



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ «Abbès LAGHROUR» DE KHENCHELA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



*Département de Génie Civil*

## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité : Génie civil**

**Option : Structure**

**Etude comparative entre la méthode statique  
équivalente et la méthode modale spectrale pour  
l'évaluation des charges sismiques**

**Présenté par :**

- Aitelhadj Aymen
- Ghodbane Yasser

**Proposé et dirigé par :**

- Docteur. Mamen Belgacem

**Soutenu le.....devant le jury composé de :**

Nom	Prénom	Président

**Septembre 2020**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance

durant toute notre existence.

Je dédie ce mémoire :

A ma très chère mère qui a toujours été là pour moi, et qui m'a donnée un magnifique modèle de persévérance. J'espère qu'elle trouvera dans ce travail

toute ma reconnaissance et tout, mon estime envers elle.

A mes chers frères et sœurs

A mes tantes et à mes oncles.

A chaque cousins et cousines.

A toute ma famille sans exception.

A mon binôme et toute sa famille.

Ainsi que sans oublier mon cher et adorable époux qui m'aide pour suivre mes études et pour réaliser ce travail et toute sa famille A mes meilleurs amis et à tous ceux qui me sont chère.



# Remerciement

Nous remercions avant tout Allah de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont fait pour que nous terminions nos études.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur **Docteur mamen**, qui nous a témoigné de sa confiance et de son aide scientifique et qui par son expérience et sa compétence.

**Ghodbane yasser & Aitelhadj aymen**

## **Résumé:**

L'objet principal de ce projet de fin d'études est d'estimer les sollicitations et les déplacements dans les éléments structuraux des bâtiments réguliers soumis à des forces sismiques. A cet effet, la répartition des efforts tranchants est obtenue par les forces sismiques calculées à partir de la méthode statique équivalente du code parasismique algérien RPA 99 (version 2003) et de l'analyse modale spectrale pour un bâtiment régulier en plan et en élévation. La comparaison des résultats obtenus par ces deux méthodes permet de mettre en évidence les ressemblances et les différences en termes de répartitions des sollicitations (M, N, et T) dans ce type de structures.

Le bâtiment qui choisi pour cette étude est un bâtiment en R+4 étages a usage d'habitation, contreventé par des portiques+voiles en béton armé, régulier en plan et en élévation et implantée en zone III(Zone de forte sismicité).

A la fin de cette étude, on peut dire que:

La méthode statique équivalente et la méthode dynamique modale spectrale donnent des sollicitations (moments fléchissant, efforts normaux et efforts tranchants)et des déplacements très proches entre eux pour les bâtiments qui présentent une configuration régulière en plan et en élévation.

Par conséquent, pour ceux qui s'intéressent à l'étude de ce type de bâtiments, choisissez librement et sans aucun doute l'une de ces deux méthodes.

## **Mots clés:**

Méthode statique équivalente, Méthode dynamique modale spectrale ,Bâtiments réguliers en béton armé, Sollicitations, Déplacements

## **Summary :**

The main purpose of this end-of-studies project is to estimate the stresses and displacements in the structural elements of regular buildings subjected to seismic forces. For this purpose ,the distribution of shear forces is obtained by the seismic forces calculated from the equivalent static method of the Algerian seismic code RPA 99 (version 2003) and the spectral modal analysis for a regular building in plan and elevation. The comparison of the results obtained by these two methods makes it possible to high light the similarities and the differences in terms of the distribution of the stresses (M, N, and T) in this type of structures.

The building chosen for this study is a R + 4 storey residential building, braced by porticos +veils reinforced concrete, regular plan and elevation and located in Zone III (Zone of strong seismicity).

At the end of this study, we can say that: The equivalent static method and the spectral modal dynamic method give stresses (bending moments, normal forces and shear forces) and displacements very close to each other for buildings which have a regular configuration in plan and elevation.

Therefore, for those interested in studying this type of building, choose one of these two methods without any doubt.

## **Key words:**

Equivalent static method, Spectral modal dynamic method, Regular reinforced concrete buildings, Solicitations, Displacements.

## Figures :

<b>• Chapitre I</b>	<b>page</b>
<b>I.1 : La vue en 3D de la structure</b>	<b>16</b>
<b>I.2 : Coupe du plancher à corps creux</b>	<b>18</b>
<b>I.3 : Schéma d'une poutrelle</b>	<b>19</b>
<b>I.4 : Démenions a respecter selon RPA99-V2003</b>	<b>19</b>
<b>I.5 : Epaisseur a respecter pour voiles selon RPA99-V2003</b>	<b>21</b>
<b>I.6 : Schéma d'un escalier</b>	<b>22</b>
<b>I.7 : Vue en plan d'escalier</b>	<b>23</b>
<b>I.8 : Schéma statique des escaliers</b>	<b>24</b>
<b>I.9 : schéma de l'acrotère</b>	<b>24</b>
<b>I.10 : Dimensionnement d'un nœud poutre-poteau</b>	<b>25</b>
<b>I.11 : Détail plancher terrasse (inaccessible)</b>	<b>26</b>
<b>I.12 : Détail plancher étage courant</b>	<b>27</b>

<b>• Chapitre II</b>	<b>page</b>
<b>II.1 : Position du C.D.G et C.T</b>	<b>34</b>
<b>II.2.1 : Comment trouver le poids</b>	<b>39</b>
<b>II.2.2 : Comment trouver le poids</b>	<b>40</b>
<b>II.3 : Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur</b>	<b>41</b>
<b>II.4 : Effort tranchant au niveau d'étage</b>	<b>43</b>
<b>II.5 : Moments fléchissant au niveau d'étage</b>	<b>44</b>
<b>II.6 : Forces sismiques sur files intermédiaires sens XX</b>	<b>46</b>
<b>II.7 : Forces sismiques sur files de rives sens XX</b>	<b>47</b>
<b>II.8 : Forces sismiques sur files intermédiaires sens YY</b>	<b>48</b>
<b>II.9 : Forces sismiques sur files de rives sens YY</b>	<b>49</b>
<b>II. : Distribution horizontale du force sismique d'étage 'i'</b>	<b>50</b>

<b>• Chapitre III</b>	<b>page</b>
<b>III.1 : Modes propres de vibration</b>	<b>53</b>
<b>III.2 : Forces sismiques du mode i</b>	<b>57</b>
<b>III.3 : Spectre de réponse de calcul sous forme graphique</b>	<b>60</b>
<b>III.4 : 1er mode de vibration <math>T_1=0.55</math>sec Translation selon YY</b> Avec masse modale $M_y=74.65\%M$ structure et $M_x=0.01\%M$ structure	<b>62</b>
<b>III.5 : 2me mode de vibration <math>T_2=0.51</math>sec Translation selon XX</b> Avec masse modale $M_x=74.71\%M$ structure et $M_y=0.01\%M$ structure	<b>63</b>
<b>III.6 : 3me mode de vibration <math>T_3=0.45</math>sec Torsion d'axe vertical</b> Avec masse modale $M_x=1.26\%M$ structure et $M_y=0.01\%M$ structure	<b>63</b>

