

Université : **MOHAMED BOUDIAF M'SILA**
Faculté : **de Technologie**
Département : **Génie Civil**
Option : **structure**

Cours Projet structures en béton armé

Module : Projet structures en béton armé

Option : Structure

Niveau : 2^{ème} Année Master

Présenté par: Dr MENASRI YUCEF

Objectifs de l'enseignement:

L'objectif de cette matière est d'élaborer toutes les étapes d'un projet pour le calcul de structure sous l'encadrement de l'enseignant chargé de la matière.

Mise en application des connaissances dans une situation de bureau d'étude

Contenu de la matière:

Parti 1

Présentation et description du projet

Présentation des différentes étapes de calcul d'un projet

Hypothèses de calcul

Matériaux utilisés

Normes et règlements utilisés

Choix du système porteur (structures mixtes : voiles + portiques)

Pré dimensionnement des éléments de structures et évaluation des charges

Dimensionnement des planchers

Calcul des éléments secondaires (un balcon, acrotère)

Parti 2

Etude sismique

Etude des structures vis-à-vis du vent

Calcul et ferrailage des escaliers

Calcul et ferrailage de la structure porteuse

Dimensionnement des fondations.

Production des plans (Plan de coffrage, plan de ferrailage)pour les éléments calculés.

Parti 2

ETUDE SISMIQUE

Introduction

L'objectif initial de l'étude dynamique (sismique) d'une structure est la détermination des caractéristiques dynamiques propres de la structure lors de ces Vibrations Libres Non Amorties (VLNA).

L'étude dynamique d'une structure telle qu'elle se présente, est souvent très complexe. C'est pour cela qu'on fait souvent appel à des modélisations qui permettent de simplifier suffisamment le problème pour pouvoir l'analyser.

Fréquences et modes propres :

L'équation du mouvement d'un système se déplaçant librement sans amortissement s'écrit :

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (1)$$

Où :

$\{\ddot{x}\}$, $\{x\}$: représentent respectivement le vecteur des accélérations et le vecteur des déplacements de la structure.

$[M]$: représente la matrice masse de la structure.

$[K]$: représente la matrice de rigidité de la structure.

L'analyse d'un système à plusieurs degrés de liberté en vibrations libres non amorties (VLNA), nous fournit les propriétés dynamiques les plus importantes de ce système, qui sont les fréquences propres et modes propres.

Dans chaque mode propre de vibration, chaque point de la structure exécute un mouvement harmonique autour de sa position d'équilibre. Ce qui peut s'écrire :

$$\{x(t)\} = \{A\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

Avec :

$\{A\}$: vecteur des amplitudes

ω : Fréquence de vibration

φ : Angle de déphasage

Les accélérations en VLNA sont alors données par :

$$\{\ddot{x}(t)\} = -\omega^2 \{A\} \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{En reportant les équations (2) et (3) dans}$$

l'équation (1), on aura :

$$[[K] - \omega^2[M]]\{A\} \sin(\omega t + \varphi) = \{0\}$$

Cette équation doit être vérifiée quelque soit le temps (t), donc pour toutes les valeurs de la fonction sinus, ce qui donne :

$$[[K] - \omega^2[M]]\{A\} = \{0\}$$

Ce système d'équation est un système à (N) inconnues A_i . C'est un système d'équation homogène qui ne peut admettre de solution non nulle que si le déterminant de la matrice carrée s'annule.

D'où : $\det[[K] - \omega^2[M]] = 0$

L'expression ci-dessus est appelée " Equation caractéristique ".

En développant l'équation caractéristique, on obtient une équation polynomiale de degré (2N) en (ω).

Les N solutions ($\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$) sont les carrés des pulsations propres des N modes des vibrations possibles.

Le 1er mode vibratoire correspond à ω_1 et est appelé mode fondamental ($\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$).

A chaque pulsation propre, correspond une forme d'oscillation appelée mode propre $\{\mathbf{A}\}_j$ ou forme modale

Méthodes de calcul des actions (forces) sismiques :

L'étude sismique consiste à évaluer les efforts de l'action accidentelle (séisme) sur notre structure existant. Pour cela, plusieurs méthodes approchées ont été proposées afin d'évaluer les efforts internes engendrés à l'intérieur de la structure. Le calcul de ces efforts sismiques peut être déterminé selon les méthodes :

- Méthode statique équivalente.
- Méthode d'analyse modale spectrale (méthode de spectre de réponse) .
- Méthode d'analyse dynamique par accélérogramme (linéaire et non –linéaire) .
- -Méthode de poussé progressive (pushover)

Méthode statique équivalente :

- **Principe de la méthode :** 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 au mouvement du sol dans une direction quelconque dans le plan horizontal.

