

REGLES DE CALCUL

4	REGLES DE CALCUL	73
4.1	Choix de la méthode de calcul	
4.2	Méthode statique équivalente	
4.3	Méthode d'analyse modale spectrale	
4.4	Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes	
4.5	Prescriptions communes aux méthodes d'analyse	



4. REGLES DE CALCUL

4.1 Choix de la méthode de calcul

4.1.1 Méthodes utilisables

Le calcul des forces sismiques peut être mené suivant trois méthodes:

- la méthode statique équivalente
- la méthode d'analyse modale spectrale
- la méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes

4.1.2 Conditions d'application de la méthode statique équivalente

La méthode statique équivalente peut être utilisée dans les conditions suivantes :

- a) Le bâtiment, ou bloc étudié, satisfait aux conditions de régularité en plan et, en élévation prescrites au § 3.7, avec une hauteur au plus égale à 65m en zones (I, II et III) et à 32 m en zones (IV, V et VI).
- b) Le bâtiment, ou bloc étudié, présente une configuration irrégulière tout en respectant, outre les conditions de hauteur énoncées en a), les conditions complémentaires indiquées au Tableau (4.1).

4.1.3 Méthodes dynamiques

- a) La méthode d'analyse modale spectrale peut être utilisée dans tous les cas et, en particulier, dans le cas où la méthode statique équivalente n'est pas permise.
- b) La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes peut être utilisée, au cas par cas, par un personnel qualifié, ayant justifié auparavant 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.

Zone sismique	Groupe d'importance			
	1A	1B	2	3
I et II	(*)	(*)	(*)	(*)
III et IV	≤ 3 niveaux et ≤ 11 m	≤ 5 niveaux et ≤ 17 m	≤ 7 niveaux et ≤ 23 m	≤ 7 niveaux (*)
V et VI	≤ 2 niveaux et ≤ 8 m	≤ 3 niveaux et ≤ 11 m	≤ 5 niveaux et ≤ 17 m	≤ 5 niveaux et ≤ 17 m

Nota: (*) signifie qu'il n'y a aucune limitation de nombre de niveaux ou de hauteur

Table 4.1: Conditions d'application de la méthode statique équivalente

4.2 Méthode statique équivalente

4.2.1 Principe

Les forces réelles dynamiques, qui se développent dans la construction, sont remplacées par un système de forces statiques fictives dont les effets sont considérés équivalents à ceux de l'action sismique.

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 deux directions orthogonales caractéristiques choisies par le projeteur. Dans le cas général, ces deux directions sont les axes principaux du plan horizontal de la structure.

Il faut souligner, toutefois, que les forces et les déformations obtenues pour l'élément, à partir des méthodes d'analyse statiques, pour les charges de conception recommandées, sont inférieures aux forces et aux déformations qui seraient observées sur la structure, sous les effets d'un séisme majeur pour lequel les charges ont été spécifiées. Ce dépassement des forces est équilibré par le comportement ductile qui est fourni par les détails de construction de l'élément.

C'est pourquoi l'utilisation de cette méthode ne peut être dissociée 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 majeures

4.2.2 Modélisation

- a) Le modèle du bâtiment à utiliser, dans chacune des deux directions de calcul, est plan avec les masses concentrées au centre de gravité des planchers et un seul degré de liberté, en translation horizontale par niveau, sous réserve que les systèmes de contreventement dans les deux (2) directions puissent être découplés.
- b) La rigidité latérale des éléments porteurs du système de contreventement est calculée, à partir de sections non fissurées, pour les structures en béton armé ou en maçonnerie.
- c) Seul le mode fondamental de vibration de la structure est considéré dans le calcul de la force sismique totale.

4.2.3 Calcul de la force sismique totale

La force sismique totale, V , appliquée à la base de la structure, doit être calculée successivement dans deux directions horizontales orthogonales, selon Eqn. (4.1) :

$$V = \lambda \cdot \frac{S_{ad}}{g} (T_0) \cdot W \quad (4.1)$$

avec:

$\frac{S_{ad}}{g} (T_0)$: Ordonnée du spectre de calcul (cf. § 3.3.3) pour la période T_0 ;

T_0 : Période fondamentale de vibration du bâtiment, pour le mouvement de translation dans la direction considérée (cf. § 4.2.4).