<b>• Chapitre IV</b>	<b>page</b>
<b>IV.1 : Comparaison des efforts tranchants aux niveaux des étages sens X</b>	<b>69</b>
<b>IV.2 : Comparaison des efforts tranchants aux niveaux des étages sens Y</b>	<b>70</b>
<b>IV.3 : Comparaison des déplacements des étages sens X</b>	<b>71</b>
<b>IV.4 : Déplacements des étages sens X</b>	<b>72</b>
<b>IV.5 : Comparaison des déplacements des étages sens Y</b>	<b>73</b>
<b>IV.6 : Déplacements des étages sens Y</b>	<b>73</b>

## Tableaux :

<b>• Chapitre I</b>	<b>page</b>
Tableau (I.1): Pré dimensionnement des planchers	18
Tableau (I.2) :Pré dimensionnement des poutres	20
Tableau (I.3) :Caractéristique d'escalier	30
Tableau (I.4) :Vérification de la rotule plastique	25
Tableau (I.5) : Charge pour plancher terrasse (inaccessible)	26
Tableau (I.6) :Evaluation des charges de Plancher étage courant	27
Tableau (I.7) :Evaluation des charges de Murs extérieurs	28
Tableau (I.8) :Evaluation des charges de l'acrotère	28
Tableau (I.9) :Evaluation des charges de palais d'escalier	29
Tableau (I.10) :Evaluation des charges de la volée d'escalier	29
Tableau (I.11) :Charge et surcharge du balcon	24

<b>• Chapitre II</b>	<b>page</b>
Tableau(II.1) : Valeurs des pénalités Pq	39
Tableau(II.2) : Poids total de la structure selon robot	39
Tableau(II .3) :Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur	41
Tableau(II.4) :Effort tranchant au niveau d'étage	42
Tableau(II.5) :Moments fléchissant au niveau d'étage	43
Tableau(II.6) : Forces sismiques sur files intermédiaires sens XX	45
Tableau(II.7) :Forces sismiques sur files de rives sens XX	46
Tableau(II.8) : Forces sismiques sur files intermédiaires sens YY	47
Tableau(II.9) : Forces sismiques sur files de rives sens YY	48

<b>• Chapitre III</b>	<b>page</b>
Tableau (III.1) : Spectre de réponse de calcul sous forme de tableau	62
Tableau (III.2) : Périodes et masses modales selon ROBOT	64
Tableau (III.3) : Réaction à la base de la structure	66

<b>• Chapitre IV</b>	<b>page</b>
Tableau (IV.1) :Tableau Réactions à la base de la structure selon la méthode dynamique	68
Tableau (IV.2) :Tableau Réactions à la base de la structure selon la méthode statique	68
Tableau (IV.3) : Efforts tranchants aux niveaux des étages	69
Tableau (IV.4) :Déplacements des étages selon la méthode statique	70
Tableau (IV.5) :Déplacements des étages selon la méthode modale	71
Tableau (IV.6) :Comparaison des déplacements des étages sens X	71
Tableau (IV.7) :Comparaison des déplacements des étages sens Y	72

# SOMMAIRE

page

<b>Introduction :</b>	<b>11</b>
Introduction général	12
1.Problématique	12
2.Méthodologie	12
3.Organisation du mémoire	13
<b>Chapitre 1 : Présentation de l'ouvrage et pré dimensionnement des éléments structuraux</b>	<b>14</b>
I.1.Présentation du projet	15
I.2.Caractéristiques de la structure	15
I.2.1. Dimensions en plan et en élévation	15
I.2.2 .Caractéristiques du site	15
I.2.3. Caractéristiques des matériaux	15
I.3. Règlements et normes utilisés	16
I.4.Pré dimensionnement des éléments structuraux	17
I.4.1.Introduction	17
I.4.2.Pré dimensionnement des planchers	17
I.4.2.1.Dalles en corps creux	17
I.4.3.Pré dimensionnement des poutres et poteaux	19
I.4.3.1.Les poutres	19
I.4.3.2.poteaux	20
I.4.4. pré dimensionnement des voiles de contreventement	21
I.4.5.pré dimensionnement des escaliers	22
I.4.6.L'acrotère	24
I.4.7.pré dimensionnement des nœuds	25
I.5. Evaluation des charges	26
I.5.1.Plancher	26
I.5.2.Murs extérieurs	28
I.5.3.L'acrotère	28
I.5.4.Les escaliers	29
I.5.5.Balcon	30
<b>Chapitre 2 :Calcul par la méthode statique équivalente</b>	<b>31</b>
II.1. Principe de la méthode statique équivalente	32
II.2.Condition d'application	32
II.2.1.Régularité en plan	32
II.2.2.Régularité en élévation	35
II.3. Modélisation	35
II.4. Calcul de la force sismique totale	36
II.5. Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur	40
II.6. Distribution de l'effort tranchant selon la hauteur	42
II.7.Calcul des moments fléchissant selon hauteur	43
II.8. Distribution horizontale des forces sismiques	45
II.8.1. Distribution horizontale des forces sismiques sens XX	45
II.8.2. Distribution horizontale des forces sismiques sens YY	47

<b>Chapitre 3 :Calcul par la méthode dynamique modale spectrale</b>	<b>51</b>
III.1.Principe de la méthode dynamique modale spectrale	52
III.2. Modélisation	52
III.3. Etapes de calcul	53
III.4. Spectre de réponse de calcul :	59
III.5. Modélisation par ROBOT-V14 :	62
III.6. Nombre de modes à considérer :	64
III.7. Combinaison des réponses modales :	65
III.8. Résultante des forces sismiques de calcul :	66
III.9. Calcul des déplacements :	66
<b>Chapitre 4 :Discussions des sollicitations et des déplacements</b>	<b>67</b>
IV.1. Introduction	68
IV.2.Efforts tranchants aux niveaux des étages:	69
IV.3. Déplacements aux niveaux des étages	70
<b>Conclusion :</b>	<b>74</b>
Conclusion générale	75
Bibliographie	76



# Introduction

## INTRODUCTION GENERALE :

### 1.Problématique :

L'objet principal de ce projet de fin d'études est d'estimer les sollicitations et les déplacements dans les éléments structuraux des bâtiments réguliers soumis à des forces sismiques.

A cet effet, la répartition des efforts tranchants est obtenue par les forces sismiques calculées à partir de la méthode statique équivalente du code parasismique algérien RPA 99(version 2003) et de l'analyse modale spectrale pour un bâtiment régulier en plan et en élévation.