Les forces sismiques horizontales équivalentes seront considérées appliquées successivement suivant deux directions orthogonales caractéristiques choisies à priori par le projeteur. Les conditions d'application de la méthode statique équivalente sont citées dans l'article 4.1.2 du RPA 99. Ces conditions sont restées inchangées dans l'ADDENDA 2003.

Modélisation:

- 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.
- La rigidité latérale des éléments porteurs du système de contreventement est calculée à partir des sections non fissurées pour les structures en béton armé ou en maçonnerie.
- Seul le mode fondamental de vibration de la structure est à considérer dans le calcul de la force sismique totale.

Classification des zones sismiques :

Le territoire national est divisé en quatre (04) zones de sismicité croissante, définies sur la carte des zones de sismicité et le tableau associé qui précise cette répartition par wilaya et par commune, soit :

ZONE 0 : sismicité négligeable.

ZONE I : sismicité faible.

ZONE IIa et IIb : sismicité moyenne.

ZONE III : sismicité élevée.

Dans notre cas, Jijel se situe dans une zone de sismicité moyenne 'ZONE II'.

Classification de l'ouvrage :

La classification des ouvrages se fait sur le critère de l'importance de l'ouvrage relativement au niveau sécuritaire, économique et sociale.

Groupe 1A : ouvrages d'importance vitale.

Groupe 1B : ouvrages de grande importance.

Groupe 2 : ouvrages courant ou d'importance moyenne.

Groupe 3 : ouvrages de faible importance.

Calcul de la force sismique totale suivant la méthode statique équivalente :

La force sismique totale « V » appliquée à la base de la structure doit être calculée successivement dans deux directions horizontales orthogonales selon la formule :

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

Avec :

A : coefficient d'accélération de zone ; il dépend du groupe d'usage du bâtiment et la zone sismique.

- zone sismique
- Group d'usage
- **Classification des zones sismiques :**
- Le territoire national est divisé en quatre (04) zones de séismicité croissante, définies sur la carte des zones de séismicité et le tableau associé qui précise cette répartition par wilaya et par commune, soit :
- ZONE 0 : sismicité négligeable.
- ZONE I : sismicité faible.
- ZONE IIa et IIb : sismicité moyenne.
- ZONE III : sismicité élevée.
- Classification de l'ouvrage :
- La classification des ouvrages se fait sur le critère de l'importance de l'ouvrage relativement au niveau sécuritaire, économique et sociale.
- Groupe 1A : ouvrages d'importance vitale.
- Groupe 1B : ouvrages de grande importance.
- Groupe 2 : ouvrages courant ou d'importance moyenne.
- Groupe 3 : ouvrages de faible importance.

Les valeurs du coefficient d'accélération de zone "A" sont comme suit:

Groupe	ZONE			
	I	IIa	IIb	III
1 A	0,15	0,25	0,30	0,40
1 B	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

D : facteur d'amplification dynamique moyen ; fonction de la catégorie de site ,du facteur de correction d'amortissement (η), et de la période fondamentale de la structure (T).

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(T_2/T)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(T_2/3.0)^{\frac{2}{3}}(3.0/T)^{\frac{5}{3}} & T \geq 3.0s \end{cases}$$

T₂: période caractéristique, associée à la catégorie du site et donnée par le tableau 4.7

Tableau 4.7 : Valeurs de T₁ et T₂

Site	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
T _{1(sec)}	0,15	0,15	0,15	0,15
T _{2(sec)}	0,30	0,40	0,50	0,70

Le facteur D est par ailleurs donné sous forme graphique " figure 4.1 RPA 99 v 2003" pour un amortissement ξ (%)= 5%

η : est donné par la formule : $\eta = \left(\frac{7}{2 + \xi} \right)^{\frac{1}{2}} \geq 0.7$

Où ξ (%) est le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau constitutif ; du type de structure et de l'importance des remplissages.

