résonance en implantant les bâtiments élevés sur des sites rocheux ou fermes de faible épaisseur et les bâtiments bas sur des sites fermes ou meubles relativement épais.**
- ✓ **Une pente des talus dont la stabilité ne doit pas dépassée 2/3. Favoriser plusieurs blocs sur plates formes horizontales sur terrain en pente.**
- ✓ **Planter l'ouvrage d'un même côté d'une discontinuité telle que la fracture, contact de formations géologiques différentes,...sinon le scinder par joints en blocs distincts implantés de part et d'autre de la discontinuité.**

iv. Infrastructure et fondation

Infrastructure (y compris les éléments des sous sols) et fondations doivent former un ensemble résistant et rigide

Ensemble capable :

- ✓ **de transmettre les charges sismiques horizontales en plus des charges verticales.**
- ✓ **De limiter les tassements différentiels**
- ✓ **D'empêcher les déplacements horizontaux relatifs des points d'appui par solidarisation au moyen de longrines.**

Systeme de fondations homogène (superficielles, radier, pieux,...) avec un seul mode de fondation par bloc, délimité par des joints.

Il doit constituer une assise horizontale unique sur toute l'emprise du bloc

v. Superstructure

- ✓ Régularité en plan (**axisymétrie**) et en élévation.
- ✓ Prévoir des joints sismiques pour limiter les longueurs des bâtiments trop importants, séparer les blocs à rigidité et masse inégales et **simplifier les formes en plan**.
- ✓ Choisir des matériaux de **ductilité importante** pour une bonne déformation plastique et de rigidité acceptable pour limiter les problèmes de stabilité de forme.
- ✓ Prévoir et **bien disposer des contreventements** dans au moins les 02 directions horizontales pour reprendre une charge verticale suffisant, assurer une transmission directe des forces aux fondations et minimiser les effets de torsion.
- ✓ La structure et ses élément doivent avoir une ductilité suffisante pour dissiper une grande part de l'énergie communiquée par le séisme et conserver leur résistance de calcul sous déformations imposées.
- ✓ Favoriser les **rotules plastiques dans les poutres** et linteaux au lieu des poteaux et voiles.
- ✓ Tenir compte de la présence **d'éléments non structuraux** qui peuvent modifier le comportement de la structure et donner lieu à des désordres importants.

vi. Modélisation et méthodes de calcul

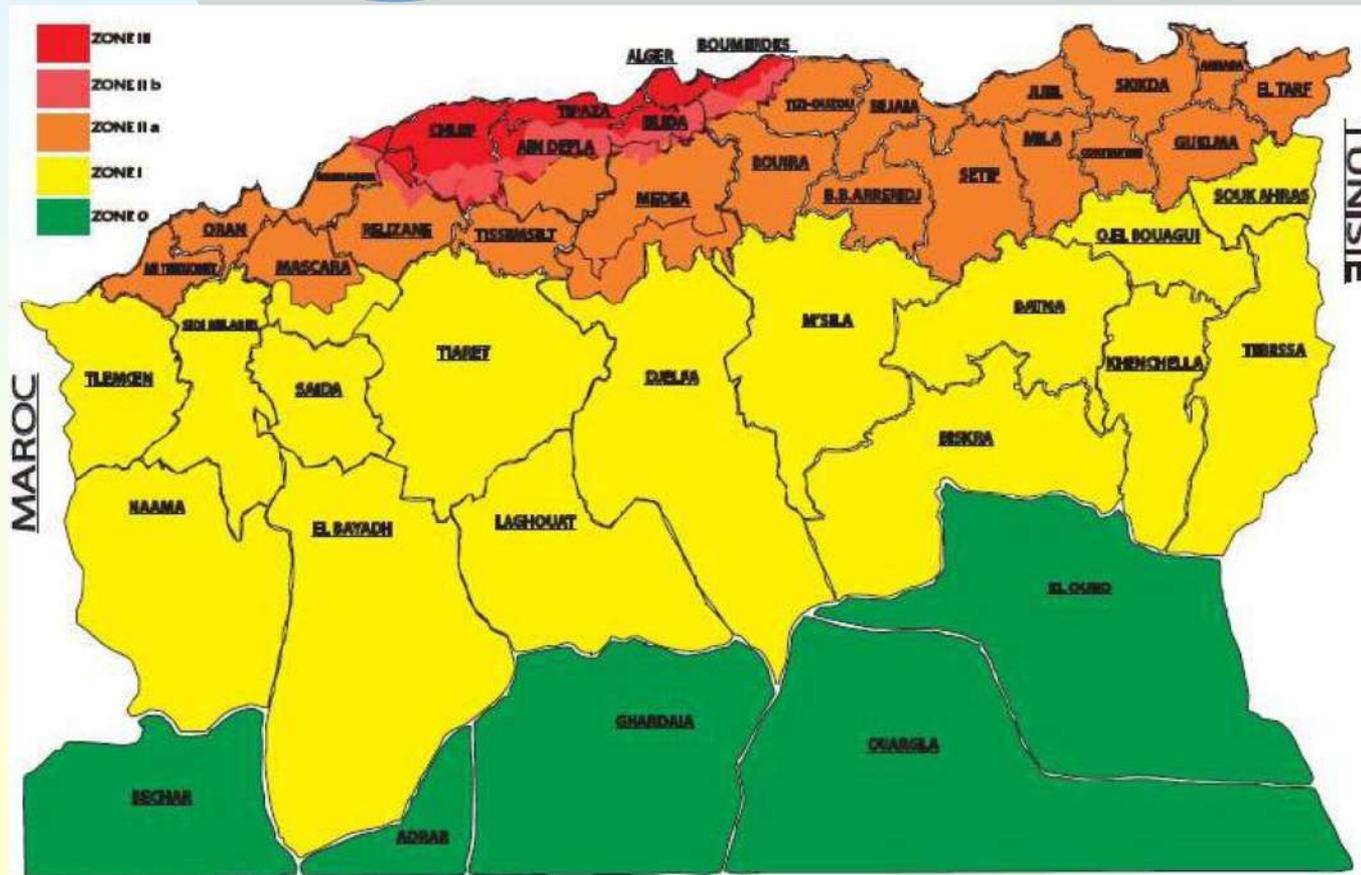
- ✓ **Reproduire au mieux** le comportement réel de l'ouvrage lors du choix des méthodes de calcul et de la modélisation.
- ✓ Les déformations post-élastiques sont admises dans ce règlement. On utilise les méthodes de **calcul linéaire équivalent** en considérant un comportement élastique de la structure sous l'effet d'un spectre de réponse comme action sismique.
- ✓ Le post élastique est pris en compte en utilisant un **coefficient de comportement**.
- ✓ On peut aussi utiliser **d'autres méthodes plus précises** et correctes sous réserve de justification scientifique appropriée.