La comparaison des résultats obtenus par ces deux méthodes permet de mettre en évidence les ressemblances et les différences en termes de répartitions des sollicitations(M, N, et T) dans ce type de structures.

### 2.Méthodologie :

Notre projet consiste à étudier un bâtiment R+4 étages contreventé par des portiques+voiles en béton armé, régulière en plan et élévation et implantée en zone III, cette étude est faite par deux méthode :

- Analyse par la méthode statique équivalente (selon RPA 99-V 2003)
- Analyse modale spectrale(selon RPA 99-V 2003)En premier lieu, on calcule l'effort tranchant globalà la base de la structure par la formule

$V = (A \cdot D \cdot Q/R)W$  et la distribution verticale par la formule

$F_i = (V - F_t) W_i \cdot h_i / \sum_{j=1}^n w_j \cdot h_j$  Puis la répartition horizontale de la force sismique d'étage

sur les fils de portique selon la rigidité relative de chaque fil 'j'  $F_{ij} = F_i \cdot R_j / \sum R_j$

(on néglige l'effet du torsion parce que l'excentricité est très faible,  $F_{ij}$  sont appliquées sur les nœuds comme des forces concentrées) ; et en fin la modélisation par robot architectural 2014

En second lieu, on entame notre projet par une modélisation de la variante à partir d'une étude dynamique, en introduisant un spectre de calcul exigé par le règlement parasismique Algérien .

$$S_a/g = \begin{cases} 1.25 A \left( 1 + \frac{T}{T_1} \left( 2.5 \eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & \dots\dots\dots 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left( \frac{Q}{R} \right) & \dots\dots\dots T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left( \frac{Q}{R} \right) \left( \frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & \dots\dots\dots T_2 \leq T \leq 0.3s \\ 2.5 \eta (1.25 A) \left( \frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left( \frac{3}{T} \right)^{5/3} \left( \frac{Q}{R} \right) & \dots\dots\dots T > 0.3s \end{cases}$$

Et en dernier lieu, La comparaison des sollicitations (M, N, et T) et des déplacements qui sont calculées par ces deux méthodes.

### **3.Organisation du mémoire:**

Le travail a été structuré comme suit :

**Chapitre I :** consiste à présenter l'ouvrage et faire un pré dimensionnement des éléments de la structure.

**Chapitre II :** portera sur l'étude statique du bâtiment et la détermination de l'action sismique par cette méthode.

**Chapitre III :** portera sur l'étude dynamique du bâtiment et la détermination de l'action sismique par cette méthode.

**Chapitre VI :** portera une étude comparative des résultats obtenus par les deux méthodes.

# Chapitre 1

Présentation de l'ouvrage et pré  
dimensionnement des éléments de la structure

## **I.1.Présentation du projet :**

Notre projet consiste d'étude sismique d'une bâtiment de R+4 étage a usage d'habitation, situe Zone III, contreventée par des portiques+voiles en béton armé, régulière en plan et en élévation, ce bâtiment implanté sur site considéré comme meuble 'S3', On insiste sur les sollicitations dues aux charges latérales (sismiques)

## **I.2.Caractéristiques de la structure :**

### **I.2.1. Dimensions en plan et en élévation :**

- \* Hauteur totale de bâtiment .....H = 15.50m
- \* Hauteur de RDC et d'étage courant .....h = 3.10m
- \* Longueur totale .....L<sub>x</sub> = 22.30m
- \* Largeur totale .....L<sub>y</sub> = 9.60m

### **I.2.2 .Caractéristiques du site:**

- Le bâtiment est implanté dans une zone classée par les règles parasismiques Algériennes 99/version 2003 comme zone de forte sismicité (zone III).
- L'ouvrage appartient au groupe d'usage 2
- Le site est considéré comme meuble (S3).

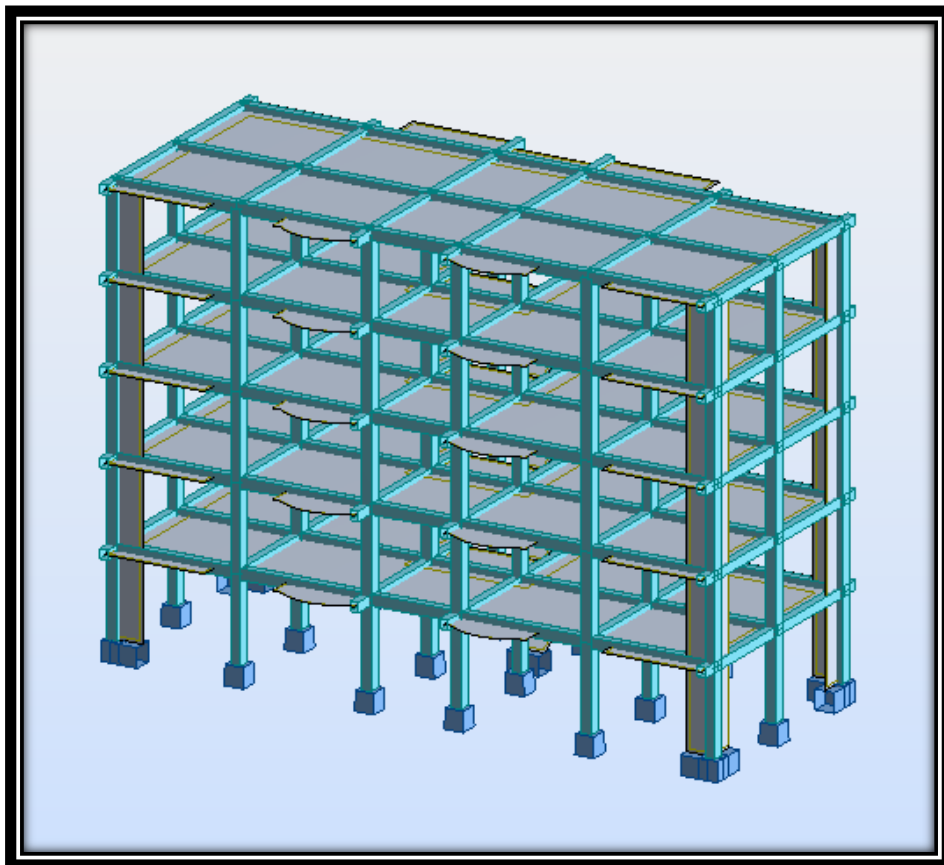
### **I.2.3. Caractéristiques des matériaux :**

- Résistance mécanique du béton à la compression et à la traction :  
 $f_{c28} = 25\text{MPa}; f_{t28} = 2.1\text{MPa}$
- Résistance mécanique élastique d'armature à la compression et à la traction :  $f_c = 400\text{MPa}$
- Module de déformation longitudinal instantané du béton :  $E_{bi} = 32164\text{MPa}$ , calculé selon la formule suivante :  $E_{bi} = 11000. f_{cj}$
- Module de déformation longitudinal différé du béton :  $E_{bj} = 10819\text{MPa}$ , calculé selon la formule suivante :  $E_{bj} = 3700. f_{cj}$
- Module de déformation longitudinal des armatures :  $E_s = 200000\text{MPa}$
- Poids volumique du béton :  $\gamma = 25\text{Kn/m}^3$
- $\nu = 0.2$  : dans le cas des états limitent de services.
- $\nu = 0$  : dans le cas des états limites ultimes.