λ : Coefficient de correction

$$\lambda = \begin{cases} 0.85 : \text{si } T_0 \leq (2.T_2) \text{ et si le bâtiment a plus de 2 niveaux} \\ 1, \text{ autrement} \end{cases} \quad (4.2)$$

Commentaire :

Le coefficient λ traduit le fait que, dans les bâtiments d'au moins 3 niveaux avec des degrés de liberté de translation dans chaque direction horizontale, la masse modale effective du premier mode (fondamental) est inférieure, en moyenne de 15%, à la masse totale du bâtiment.

W : Poids sismique total du bâtiment. Il est égal à la somme des poids W_i , calculés à chaque niveau « i »:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i, n \text{ étant le nombre de niveaux} \quad (4.3)$$

où:

$W_i = W_{Gi} + \psi \cdot W_{Qi}$, pour tout niveau i de la structure

- W_{Gi} : Poids dû 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 et donné au Tableau (4.2).

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

Table 4.2: Valeurs du coefficient d'accompagnement ψ , pour la charge d'exploitation Q_i

4.2.4 Estimation de la période fondamentale de la structure

La période fondamentale de la structure peut être évaluée de diverses manières:

1. La valeur de la période fondamentale (T_0) de la structure peut être estimée à partir de formules empiriques ou calculée par des méthodes analytiques ou numériques.

2. La formule empirique à utiliser selon les cas est la suivante :

$$T_{empirique} = C_T \cdot (h_N)^{3/4} \quad (4.4)$$

avec:

- $T_{empirique}$ [unité en s]: période fondamentale
- h_N [unité en m]: Hauteur mesurée 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 et donné par Table.(4.4).

Cas	Système de contreventement	C_T
1	Ossatures spatiales en béton armé sans remplissage en maçonnerie	0.075
2	Portiques spatiaux en acier sans remplissage en maçonnerie	0.085
3	Ossature en portiques en béton armé ou en acier avec remplissage en maçonnerie	0.050
4	Autres types de structures	0.050

Table 4.3: Valeurs du coefficient C_T

3. La valeur de T_0 peut être calculée avec la **formule de Rayleigh** ou une version simplifiée de cette formule :

a.

$$T_{calcul} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum (W_i \delta_i^2)}{g \cdot \sum_i^n (f_i \delta_i)}} \quad (4.5)$$

T_{calcul} [en s]: période fondamentale

f_i [unité: S.I.]: système de forces horizontales, distribuées selon les formules de répartition de V suivant la verticale.

g [unité: S.I.]: accélération de la pesanteur.

δ_i [unité: m]: 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 [unité: S.I.] :poids calculé à chaque niveau (i)

b. : **Version simplifiée de la formule de Rayleigh:**

$$T_{calcul} = 2 \cdot \sqrt{\delta_N} \quad (4.6)$$

avec:

- T_{calcul} [unité: s]: période fondamentale
- δ_N [unité: m]: flèche horizontale, au sommet du bâtiment, due aux forces latérales.

4. Dans le cadre de l'application de la méthode statique équivalente développée, cf. § 4.2, les valeurs de (T_0), calculées à partir des formules de Rayleigh ou de méthodes numériques, ne doivent pas dépasser de plus de 30% celle estimée à partir de la formule empirique (cf. Eqn. (4.4)) .

La valeur à utiliser, dans la méthode statique équivalente, est alors égale à: $T_{max} = 1.3 T_{empirique}$

Le Tableau (4.4) donne les valeurs de la période, (T_0), à utiliser dans la formule de calcul de l'effort tranchant à la base V.

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

Table 4.4: Valeur de la période (T_0) pour le calcul de l'effort tranchant à la base V

4.2.5 Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur

La résultante des forces sismiques à la base, V , doit être distribuée sur la hauteur de la structure selon Eqns.(4.7) & (4.8):

$$V = F_t + \sum_{i=k}^n F_i \quad (4.7)$$

La force concentrée F_t , au sommet de la structure, permet de tenir compte de l'influence des modes supérieurs de vibration. Elle doit être déterminée par la formule: ($F_t = 0.07T_0.V$), où (T_0) est la période fondamentale de la structure (T : unité en secondes).