Tableau 4.2 : Valeurs de ξ (%)

Remplissage	Portiques		Voiles ou murs
	Béton armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

Estimation de la période fondamentale de la structure(T)

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

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

$$T = C_T . h_N^{\frac{3}{4}}$$

- h_N : hauteur mesurée en mètres 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.
(Tableau 4.6.RPA99)

Tableau 4.6 : valeurs du coefficient C_T

Cas n°	Système de contreventement	C_T
1	Portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie	0,075
2	Portiques autostables en acier sans remplissage en maçonnerie	0,085
3	Portiques autostables en béton armé ou en acier avec remplissage en maçonnerie	0,050
4	Contreventement assuré partiellement ou totalement par des voiles en béton armé, des palées triangulées et des murs en maçonnerie	0,050

Dans les cas n° 3 et 4, on peut également utiliser aussi la formule :

$$T = 0.09 h_N / \sqrt{D}$$

où D est la dimension du bâtiment mesurée à sa base dans la direction de calcul considérée. Dans ce cas de figure il y a lieu de retenir dans chaque directions considérée la plus petite des deux valeurs données précédentes.

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

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

f_i : système de forces horizontales, distribuées selon les formules de répartition de V 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.

Calcul coefficient de comportement global de la structure R

Sa valeur unique est donnée par le tableau 4.3 en fonction du système de contreventement tel que défini en 3.4 En cas d'utilisation de systèmes de contreventement différents dans les deux directions

considérées il y a lieu d'adopter pour le coefficient **R** la valeur la plus petite.; fonction du système de contreventement.

Tableau 4.3 : valeurs du coefficient de comportement R

Cat	Description du système de contreventement (voir chapitre III § 3.4)	Valeur de R
<u>A</u>	<u>Béton armé</u>	
1a	Portiques autostables sans remplissages en maçonnerie rigide	5
1b	Portiques autostables avec remplissages en maçonnerie rigide	3,5
2	Voiles porteurs	3,5
3	Noyau	3,5
4a	Mixte portiques/voiles avec interaction	5
4b	Portiques contreventés par des voiles	4
5	Console verticale à masses réparties	2
6	Pendule inverse	2

Q : le facteur de qualité de la structure ; fonction de :

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

La valeur de (Q) est déterminée par la formule :

$$Q = 1 + \sum_{1}^6 P_q \quad (\text{RPA99-2003})$$

P_q : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité q " est satisfait ou non".

Sa valeur est donnée au tableau 4.4(RPA).

Les critères de qualité "q" à vérifier sont :

1. Conditions minimales sur les files de contreventement

- **système de portiques** : chaque file de portique doit comporter à tous les niveaux, au moins trois (03) travées dont le rapport des portées n'excède pas 1,5.

Les travées de portique peuvent être constituées de voiles de contreventement.

- **système de voiles** : chaque file de voiles doit comporter à tous les niveaux, au moins un (01) trumeau ayant un rapport "hauteur d'étage sur largeur" inférieur ou égal à 0,67 ou bien deux (02) trumeaux ayant un rapport "hauteur d'étage sur largeur" Inférieur ou égal à

1,0. Ces trumeaux doivent s'élever sur toute la hauteur de l'étage et ne doivent avoir aucune ouverture ou perforation qui puisse réduire de manière significative leur résistance ou leur rigidité..

2. Redondance en plan

Chaque étage devra avoir, en plan, au moins quatre (04) files de portiques et/ou de voiles dans la direction des forces latérales appliquées.

Ces files de contreventement devront être disposées symétriquement autant que possible avec un rapport entre valeurs maximale et minimale d'espacement ne dépassant pas 1,5.

3. Régularité en plan : la structure est classée régulière en plan. (cf 3.5 1a)

4. Régularité en élévation

La structure est classée régulière en élévation. (cf 3.5 1b)

5. Contrôle de la qualité des matériaux

Des essais systématiques sur les matériaux mis en œuvre doivent être réalisés par l'entreprise.

6. Contrôle de la qualité de l'exécution

Il est prévu contractuellement une mission de suivi des travaux sur chantier. Cette mission doit comprendre notamment une supervision des essais effectués sur les matériaux.