### **I.3. Règlements et normes utilisés :**

L'étude du projet est élaborée suivant les règles de calcul et de conception qui sont mises en vigueur actuellement en Algérie à savoir :

- Le RPA 99 révisée 2003(Règlement Parasismique Algérien). [1]
- Le BAEL 91(Béton Armé Aux Etats Limites). [2]
- Le CBA93 (Code De Béton Armé). [3]
- DTR-BC2.2 (Document Technique Règlementaire Charges Et Surcharges).[4]
- DTR-BC2.33.1 (Règles de calcul des fondations des superficielles).[5]



(Figure I.1) :La vue en 3D de la structure

## **I.4.Pré dimensionnement des éléments structuraux :**

### **I.4.1.Introduction :**

Le pré-dimensionnement a pour but de déterminer les dimensions de différents éléments de la structure. Ces dimensionnement sont choisis selon les préconisations du RPA99 version2003,CBA 93, BAEL 91, les résultats obtenus ne sont pas définitifs, ils peuvent être augmentés après vérification dans la phase de dimensionnement.

### **I.4.2.Pré dimensionnement des planchers :**

Le plancher est une séparation entre les niveaux qui transmet les charges et lessurcharges qui lui sont directement appliquées aux éléments porteurs tout en assurantdes fonctions de confort comme l'isolation phonique, thermique et l'étanchéité desniveauxextrêmes.On distingue deux types de plancher :

- Plancher à corps creux.
- Plancher à dalle pleine.

-Dans ce projet les planchers sont en corps creux,

#### **I.4.2.1.Dalles en corps creux :**

Il sent composer de corps creux (hourdis) et d'une dalle de compression ferrailé par treillis soudé reposant sur des poutrelles en béton armé placées suivant le sens le plus petit.

L'épaisseur de ce type de planchers doit être calculée pour que les flèches développées durant la durée d'exploitation de l'ouvrage ne soient pas trop élevées à cause des désordres que cela occasionnera aux cloisons, aux revêtements et au plancher lui-même. On déduira donc l'épaisseur des dalles à partir des conditions ci-après :

##### **a. Résistance au feu :**

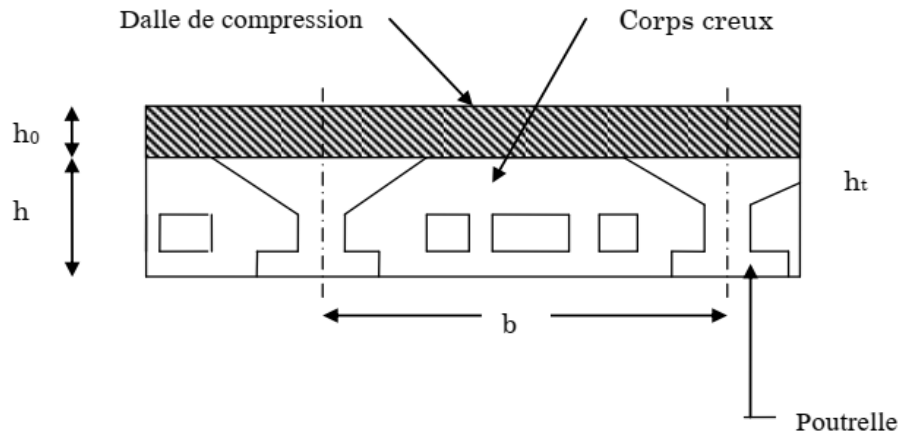
- e = 07cm** pour une heure de coup de feu
- e = 11cm** pour deux heures de coup de feu
- e = 17.5cm** pour trois heures de coup de feu

En adopte **e = 16 cm**

##### **b. Isolation phonique :**

Pour assurer une isolation phonique minimale, l'épaisseur de plancher doit être supérieure ou égale à 13cm et le confort acoustique exige une épaisseur minimale de 16 cm donc on adopte une épaisseur de :  $e = 16\text{cm}$

❖ Dimensionnement



(Figure I.2) : Coupe du plancher à corps creux

$L_{max}$ : La portée maximale entre nus d'appuis dans le sens de disposition des poutrelles.

- $h_t$  : Hauteur totale du plancher,  $h_t := h + h_0$
- $h_0$  : Hauteur de la dalle de compression.
- $h$  : Hauteur de l'hourdis (corps creux).
- $b$  : distance entre axes des poutrelles.

La disposition des poutrelles est faite selon les deux critères suivants :

- Critère de la petite portée.
- Critère de continuité

-L'épaisseur totale des planchers doit satisfaire la condition suivant : C.B.A.93 [B.6.8.2.4]

$$h_t \geq \frac{L_{max}}{22.5}$$

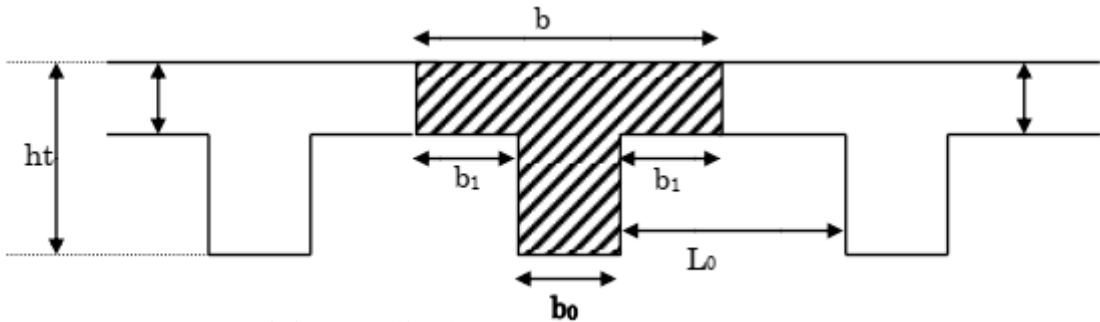
$L(cm)$	$\frac{L_{max}}{22.5}$	$h_t(cm)$
425	18.89	20=(16+4)

Tableau (I.1): Pré dimensionnement des planchers

### C. Les poutrelles :

Les poutrelles se calculent en section en T. la largeur de dalle de compression  $b$  à prendre est définie par :

$$\frac{b-b_0}{2} \leq \min\left(\frac{l_x}{2}; \frac{l_y}{10}\right)$$



(Figure I.3) :Schéma d'une poutrelle

$h_t$  : Hauteur du plancher = 25cm.