La valeur de F_t ne dépassera en aucun cas ($0.25V$) et sera prise égale à (0 pour $T_0 \leq 0.7s$).

La partie restante de V , soit ($V - F_t$), doit être distribuée sur la hauteur de la structure suivant Eqn. (4.8):

$$F_i = \frac{(V - F_t).W_i.h_i}{\sum_{j=1}^n W_j.h_j} \quad (4.8)$$

où :

F_t : effort horizontal revenant au niveau i

h_i : niveau du plancher où s'exerce la force F_t

h_j : niveau du plancher quelconque

W_i, W_j : poids revenant aux planchers i et j , respectivement.

4.2.6 Distribution horizontale des forces sismiques

L'effort tranchant au niveau de l'étage k est donné par Eqn. (4.9):

$$V_k = F_t + \sum_{i=k}^n F_i \quad (4.9)$$

Dans le cas de structures comportant des planchers rigides dans leur plan, l'effort tranchant est distribué aux éléments verticaux de contreventement, proportionnellement à leurs rigidités relatives.

4.2.7 Effet de la torsion d'axe vertical

L'augmentation de l'effort tranchant, provoqué par la torsion d'axe vertical due à l'excentricité entre le centre de gravité et le centre de rigidité, doit être prise en compte. Les efforts tranchants négatifs, dus à la torsion, devront être négligés.

Pour toutes les structures comportant des planchers ou diaphragmes horizontaux rigides dans leur plan, on supposera qu'à chaque niveau et dans chaque direction de calcul, la résultante des forces horizontales a une excentricité, par rapport au centre de torsion, égale à la plus grande des deux valeurs:

- 5% dans la direction de calcul du bâtiment à ce niveau (cette excentricité doit être prise en considération, de part et d'autre du centre de torsion) ;
- excentricité théorique résultant des plans.

4.2.8 Composante verticale de l'action sismique

Les effets de la composante verticale sont pris en compte dans le calcul selon les critères énoncés au § 5.2.2.

4.3 Méthode d'analyse modale spectrale

4.3.1 Principe

Par cette méthode, il est recherché, pour chaque mode de vibration, le maximum des effets engendrés, dans la structure, par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul (cf. § 3.3.3). Ces effets sont, par la suite, combinés pour obtenir la réponse de la structure.

4.3.2 Modélisation

La modélisation doit considérer divers aspects:

- Pour les structures régulières en plan, comportant des planchers rigides, l'analyse peut être faite séparément dans chacune des deux directions principales du bâtiment. Celui-ci est alors représenté, dans chacune des deux directions de calcul, par un modèle plan, encastré à la base et où les masses sont concentrées au niveau des centres de gravité des planchers avec un seul DDL (Degré De Liberté) en translation horizontale.
- Pour les structures irrégulières en plan, sujettes à la torsion et comportant des planchers rigides, elles sont représentées par un modèle tridimensionnel, encastré à la base et où les masses sont concentrées au niveau des centres de gravité des planchers avec trois (03) DDL (2 translations horizontales et une rotation d'axe vertical).
- Pour les structures régulières ou non, comportant des planchers flexibles, elles sont représentées par des modèles tridimensionnels encastrés à la base et modélisant, de manière adéquate, les masses et les rigidités.
- La déformabilité du sol de fondation doit être prise en compte, par toute méthode scientifiquement prouvée, toutes les fois où la réponse de la structure en dépend de façon significative.
- Le modèle de bâtiment, à utiliser, doit représenter, au mieux, les distributions des rigidités et des masses de façon à prendre en compte tous les modes de déformation significatifs dans le calcul des forces d'inertie sismiques (exemple: contribution des zones nodales et des éléments non-structuraux à la rigidité du bâtiment).
- Dans le cas des bâtiments en béton armé ou en maçonnerie, la rigidité des éléments porteurs est calculée en considérant les sections non fissurées.

4.3.3 Nombre de modes à considérer

- Le nombre de modes de vibration de translation, à retenir dans chacune des deux directions d'excitation, doit être tel que :
 - la somme des masses modales, effectives pour les modes retenus, soit égale à 90%, au moins, de la masse totale de la structure.
 - ou que tous les modes, ayant une masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale de la structure, soient retenus pour la détermination de la réponse totale de la structure.