4. Critères de classification

i. Classification des zones sismiques

05 zones de sismicité

- ✓ Zone 0 : sismicité négligeable
- ✓ Zone I : sismicité faible
- ✓ Zones IIa et IIb : sismicité moyenne
- ✓ Zone III : sismicité élevée



ii. Classification des ouvrages selon leur importance

Classification qui permet de protéger les personnes, puis les biens économiques et culturels de la communauté.

04 Groupes

Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale

- ❖ Centres de décisions stratégiques.
- ❖ Casernes pompiers, police, militaires,...
- ❖ Etablissement de santé.
- ❖ Établissement de communications
- ❖ Bâtiments de production et stockage d'eau potable
- ❖ Ouvrages à caractère culturel ou historique
- ❖ Centres de distribution et de production d'énergie
- ❖ Administratifs devant rester fonctionnels en cas de séisme

Groupe 1B : Ouvrages de grande importance

- ❖ (+ 300 personnes) mosquée, écoles, universités, sports, culturels,...
- ❖ Habitation collective +48m
- ❖ Bibliothèques et salles d'archive, musée,
- ❖ Établissements de santé (autre que gr 1A)
- ❖ Etablissements de production ou de distribution d'énergie (autre que gr 1A)
- ❖ Châteaux d'eau et réservoirs.

Groupe 2 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne

- ❖ Non classés en 1A, 1B ou 3
- ❖ Habitation collective - 48m
- ❖ Bâtiments pouvant accueillir +30 personnes
- ❖ Parkings,

Groupe 3 : Ouvrages de faible importance

- ❖ Bâtiments industriels ou agricoles abritant des biens de faibles valeurs
- ❖ Bâtiments à risque limité pour les personnes,
- ❖ Constructions provisoires

iii. Classification des sites

Catégories et critères de classification

04 Catégories

En fonction des propriétés mécaniques des sols

Catégorie S₁ : Rocheux

- ❖ Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement $V_s \geq 800$ m/s

- ❖ $PI > 5$ MPa
- ❖ $E_p > 100$ MPa
- ❖ $q_u > 10$ MPa
- ❖ $V_s \geq 800$ m/s

Essais de pénétromètre statique, SPT, pressiomètre, ...