$b$  : Largeur de la table de compression.

$l_x$  : Distance maximale entre nus de deux poutrelles.

$l_y$  : C'est la longueur de la travée minimale dans les différents types des poutrelles.

$b_0$  : Largeur de la poutrelle, soit  $b_0 = 10$  cm

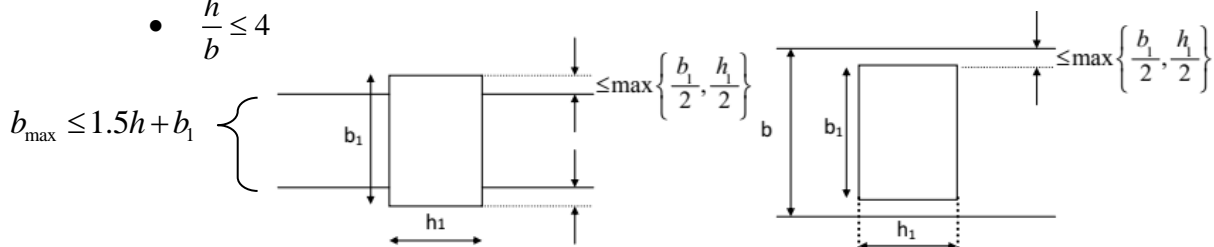
### I.4.3. Pré dimensionnement des poutres et poteaux :

#### I.4.3.1. Les poutres :

Ce sont des éléments porteurs en béton armé à ligne moyenne rectiligne, dont la portée est prise entre nus d'appuis. On distingue "**les poutres principales**" qui constituent des appuis aux poutrelles et les "**poutres secondaires**" qui assurent le chaînage.

Selon « R.P.A 99 version 2003 » (page 51) les dimensions des poutres de viennent respecter les normes suivantes :

- $b \geq 20$  cm Où  $b$  : est largeur de la poutre.
- $h \geq 30$  cm  $h$  : hauteur utile de la poutre.
- $\frac{h}{b} \leq 4$



(Figure I.4) :Démensions a respecter selon RPA99-V2003

Pour le pré-dimensionnement des poutres de notre projet on utilise la condition suivante :

$$\frac{L_{max}}{15} \leq h \leq \frac{L_{max}}{10} \quad 0.3h \leq h \leq 0.7h$$

Les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Type de poutre	L(cm)	h(cm)	b(cm)	Vérification (condition minimal)	Section (b×h)
Poutre principale	480	40	30	Vérifiée	(30×40)
Poutre secondaire	425	35	30	Vérifiée	(30×35)

**Tableau (I.2) : Pré dimensionnement des poutres**

#### I.4.3.2.poteaux :

En considérant que les éléments agissants sur les poteaux seront réduits à une force de compression centrée N perpendiculaire à la surface Set passant par le centre de gravité.

Dans premier temps on prend la section des poteaux comme des raisons d'architecture : **35 × 45** sections rectangulaires

Selon le RPA99/2003(Article 7.4.1)

$$\left\{ \begin{array}{l} \min( b ; h) \geq 25 \text{ cm} \\ \min( b ; h) \geq \frac{he}{20} \\ 0.25 \leq \frac{b}{h} \leq 4 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} 35 \text{ cm} \geq 25 \text{ cm} \\ 35 \text{ cm} \geq 15.5 \text{ cm} \\ 0.25 \leq 0.78 \leq 4 \end{array} \right.$$

En prend **(35 × 45) cm<sup>2</sup>**

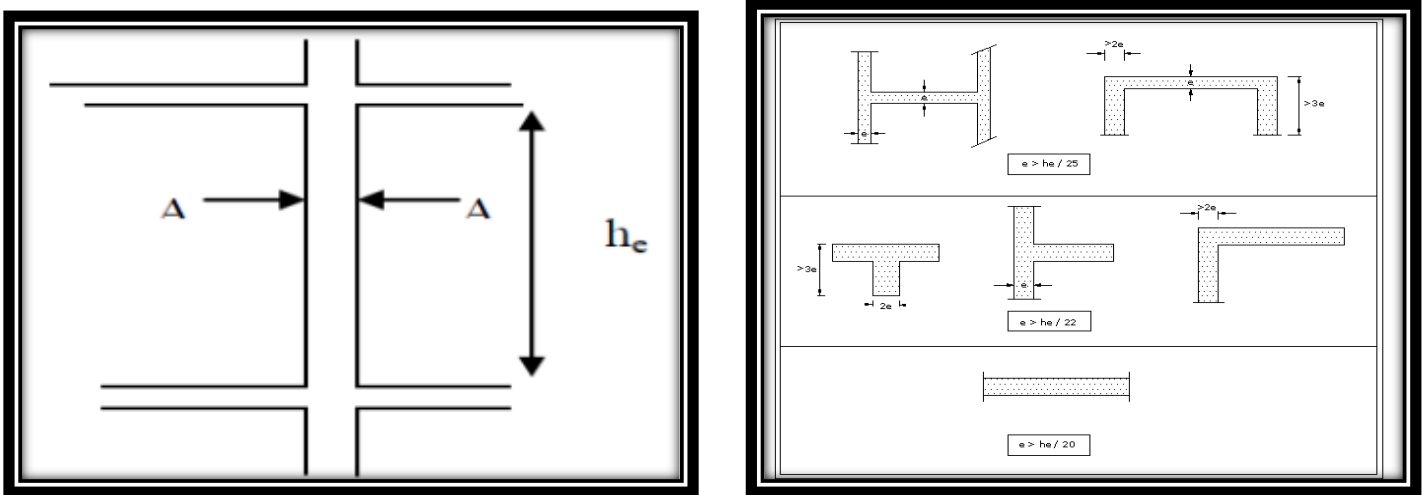
**I.4.4. pré dimensionnement des voiles de contreventement :**

Les voiles sont des murs en béton armé, d'après l'article [7.7.1] du RPA99/Version2003 les voiles doit respecter la condition

$L > 4a$ , avec :

$L$  : la longueur totale du voile et  $a$  : épaisseur de voile.