Tableau 4.4.: valeurs des pénalités P_q

Critère q »	P_q	
	Observé	N/observé
1. Conditions minimales sur les files de contreventement	0	0,05
2. Redondance en plan	0	0,05
3. Régularité en plan	0	0,05
4. Régularité en élévation	0	0,05
5. Contrôle de la qualité des matériaux	0	0,05
6. Contrôle de la qualité de l'exécution	0	0,10

W : poids total de la structure, (RPA99-2003)

W est égal à la somme des poids W_i , calculés à chaque niveau (i) :

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad \text{avec} \quad W_i = W_{Gi} + \beta W_{Qi} \quad (4-5)$$

W_{Gi} : poids dû aux charges permanentes et à celles des équipements fixes éventuels, solidaires de la structure

WQi : charges d'exploitation

β : coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation et donné par le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : valeurs du coefficient de pondération β

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. - salles de classes, restaurants, dortoirs, salles de réunions avec places assises	0,30 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

Distribution de la résultante des forces sismiques

- Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur (verticale)

La résultante des forces sismiques à la base V doit être distribuée sur la hauteur de la structure selon les formules suivantes :

$$V = F_t + \sum F_i$$

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 :

$$F_t = 0,07 TV$$

où T est la période fondamentale de la structure (en secondes).

La valeur de F_t ne dépassera en aucun cas $0,25 V$ et sera prise égale à 0 quand T est plus petite ou égale à 0,7 secondes.

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

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

- Distribution horizontale des forces sismiques

L'effort tranchant au niveau de l'étage k

$$V_k = F_t + \sum_{i=k}^n F_i$$

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

Les efforts sont calculés en tenant compte de la rotation et de la translation.

NB : l'effort sismique négatif dû à la rotation est négliger.

$$F_{iKX} = \underbrace{F_{KX} \frac{R_{iKX}}{\sum R_{iKX}}}_{\text{Translation}} + \underbrace{F_{KX} \frac{R_{iKX} \cdot Y_{iK} \cdot e_{YK}}{R_{KQ}}}_{\text{Rotation}}$$

1- Calcul du centre de torsion :

$$X_{ct} = \frac{\sum R_{JK} \cdot X}{\sum R_{JK}} ; Y_{ct} = \frac{\sum R_{JK} \cdot Y}{\sum R_{JK}}$$

2- Calcul de centre de gravité :

$$X_g = \frac{\sum X_i \cdot A_i}{\sum A_i} , Y_g = \frac{\sum Y_i \cdot A_i}{\sum A_i}$$

3-) Calcul de l'excentricité de niveau

a) Excentricité calculée :

$$ex = |X_g - X_{ct}|$$

$$ey = |Y_g - Y_{ct}|$$

*

b) Excentricité théorique :

D'après RPA 99, on prend la plus grande des valeurs : 5% de la plus grande dimension du bâtiment et excentricité théorique résultante des plans :

$$\left. \begin{array}{l} ex = 5\% L_{max} \\ ey = 5\% L_{max} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

La valeur de l'excentricité retenue est la plus grande des deux excentricité théorique et calculée : $e_{re} = \max(e_{th}; e_{cl})$

Si l'excentricité théorique de RPA est la plus grande, le centre de torsion à retenir est :

$$\text{Si } e_{th} > e_{cal} \Rightarrow \begin{cases} X_{ctr} = X_g - e_{rt} \\ Y_{ctr} = Y_g - e_{rt} \end{cases}$$

Si non on garde les valeurs de centre torsion calculée : $\text{Si } e_{th} < e_{cal} \Rightarrow \begin{cases} X_{ctr} = X_{ct} \\ Y_{ctr} = Y_{ct} \end{cases}$

4-) Calcul de la rigidité à la torsion :

La rigidité à la torsion du niveau « K » est donnée par l'expression suivante

$$R_{k\sigma} = \sum R_{ky} (x_k)^2 + \sum R_{kx} (y_k)^2$$

X_k : Distance d'un portique transversal par rapport au centre torsion.

Y_k : Distance d'un portique longitudinal par rapport au centre de torsion.

6.2-) évaluation des forces sismiques par la méthode dynamique modale spectrale

Pour l'évaluation des forces sismiques, on a utiliser qui prend en compte la réponse de la structure suivant les modes déterminés.