- ✓ q_c : résistance de pointe
- ✓ N: nombre de coups
- ✓ PI : pression limite moyenne
- ✓ E_p Module pressiométrique
- ✓ q_u : résistance en compression simple
- ✓ V_s : vitesse des ondes de cisaillement

Catégorie S₂: Ferme

- ❖ Dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile surconsolidée sur 10 à 20m d'épaisseur avec $V_s \geq 400$ m/s à partir de 10m de profondeur

- ❖ $q_c > 15$ MPa
- ❖ $N > 50$
- ❖ $PI > 2$ MPa
- ❖ $E_p > 20$ MPa
- ❖ $q_u > 0,4$ MPa
- ❖ $400 \leq V_s < 800$ m/s

Catégorie S₃ : Meuble

- ❖ Dépôts épais de sables et de graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec $V_s \geq 200$ m/s à partir de 10m de profondeur

- ❖ $q_c = 1,5 \sim 15$ MPa
- ❖ $N = 10 \sim 50$
- ❖ $PI = 1 \sim 2$ MPa
- ❖ $E_p = 5 \sim 20$ MPa
- ❖ $q_u = 0,1 \sim 0,4$ MPa
- ❖ $200 \leq V_s < 400$ m/s

Catégorie S₄ : Très meuble

- ❖ Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle avec $V_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres
- ❖ Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec $V_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres

- ❖ $q_c < 1,5$ MPa
- ❖ $N < 10$
- ❖ $PI < 1$ MPa
- ❖ $E_p < 5$ MPa
- ❖ $q_u < 0,1$ MPa
- ❖ $100 \leq V_s < 200$ m/s

iii. Classification des sites

Classement du site selon la disponibilité des essais

Selon disponibilité et fiabilité des résultats d'essais, on peut classer le site dans la catégorie la plus appropriée. En cas de doute classer dans la catégorie immédiatement la plus défavorable.

Conditions de site nécessitant des investigations approfondies

Les suivants ?

- ❖ Présence de sols instables sous les actions sismiques : **sols liquéfiables, sols faiblement cimentés, anciens remblais**
- ❖ Présence de **sols vaseux ou d'argile** avec une très forte teneur en matière organique sur une épaisseur de plus de 3m
- ❖ Présence **d'argile très plastique** ($I_p > 75$) sur une épaisseur de plus de 6m
- ❖ Présence sur une épaisseur de plus de 30m d'une couche **d'argile molle** à moyennement raide ($q_c = 1,5$ à 5 MPa ; $p_l = 0,5$ à 2 MPa ; $E_p = 5$ à 25 MPa ; $q_u = 0,1$ à 0,4 MPa)

iv. Classification des systèmes de contreventement

Classification en tenant compte de la fiabilité des systèmes structuraux et de leur capacité de dissipation vis-à-vis de l'action sismique.

On fixe un coefficient de comportement à attribuer à chaque catégorie..

Béton armé
08 systèmes

23 systèmes

BA : 08 systèmes
Acier : 07 systèmes
Maçonnerie : 01 système
Autres : 07 systèmes

	Système de contreventement	Catégorie
1.a	<p>Portiques auto stables sans remplissage en maçonnerie rigide</p> <p>En cas de soft floor, le contreventement doit être assuré par un autre système comportant des voiles dans 02 directions orthogonales</p>	<p>Portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales.</p> <p>05 niveaux ou 17 m (Zone I) 04 niveaux ou 14 m (Zone IIa) 03 niveaux ou 11 m (Zone IIb et III)</p>
1.b	<p>Portiques auto stables avec remplissage en maçonnerie rigide</p> <p>En cas de soft floor, le contreventement doit être assuré par un autre système comportant des voiles dans 02 directions orthogonales</p>	<p>Portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales. Murs en maçonnerie insérés dans le cadre poteaux-poutres.</p> <p>05 niveaux ou 17 m (Zone I) 04 niveaux ou 14 m (Zone IIa) 03 niveaux ou 11 m (Zone IIb) 02 niveaux ou 08 m (Zone III)</p>

**Béton
armé**

08 systèmes

	Système de contreventement	Catégorie
2	Voiles porteurs en béton armé	Voiles uniquement ou voiles et portiques avec plus de 20% des sollicitations dues aux charges verticale reprises par les voiles. La sollicitation horizontale reprise uniquement par les voiles.
3	Structure en BA contreventée entièrement par noyau en BA	Bâtiment contreventé entièrement par un noyau rigide en BA reprenant la totalité de l'effort horizontal
4.a	Système de contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques avec justification d'interaction portiques-voiles	Voiles doivent reprendre au plus 20% des charges verticales. Les charges horizontales reprises conjointement par les voiles et les portiques selon leurs rigidités relatives et de leurs interactions à tous les niveaux. Portiques doivent aussi reprendre au 25% de l'effort tranchant d'étage
4.b	Système de contreventement de structures en portiques par des voiles en BA	Les voiles reprennent au plus 20% des charges verticales et la totalité des charges horizontales. Les portiques ne reprennent que les charges verticales. Limité à 10 niveaux ou 33m max