L'épaisseur minimale du voile est de 15cm, elle doit être déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage  $h_e$  et de conditions de rigidité aux extrémités comme indiqué dans la figure suivante :



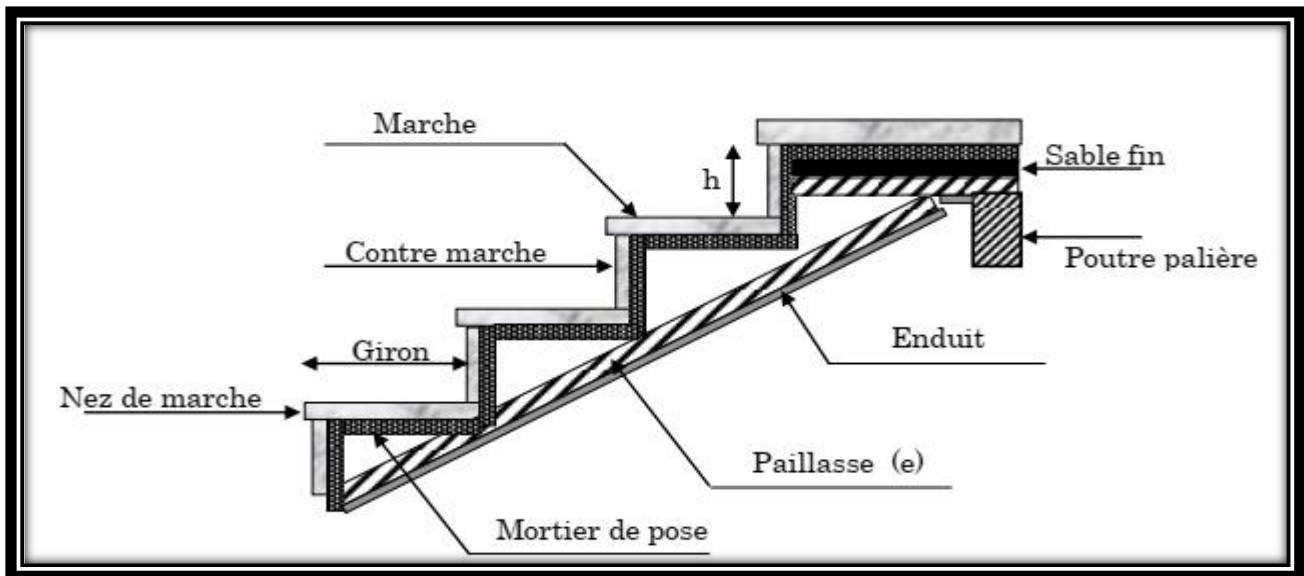
**(Figure I.5) :Epaisseur a respecter pour voiles selon RPA99-V2003**

$a \geq h_e / 20$  Avec :  $h_e$  : Hauteur libre entre deux étages.

$a \geq 290 / 20 = 14.5 \text{ cm}$ .....**On prend** :  $a=20\text{cm}$

### I.4.5. pré dimensionnement des escaliers :

L'escalier est un élément qui sert à relier les différents niveaux d'un bâtiment. Les différents éléments constituant un escalier sont :



(Figure I.6) :Schéma d'un escalier

Le dimensionnement revient à déterminer.

- la hauteur  $h$  des contremarches se situe entre 14 et 18cm.
- la largeur  $g$  se situe entre 25 et 32cm.

Dans notre projet on a un seul type d'escalier, qui est droit en béton armé.

Pour déterminer les dimensions des marches et contre marches «  $g$  et  $h$  » on utilise la relation de BLONDEL :  $59 \text{ cm} \leq 2h + g \leq 64 \text{ cm}$

$n_1$ : nombre de marche.

$n$ : nombre de contre marche

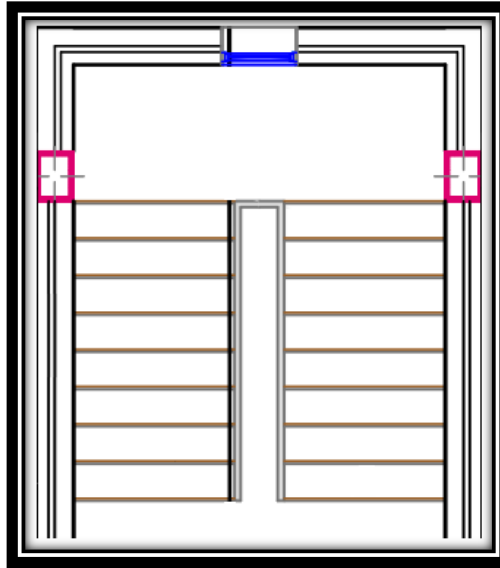
$H$  : hauteur de la volé

$g$  : giron.

$L$  : longueur totale d'escalier.

$h$  : hauteur de la contre marche.

Selon la hauteur à montrer nous avons un type d'escalier à deux volées dans toute la structure



(Figure I.7) : Vue en plan d'escalier

➤ Calcul du nombre de marche ( $n_1$ ) et de contre marche ( $n$ )

$$H = 1.53\text{m}$$

$$L = 2.4\text{m}$$

$$\alpha = 32.52^\circ$$

$$64 n^2 - (64+2H+L) n + 2H = 0 \Rightarrow 64 n^2 - (64+2 \times 1.53+2.4) n + 2 \times 1.53 = 0$$

$$64n^2 - 610n + 306 = 0$$

Après la résolution, on trouve :  $n = 9$  On opte pour un nombre de contre marche :  $n = 9$  Ce qui donne le nombre de marche  $n-1 = 8$

➤ Calcul du giron ( $g$ ) et la hauteur d'une contre marche ( $h$ ) = = 17cm ; = = 30cm

➤ Epaisseur de la paillasse

$$l = 1.40 + \Rightarrow l = 4.24\text{m}$$

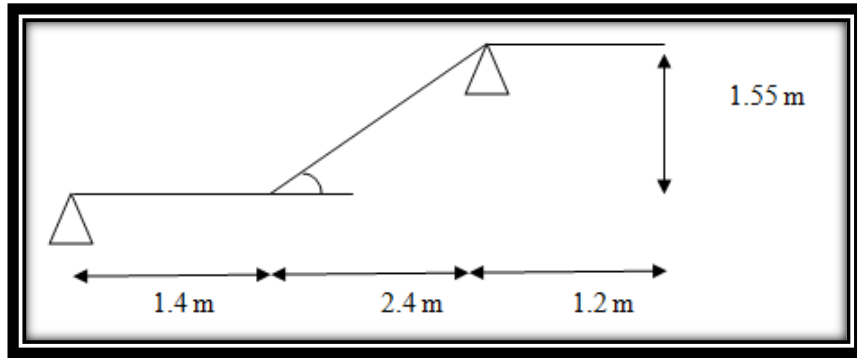
$$\leq e \leq \Rightarrow \leq e \leq \Rightarrow 14.13 \leq e \leq 21.20$$

On prend  $e = 15\text{cm}$ .