Le minimum de modes à retenir est de trois (03), dans chaque direction considérée.

- Dans le cas où les conditions, décrites en a), ne peuvent pas être satisfaites, à cause de l'influence importante des modes de torsion, le nombre minimal de modes, (k), à retenir doit être tel que:

$$k \geq 3.\sqrt{N} \quad \text{et} \quad T_k \leq 0.2s \tag{4.10}$$

où: N est le nombre de niveaux au dessus du sol et T_k est la période du mode k .

4.3.4 Combinaison des réponses modales

- a) Les réponses de deux modes de vibration, "i" et "j" successifs, sont considérées comme indépendantes si les valeurs des périodes qui leur sont associées diffèrent de plus de 10%.
- b) Dans le cas où toutes les réponses modales retenues sont indépendantes les unes des autres, la réponse totale est donnée par Eqn. (4.11):

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k E_i^2} \quad (4.11)$$

où :

E : effet de l'action sismique considérée

E_i : valeur modale de E , selon le mode "i"

k : nombre de modes retenus

- c) Dans le cas où deux réponses modales ne sont pas indépendantes, la réponse totale est donnée par Eqn. 4.12:

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k E_i \cdot r_{ij} \cdot E_j} \quad (4.12)$$

avec le facteur de corrélation :

$$r_{ij} = \frac{8 \cdot \xi^2 \cdot (1 + \rho_{ij}) \cdot \rho_{ij}^{3/2}}{(1 - \rho_{ij}^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \rho_{ij} \cdot (1 + \rho_{ij})^2} \quad (4.13)$$

et

$$\rho_{ij} = \frac{T_i}{T_j} \quad \text{avec} \quad T_i \leq T_j \quad (4.14)$$

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

4.3.5 Résultante des forces sismiques de calcul

La résultante des forces sismiques à la base, V_t , obtenue par combinaison des valeurs modales ne doit pas être inférieure à 80% de la résultante des forces sismiques, V , donnée par Eqn. (4.1) pour une valeur de la période fondamentale donnée par Eqn. (4.4).

Si ($V_t \leq 0.8V$), il faudra augmenter tous les paramètres de la réponse (forces, déplacements, moments, etc) dans le rapport ($\frac{0.80V}{V_t}$).

4.3.6 Effets de la torsion accidentelle

Quand il est procédé à une analyse, par modèles plans dans les deux directions orthogonales, les effets de la torsion accidentelle d'axe vertical sont à prendre en compte comme décrit au § 4.2.7.

Dans le cas où il est procédé à une analyse tridimensionnelle, en plus de l'excentricité théorique calculée, une excentricité accidentelle (additionnelle) égale à ($\pm 0.05L$), L étant la dimension du plancher perpendiculairement à la direction de l'action sismique, doit être appliquée au niveau du plancher considéré et suivant chaque direction.

4.4 Méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes

Outre les prescriptions données au § 4.1.3 b, le choix des séismes de calcul peut se faire en utilisant des accélérogrammes réels (enregistrés), simulés ou artificiels (synthétiques) (cf. § 3.3.4).

4.5 Prescriptions communes aux méthodes d'analyse

4.5.1 Stabilité au renversement

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

Le moment stabilisant sera calculé en prenant en compte, comme charge permanente, le poids total équivalent au poids de la construction, au poids des fondations et, éventuellement, au poids du remblai.

La vérification de la stabilité au renversement est effectuée suivant les prescriptions du § 5.5.

4.5.2 Calcul des déplacements

Le déplacement horizontal, à chaque niveau " k ", de la structure est calculé selon Eqn. (4.15):

$$\delta_k = \frac{R}{Q_F} \cdot \delta_{ek} \quad (4.15)$$

où:

δ_{ek} : Déplacement élastique dû aux forces sismiques F_i (y compris l'effet de torsion)

R : Coefficient de comportement

Q_F : Coefficient de qualité

Le déplacement relatif, au niveau " k " par rapport au niveau " $k - 1$ ", est égal à :

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \quad (4.16)$$