Béton
armé

08 systèmes

	Système de contreventement	Catégorie
5	Système fonctionnant en console verticale à masses réparties prédominantes	Cas d'un réservoir cylindrique, des silos et cheminées de forme cylindrique, et autre
6	Système à pendule inversé	50% ou plus de la masse est concentrée dans le tiers supérieur de la structure. Exemple Château d'eau sur pilotis ou réservoir d'eau cylindrique ou torique proéminent sur jupe cylindrique ou conique plus resserrée.

Acier

07 systèmes

	Système de contreventement	Catégorie
7	Ossature contreventée par portique auto stables ductiles	L'ossature complète (cadres inclus) reprend la totalité des charges verticales. Les portiques reprennent à eux seuls les charges horizontales
8	Ossature contreventée par portiques auto stables ordinaires	L'ossature complète (cadres inclus) reprend la totalité des charges verticales. Les portiques reprennent à eux seuls les charges horizontales Limité à 05 niveaux ou 17 m
9 (9.a et 9.b)	Ossature contreventée par des palées triangulaires concentriques. 9.a : palées triangulées en X 9.b : palées triangulées en V En K ne sont pas autorisées	L'ossature complète (cadres inclus) reprend la totalité des charges verticales et les palées reprennent la totalité des charges horizontales Limité à 10 niveaux ou 33 m En X : les axes de la diagonale, de la poutre et du poteau convergent en un seul point situé sur le centre du nœud de la palée En V : le point d'intersection des axes des diagonales de la palée se situe sur l'axe de la poutre.

Acier

07 systèmes

	Système de contreventement	Catégorie
10 (10.a et 10.b)	Ossature avec contreventements mixtes 10.a : mixte avec des palées en X 10.b : mixte avec des palées en V	Portiques ductiles combinés avec des palées triangulées. Les palées doivent reprendre au plus 20% des charges verticales L'ossature complète reprend la totalité des charges verticales. Les contreventements mixtes (cadres + palées) reprennent la totalité des charges horizontales. Les cadres ductiles doivent reprendre à eux seuls au moins 25% des charges horizontales
11	Portiques fonctionnant en console verticale	De faible degré d'hyperstaticité concerne essentiellement des portiques classiques à un seul niveau avec une traverse rigide, et des structures élancées de type « tube ». Ces structures se traduisent par un comportement dissipatif localisé uniquement aux extrémités des poteaux.

Maçonnerie

01 système

	Systeme de contreventement	Catégorie
12	Structures en maçonnerie porteuse chaînée (la maçonnerie porteuse ordinaire est interdite en zone sismique)	En maçonnerie de moellons ou petits éléments manufacturés et comportant des chaînages en BA mis en œuvre après exécution de la maçonnerie. Résistent en même temps aux charges verticales et horizontales. 05 niveaux ou 17 m en Zone I 04 niveaux ou 14 m en zone IIa 03 niveaux ou 11 m Zones IIb et III

Autres
structures

05 systèmes

	Système de contreventement	Catégorie
13	Structures à ossature métallique avec contreventement par diaphragme	Résistent à l'action sismique par l'effet de diaphragmes des parois verticales (murs) et horizontales (planchers).
14	Structure à ossature métallique avec contreventement par noyau en BA	Même définition que pour ossature en BA (système 3)
15	Structure à ossature métallique avec contreventement par voiles en BA	Même définition que pour structure en portiques en BA (système 4.b)
16	Structure à ossature métallique avec contreventement mixte composé d'un noyau en BA et de palées et/ou portiques métalliques en périphérique	
17	Système comportant des transparences (étages souples) (Soft floor)	Les niveaux de réception ou lobbies des grands hôtels, ... Généralement, il faut les éviter. Sinon, outre la pénalisation par un coefficient de comportement adéquat, il y a lieu de prendre toutes les dispositions à même d'atténuer les effets défavorables prévisibles.