➤ Epaisseur du palier de repos

Le palier de repos se dimensionne comme une dalle pleine sur un appui (console) Condition de résistance :

- $e \geq L / 20$  ;  $L$  : longueur de la console  $L = 160 \text{ cm}$
- $e \geq 160 / 20 \Rightarrow e = 8.00 \text{ cm}$
- Condition de coupe-feu :  $e \geq 11 \text{ cm}$  pour deux heures de coupe-feu.
- On choisit l'épaisseur du palier de repos :  $e = 15 \text{ cm}$



(Figure I.8) :Schéma statique des escaliers

Voleé	H (m)	L (m)	Inclinaison $\alpha$ (°)	Nombre de contre marche	h(m)	g ( cm)	Epaisseur (cm)
1	1.55	2.40	32.52	8	17	30	16

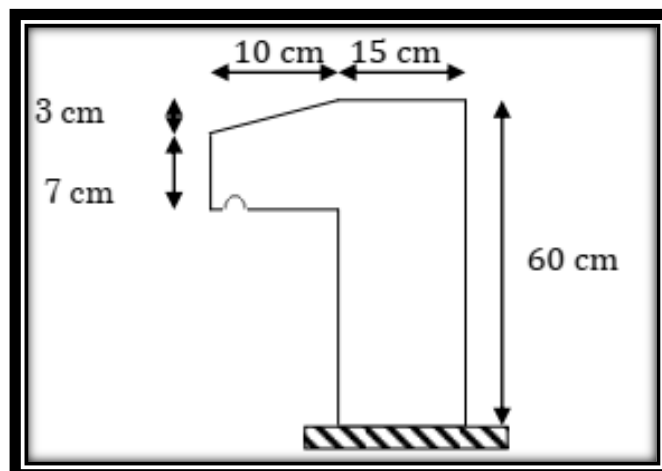
Tableau (I.3) :Caractéristique d'escalier

#### I.4.6.L'acrotère :

C'est un élément en béton armé, encastré au niveau du plancher terrasse et ayant pour rôle d'empêcher l'infiltration des eaux pluviales entre la forme de pente et le plancher terrasse, ses dimensions sont mentionné dans les plans d'architecture (exemple de la figure suivante).

$$S_{acc} = 15 \times 16 + (3 \times 10) / 2 + 7 \times 10$$

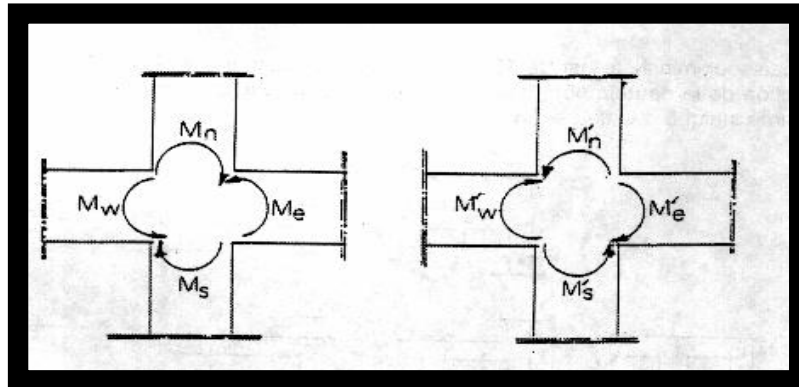
$$S_{acc} = 0.0985 \text{ m}^2$$



(Figure I.9) :schéma de l'acrotère

### I.4.7. pré dimensionnement des nœuds:

Cette disposition tend à faire en sorte que les rotules plastiques se forment dans les poutres plutôt que dans les poteaux. Néanmoins.



(Figure I.10) :Dimensionnement d'un nœud poutre-poteau

$$|M_n| + |M_s| \geq 1.25(|M_w| + |M_e|)$$

$$|M'_n| + |M'_s| \geq 1.25(|M'_w| + |M'_e|)$$

Les vérifications représentées dans ce tableau:

Élément	largeur <i>b</i>	hauteur <i>h</i>	inertie= $b \cdot h^3 / 12$	$I_{\text{poteau}} / I_{\text{poutre}} \geq 1.25$	Obs
<i>Poteaux</i>	35	45	213333.34	.....	
<i>Pouters principaux</i>	30	40	160000	1.66	OK
<i>Poutre secondaires</i>	30	35	125052.08	2.12	OK

Tableau (I.4) :Vérification de la rotule plastique

• **I.5. Evaluation des charges :**

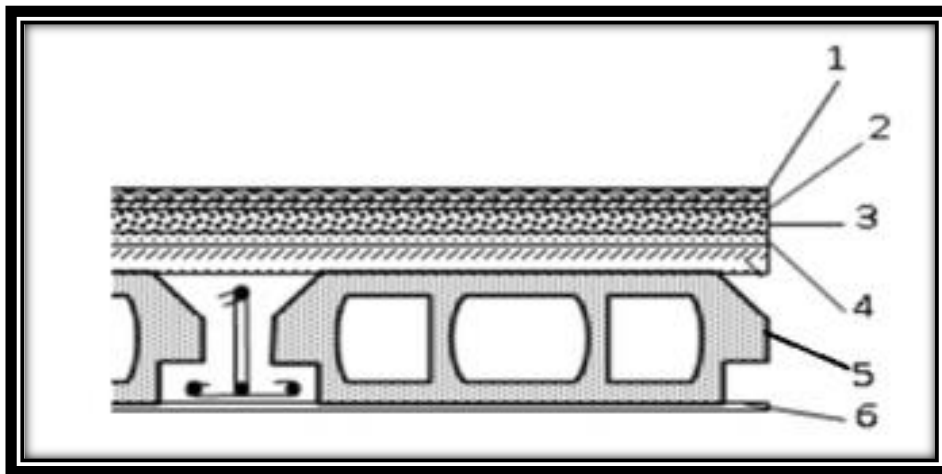
Le calcul des charges et surcharges est effectué selon DTRB.C.22

**I.5.1.Plancher :**

**I.5.1.1.Plancher terrasse (16+4) :**

<i>Chargement</i>	<i>Poids volumique (KN /m3)</i>	<i>e(m)</i>	<i>Poids G(KN/m2)</i>
<b>1-Gravillon de protection</b>	<i>17</i>	<i>0.05</i>	<i>0.85</i>
<b>2- Etanchéité multicouche</b>	<i>8</i>	<i>0.02</i>	<i>0.16</i>
<b>3- forme pente de béton</b>	<i>22</i>	<i>0.08</i>	<i>1.76</i>
<b>4-isolation phonique</b>	<i>4</i>	<i>0.04</i>	<i>0.16</i>
<b>5- Corps creux 16+4</b>	<i>14.25</i>	<i>16+4</i>	<i>2.85</i>
<b>6-Enduit de plâtre</b>	<i>10</i>	<i>0.02</i>	<i>0.2</i>
			<i>G(KN/m2)</i>
			<i>5.98</i>
			<i>Q(KN/m2)</i>
			<i>1</i>