La force sismique au niveau « K » pour le mode « i » est donnée par la formule suivant selon RPA 99 on a :

$$F_{Ki} = \frac{S_a}{g} \gamma_i \phi_{Ki} W_K$$

Avec γ_i : facture de distribution de chaque mode, il est donné par la formule suivante :

$$\gamma_i = \frac{\left| \sum_{K=1}^n W_{Ki} \phi_{Ki} \right|}{\sum_{K=1}^n W_{Ki} \phi_{Ki}^2}$$

W_K : Masse du niveau K

ϕ_K : formes propres ϕ_{Ki} (déplacement) propre du mode « i » au niveau « K ».

N : nombre des niveaux.

$\frac{S_a}{g}$: Spectre de réponse de calcul.

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1,25A \left[1 + \frac{T}{T_1} (2,5\eta \frac{Q}{R} - 1) \right], 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta (1,25A) (\frac{Q}{R}); T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta (1,25A) (\frac{Q}{R}) (\frac{T_2}{T})^{2/3}, T_2 \leq T \leq 3,0 \text{ sec} \\ 2,5\eta (1,25A) (\frac{T_2}{3})^{2/3} (\frac{3}{T})^{5/3} (\frac{Q}{R}), T \geq 3,0 \text{ sec} \end{cases}$$

On doit vérifie que la résultante des forces sismiques à la base « V_K » obtenue par la méthode équivalente ne doits pas être inférieure à 80 % de la résultante des forces sismiques déminée par la méthode statique équivalente.

1) Vérification de la Stabilité du renversement :

La présence des efforts due aux séismes et aux vents provoque un problème de renversement dans les bâtiments.

A fin de mener un calcul du point de vue sécurité on établie l'action sismique qui est la plus défavorable.

Chaque structure doit être calculé afin de résister aux efforts sismiques, on doit vérifier :

$$M_{stab} \geq F_S . M_{renv} \Rightarrow M_{stab} / M_{renv} \geq F_S = 1.5$$

$$M_{stab} : \text{Moment de stabilité } M_S = \sum_{i=1}^{17} w_i \cdot \frac{L_i}{2}$$

$$M_{renv} : \text{Moment de renversement } M_r = \sum_{i=1}^{17} F_i \cdot h_i$$

F_S : Coefficient de sécurité =1.5

w_i : Poids d'étage (t)

F_i : Force sismique au niveau « i ».

h_i : Distance entre la base de la structure et le niveau i.

L_i : Distance minimal entre le centre de gravité et les extrémités de la structure suivant la direction considérée.

2) calcul des déplacements :

Sous l'action des forces horizontale, la structure subira des déformations horizontales, pour éviter l'augmentation des contraintes dans les systèmes de contreventement les déplacements doivent être calculé pour chaque élément de contreventement.

Les déplacements relatifs latéraux d'étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents, ne doivent pas dépasser (1.0 % de la hauteur d'étage)

$$\delta_K = R . \delta_{bc} \leq \bar{\delta}_K = 1\% \times h$$

Avec : R coefficient de comportement

$$\delta_{cK} = \frac{V_K}{R_K} \text{ Déplacement du aux force sismique « F_i » y compris l'effort de torsion.}$$

L'effet P-Δ :

La flexion d'ensemble des bâtiments entraîne des ruptures d'éléments porteurs verticaux par écrasement sur le coté comprimé et arrachement sur le coté tendu.

Par ailleurs, l'excentricité des charges verticales résultant des déplacements relatifs des étages provoque dans les poteaux et les murs des efforts axiaux additionnels.

Ce phénomène est appelé « effet P - delta » ou effets de 2^{ème} ordre noté : « P - Δ » pour

tenir compte de cet effet en doit vérifier si le coefficient ; $\theta = \frac{P_k \Delta_k}{V_k h_k}$ est :

- $\theta \leq 0.1$ Effet (P-Δ) est négligé.
- $0.1 \leq \theta \leq 0.2$ Les effets (P-Δ) sont à prendre en compte.
- $\theta > 0.2$ La structure est instable et doit être redimensionnée.

Avec :

P_K : Poids totale de la structure et des charges d'exploitation associées au dessus du niveaux

$$\text{« K »} \rightarrow P_K = \sum_{i=K}^n (W_{Gi} + \beta W_{Qi})$$

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 de l'étage « K ».