v. Classification des ouvrages selon leur configuration

Selon configuration en plan et en élévation.
Régulier ou non régulier



Régularité en plan &
Régularité en élévation

		Définitions
Régularité en plan	a1	Configuration symétrique vis-à-vis de 02 directions orthogonales pour la distribution des rigidités et des masses
	a2	Distance entre centre de gravité des masses et centre de rigidité ne dépasse pas 15% de la dimension du bâtiment mesurée perpendiculairement à direction de l'action sismique considérée et ceci pour chaque niveau et chaque direction de calcul
	a3	Forme du bâtiment compact avec longueur/largeur du plancher ≤ 4 . La somme des dimensions des parties rentrantes ou saillantes $< 25\%$ de la dimension totale du bâtiment dans la direction considérée
	a4	Planchers avec rigidité suffisante vis-à-vis de celle des contreventements verticaux (planchers rigides). La surface totale des ouvertures de plancher $< 15\%$ de la surface du plancher.
Elévation	b1	Pas de discontinuité dans l'élément porteur vertical (pb de transmission directe de la charge à la fondation)
	b2	Pas de changements brusques (constantes ou progressif) de la raideur et de la masse d'un niveau à un autre (de la base au sommet)
	b4	Pour les décrochements en élévation, la variation des dimensions en plan entre 02 niveaux successifs $< 20\%$ dans les 02 directions de calcul et ne s'effectue que dans le sens d'une diminution avec la hauteur. La plus grande dimension latérale $\leq 1,5$ sa plus petite dimension



5. Règles de calcul

i. Choix de la méthode

03
méthodes

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

MSE



- ❖ Bâtiments réguliers en plan et en élévation avec une hauteur max de 65 m en zones I, Iia et Iib et 30 m en zone III
- ❖ Bâtiments irréguliers de hauteur max de 65 m en zones I, Iia et Iib et 30 m en zone III avec :
- ❖ Zone I : tous groupes
- ❖ Zone Iia : Gr 3; Gr 2 si $h < 7$ niv ou 23 m ; Gr 1B si $h < 5$ niv ou 17 m ; Gr 1A si $h < 3$ niv ou 10 m
- ❖ Zones Iib et III : Gr 3 et 2 si $h < 5$ niv ou 17 m ; Gr 1B si $h < 3$ niv ou 10 m ; Gr 1A si $h < 2$ niv ou 8 m.

**Méthodes
dynamiques**



- ❖ 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.

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

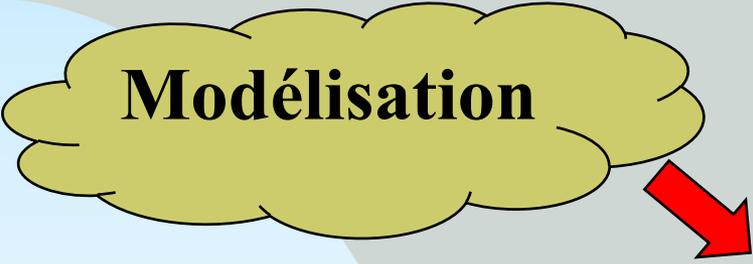
- Très ancienne, plus simple et la plus utilisée.
- Consiste à remplacer les forces dynamiques par des forces statiques équivalentes.
- Le **mouvement du sol** peut se faire dans une direction quelconque dans le plan horizontal.
- Les forces sismiques horizontales équivalentes seront considérées appliquées successivement suivant **02 directions orthogonales** 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.

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.

Force sismique totale

$$V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} W \quad (17.1)$$

Avec:

A : Coefficient d'accélération de zone

D : Coefficient d'amplification dynamique moyen.

R : Coefficient de comportement global de la structure

Q : Facteur de qualité

W : Poids total de la structure.

ii. Méthode statique équivalente

D'où vient cette formule ?

$$V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} W = R^* D W \quad (17.1)$$

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

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

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

et

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

$$L_1 = \phi_1^T M \{\Delta\}$$

D : accélération spectrale exprimée en « g »

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

ii. Méthode statique équivalente

A : Coefficient d'accélération de zone

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

Dépend de la zone sismique et du groupe d'usage du bâtiment :

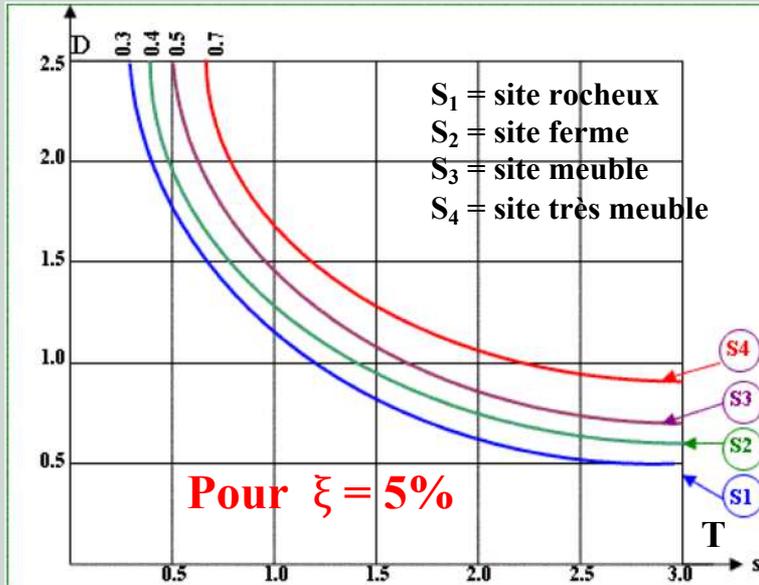
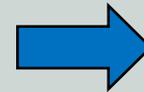
	ZONE			
Groupe	I	Ila	Ilb	III
1A	0,15	0,25	0,30	0,40
1B	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

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

D : Facteur d'amplification dynamique moyen

Dépend de la catégorie du site, du facteur de correction d'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure (T):

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0 \text{ s} \\ 2.5\eta \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T > 3.0 \text{ s} \end{cases} \quad \xi = 5\%$$



T2 est une période caractéristique du site est donnée par :

Site	S1	S2	S3	S4
T1(s)	0,15	0,15	0,15	0,15
T2(s)	0,30	0,40	0,50	0,70

Facteur de correction d'amortissement

$$\eta = \sqrt{7 / (2 + \xi)} \geq 0,7$$

Pour $\xi = 5\%$ on a $\eta = 1$

Valeurs de ξ (%)

	Portiques		Voiles ou murs
	BA	Acier	BA/Maçonnerie
Leger	6	4	10
Dense	7	5	

R: Coefficient de comportement global de la structure

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

Valeur unique. Dépend du système de contreventement (déjà défini).

En cas d'utilisation de systèmes de contreventements différents dans les 02 directions prendre la valeur la plus petite de R

		Système de contreventement	R
Béton armé	1.a	Portiques auto stables sans remplissage en maçonnerie rigide	5
	1.b	Portiques auto stables avec remplissage en maçonnerie rigide	3,5
	2	Voiles porteurs en béton armé	3,5
	3	Structure en BA contreventée entièrement par noyau en BA	3,5
	4.a	Mixte portiques / voiles avec interaction	5
	4.b	Portiques contreventés par des voiles en BA	4
	5	Console verticale à masses réparties	2
	6	Système à pendule inversé	2
Acier	7	Portiques auto stables ductiles	6
	8	Portiques auto stables ordinaires	4
	9.a	Ossature contreventée par des palées triangulaires en X.	4
	9.b	Ossature contreventée par des palées triangulaires en V.	3
	10.a	Mixte portiques / palées triangulaires en X	5
	10.b	Mixte portiques / palées triangulaires en V	4
	11	Portiques en console verticale	2

R: Coefficient de comportement global de la structure

		Système de contreventement	R
Maçonnerie	12	Maçonnerie porteuse chaînée	2,5
Autres systèmes	13	Ossature métallique avec contreventement par diaphragme	2
	14	Ossature métallique avec contreventement par noyau en BA	3
	15	Ossature métallique avec contreventement par voiles en BA	3,5
	16	Ossature métallique avec contreventement mixte composé d'un noyau en BA et de palées et/ou portiques métalliques en périphérique	4
	17	Système comportant des transparences (étages souples) (Soft floor)	2

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

Q : Facteur de qualité

$$Q = 1 + \sum_{1}^{5} P_q$$

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

Critère q	P _q	
	Observé	Non observé
1. Conditions minimales sur les files de contreventement Systèmes de portiques: chaque file doit comporter à tous les niveaux au moins 03 travées (rapport < 1,5). Travées peuvent être des voiles de contreventement. Système de voiles: chaque file doit comporter à tous les niveaux au moins 01 trumeau ayant (hauteur étage / largeur) < 0,67 ou bien 02 trumeaux ayant rapport < 1,0. Trumeau sans ouverture sur toute la hauteur de l'étage	0	0,05
2. Redondance en plan Chaque étage, en plan, au moins 04 files de portiques et/ou de voiles dans la direction des forces horizontales disposés symétriquement avec un rapport entre valeurs maximale et minimale d'espacement < 1,5	0	0,05
3. Régularité en plan Déjà défini	0	0,05
4. Régularité en élévation Déjà défini	0	0,05
5. Contrôle de la qualité des matériaux Essais systématiques sur les matériaux à réaliser	0	0,05
6. Contrôle de la qualité de l'exécution Mission de suivi des travaux qui doit comprendre une supervision des essais effectués sur les matériaux	0	0,10

W : Poids total de la structure

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

$$W = \sum_{i=1}^n W_i$$

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

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

Cas	Type d'ouvrage	β
1	Bâtiments d'habitation, bureaux ou assimilés	0,20
2	Bâtiments recevant du public temporairement:	
	✓ Salles d'exposition, de sport, lieux de culte, salles de réunions avec places debout	0,30
	✓ 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

Estimation de la période fondamentale de la structure

D (T) ?



« T » ?

Formule empirique ou méthodes analytiques

Empirique

$$T = C_T h_N^{3/4} \quad (17.2)$$

- ✓ 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	Portiques auto stables en BA sans remplissage en maçonnerie	0,075
2	Portiques auto stables en acier sans remplissage en maçonnerie	0,085
3	Portiques auto stables en BA ou en acier avec remplissage en maçonnerie	0,050
4	Contreventement assuré partiellement ou totalement par des voiles en BA, des palées triangulées et des murs en maçonnerie	0,050

Cas 3 et 4 : On peut aussi prendre

$$T = 0,09 h_N / \sqrt{D} \quad (17.3)$$

D: dimension du bâtiment mesurée à sa base dans la direction de calcul considérée

Prendre Min des
02 (17.2) et (17.3)

Estimation de la période fondamentale de la structure

Ou bien

Formule de Rayleigh

$$T = 2\pi \sqrt{\left(\sum_i^n W_i \delta_i^2 \right) / \left(g \sum_i^n f_i \delta_i \right)} \quad (17.4)$$

- ✓ 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

Ou bien

Version simplifiée de la formule de Rayleigh

$$T = 2\pi \sqrt{\delta_N} \quad (17.5)$$

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

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%

Distribution verticale de la force sismique résultante

Suivant la hauteur

$$V = F_t + \sum F_i \quad (17.6) \quad \checkmark F_t : \text{Force concentrée au sommet (influence des modes supérieurs de vibration).}$$

Avec

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

$$F_t = 0 \quad \text{Pour : } T \leq 0,7 \text{ s} \quad (17.7)$$

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

$$F_i = \frac{(V - F_t) W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (17.8)$$

ii. Méthode statique équivalente

D'où vienne cette distribution verticale ?

$$F_i = \frac{(V - Ft)W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (17.8)$$

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

$$F_k = M \phi_1 \frac{L_1}{M_1} S_A(\omega_1, \xi_1) \quad (17.8b) \quad L_n = \phi_n^T M \{\Delta\}$$

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

En remplaçant dans (17.8b) $F_k = \frac{M \phi_1}{L_1} V_{0max}$ **Or** $L_1 = \phi_1^T M \{\Delta\} = \sum_{j=1}^n M_j \phi_{1j}$

D'où $F_k = \frac{M \phi_1}{\sum_{j=1}^n M_j \phi_{1j}} V_{0max} \quad (17.8c)$

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 »

$$V_k = F_t + \sum_{i=k}^n F_i \quad (17.9)$$

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.

$$R_k = \frac{T_k}{\Delta_k} \quad (17.10)$$

Avec:

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

Déplacement relatif entre 02 étages consécutives

(17.11)

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:

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

Effort tranchant additionnel

$$T_{j,Supp} = \varphi_j d_j R_j \quad (17.12)$$

$\Delta_{j,Supp}$: 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

$$F_{k,Torsion} = T_{k,Supp} - T_{k+1,Supp}$$

La force sismique totale (Translation + Rotation)

$$\begin{array}{ll} F_{k,Totale} = F_{k,Trans} + F_{k,Torsion} & \text{Si } F_{k,Torsion} > 0 \\ F_{k,Totale} = F_{k,Trans} & \text{Si } F_{k,Torsion} < 0 \end{array} \quad (17.13)$$

Rigidité à la torsion

$$J_k = \sum_{j=1}^3 R_{jx} d_{jy}^2 + \sum_{j=1}^5 R_{jy} d_{jx}^2 \quad (17.14)$$

Avec

Moment de torsion au niveau « k »

$$M_{t,k} = T_x e_y + T_y e_x \quad (17.15)$$

Rotation par torsion au niveau « k »

$$\varphi_{t,k} = \frac{M_{t,k}}{J_k} \quad (17.16)$$

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. Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

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 et ceci dans chacune des 02 directions de calcul.
- Pour les structures irrégulières (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

Spectre de
réponse de
calcul

$\frac{S_a}{g}$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25 A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5 \eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0 s \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T > 3.0 s \end{cases} \quad (17.17)$$

Avec:

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0.7 \quad \xi: \text{en } \% \quad (17.18)$$

T_1 et T_2 : périodes caractéristiques associées à la catégorie du site

Site	S1	S2	S3	S4
T1(s)	0,15	0,15	0,15	0,15
T2(s)	0,30	0,40	0,50	0,70

Nombre de modes à considérer

Cas de modèles **plans dans 02** directions orthogonales, le nombre de modes 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 :

$$K \geq 3\sqrt{N} \quad \text{Et} \quad T_K \leq 0,2 \text{ s} \quad (17.19)$$

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

Combinaison des réponses modales

Les réponses de 02 modes « i » et « j » sont **indépendantes** si :

$$r = \frac{T_i}{T_j} \leq \frac{10}{(10 + \sqrt{\xi_i \xi_j})} \quad (17.20)$$

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

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^K E_i^2} \quad (17.21)$$

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

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

K : nombre de modes retenus

Cas où 02 réponses modales ne sont pas indépendantes ?

$$E = \sqrt{(|E_1| + |E_2|) + \sum_{i=3}^K E_i^2} \quad (17.22)$$

Résultante des forces sismiques de calcul

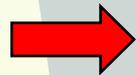
V_t obtenue par combinaison des valeurs modales $> 80\%$ de V_{MSE}

Cas où $V_t < 0,80 V_{MSE}$?

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 = $0,05 L$ (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.

Composante verticale de l'action sismique ?

En zone III et pour des **porte-à-faux de plus de 1,50 m**, les effets de la composante verticale sismique doivent être pris en compte.

Donc, outre la force descendante adéquate, une force minimale ascendante doit être prise en considération.

$$(17.23) \quad F_V = 0,5 A W_p$$

W_p : poids propre de l'élément en porte à faux
 A : coefficient sismique de zone

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

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

$$\delta_k = R \delta_{ek} \quad (17.24)$$

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

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

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \quad (17.25)$$

6. Justification de la sécurité

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 $P-\Delta$
- ✓ Les déformations

i. Combinaison d'action

Sollicitations de calcul

$$G + Q + E$$

$$0,8 G + E$$

$$0,8 G - E$$

Pour les poteaux (ossatures auto stables)

$$G + Q + 1,2 E$$

$$0,8 G + E$$

$$0,8 G - E$$

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

(Trans + Torsion)

ii. Justification vis-à-vis de la résistance

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

$$S_d = R_d \quad (17.25)$$

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

R_d : Sollicitation résistante de calcul 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.

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

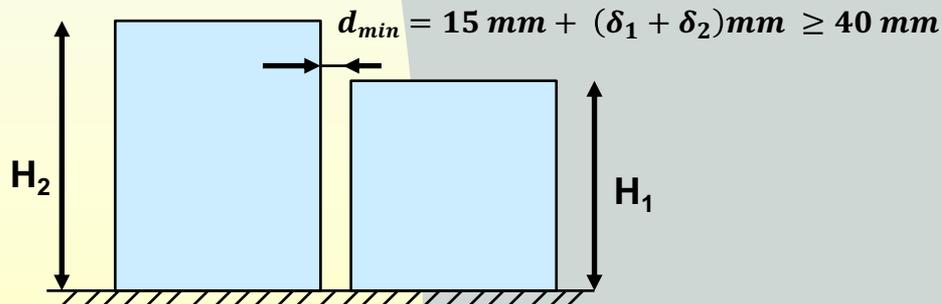
vi. Justification de la stabilité des fondations

Se référer aux prescriptions et/ou exigences données dans les RPA (voir chapitre 18, fondations et ouvrages de soutènement)

vii. Justification de la largeur des joints sismiques

Le joint sismique entre 02 blocs voisins doit être :

$$d_{min} = 15 \text{ mm} + (\delta_1 + \delta_2) \text{ mm} \geq 40 \text{ mm} \quad (17.26)$$



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

$$\theta = \frac{P_k \Delta_k}{V_k h_k} \leq 0,10 \quad (17.27)$$

avec

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

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 $0,10 < \theta \leq 0,20$ 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 $1/(1 - \theta)$
- ✓ Si $\theta > 0,20$, la structure est instable et doit être redimensionnée

ix. Justification vis-à-vis des déformations

Les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages adjacents doivent être $< 1,0$ % de la hauteur de l'étage, sauf si c'est prouvé qu'un déplacement relatif plus grand est toléré

Merci. Fin du chapitre 17

Dynamique des structures

Abdellatif MEGNOUNIF

Prochain Cours

Chap. 18

**Prescriptions de dimensionnement
et dispositions constructives selon
les RPA (RPA 99 Version 2003)**