Tableau (I.5) : Charge pour plancher terrasse (inaccessible)

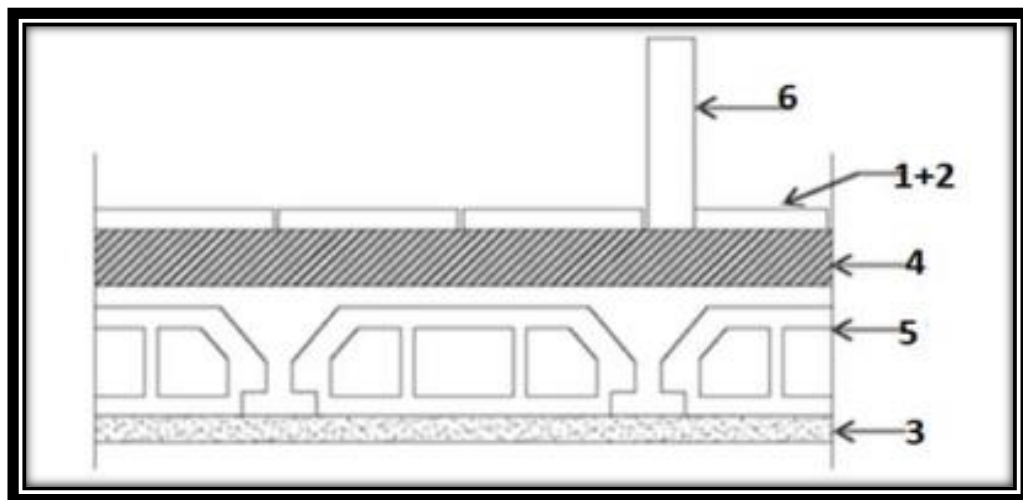


(Figure I.11) :Détail plancher terrasse (inaccessible)

**I.5.1.2.Plancher étage courant (16+4) :**

<i>Chargement</i>	<i>Poids volumique (KN /m3)</i>	<i>e(m)</i>	<i>Poids G(KN/m2)</i>
1-carrelage	22	0.02	0.44
2- mortier de pose	20	0.02	0.40
3- enduit de plâtre	10	0.02	0.20
4- lite de sable	18	0.02	0.36
5- Corps creux 16+4	14.25	16+4	2.85
6-closions légère	/	/	1
			<i>G(KN/m2)</i>
			5.25
			<i>Q(KN/m2)</i>
			1.5

Tableau (I.6) :Evaluation des charges de Plancher étage courant



(Figure I.12) :Détail plancher étage courant

### I.5.2.Murs extérieurs:

<i>Chargement</i>	<i>Poids volumique(KN/3)</i>	<i>e(m)</i>	<i>Poids G (KN/m<sup>2</sup>)</i>
<i>Enduit en plâtre</i>	<b>10</b>	<b>0.02</b>	<b>0.20</b>
<i>Briques creuses</i>	<b>9</b>	<b>0.15</b>	<b>1.35</b>
<i>Lame d'air</i>	<i>/</i>	<b>0.05</b>	<b>0.00</b>
<i>Briques creuses</i>	<b>9</b>	<b>0.10</b>	<b>0.90</b>
<i>Enduit de ciment</i>	<b>20</b>	<b>0.02</b>	<b>0.40</b>
<b>G(KN/m<sup>2</sup>)</b>			<b>2.85 KN/m<sup>2</sup></b>

Tableau (I.7) :Evaluation des charges de Murs extérieurs

### I.5.3.L'acrotère :

$$G = 0.0985 \times 25 = 2.46 \text{KN/m}$$

La charge permanente totale pour l'acrotère est **G = 2.70 KN/m<sup>2</sup>**

<i>HauteurXJ(cm)</i>	<i>Épaisseur (cm)</i>	<i>Enduit en cimentG(KN/m)</i>	<i>Poidspropre(KN/ml)</i>
<b>60</b>	<b>10</b>	<b>0.24</b>	<b>2.46</b>
<b>G = 2.70KN/m<sup>2</sup></b>			

Tableau (I.8) :Evaluation des charges de l'acrotère

### I.5.4. Les escaliers :

#### I.5.4.1. Palier :

<i>Chargement</i>	<i>Poids volumique (KN /m3)</i>	<i>e(m)</i>	<i>Poids G(KN/m2)</i>
<i>1-poids propre de paillasse</i>	<i>25</i>	<i>0.15/cos α</i>	<i>4.46</i>
<i>2- poids propre de marche</i>	<i>22</i>	<i>0.15/2</i>	<i>1.70</i>
<i>3- carrelage</i>	<i>22</i>	<i>0.02</i>	<i>0.44</i>
<i>4- mortier de pose</i>	<i>20</i>	<i>0.02</i>	<i>0.4</i>
<i>5- enduit de ciment</i>	<i>14</i>	<i>0.02</i>	<i>0.28</i>
<i>6-gard corps</i>			<i>0.2</i>
		<i>G(KN/m2)</i>	<i>7.5</i>
		<i>Q(KN/m2)</i>	<i>2.5</i>

Tableau(I.9) :Evaluation des charges de palais d'escalie

#### I.5.4.2. Volée :

<i>Chargement</i>	<i>Poids volumique (KN /m3)</i>	<i>e(m)</i>	<i>Poids G(KN/m2)</i>
<i>1- carrelage</i>	<i>22</i>	<i>0.02</i>	<i>0.44</i>
<i>2- poids propre de palier de repos</i>	<i>25</i>	<i>0.15</i>	<i>3.75</i>
<i>3- mortier de pose</i>	<i>20</i>	<i>0.02</i>	<i>0.4</i>
<i>4- enduit de ciment</i>	<i>14</i>	<i>0.02</i>	<i>0.28</i>
		<i>G(KN/m2)</i>	<i>4.9</i>
		<i>Q(KN/m2)</i>	<i>2.5</i>

Tableau (I.10) :Evaluation des charges de la volée d'escalier.

**I.5.5.Balcon :**

<i>Chargement</i>	<i>Poids volumique (KN /m3)</i>	<i>e(m)</i>	<i>Poids G(KN/m2)</i>
<i>1- carrelage</i>	<i>22</i>	<i>0.02</i>	<i>0.44</i>
<i>2- poids propre de la dalle plaine</i>	<i>25</i>	<i>0.15</i>	<i>3.75</i>
<i>3- mortier de pose</i>	<i>20</i>	<i>0.02</i>	<i>0.4</i>
<i>4- enduit de ciment</i>	<i>14</i>	<i>0.02</i>	<i>0.28</i>
		<i>G(KN/m2)</i>	<i>4.9</i>
		<i>Q(KN/m2)</i>	<i>3.5</i>

**Tableau (I.11) :Charge et surcharge du balcon**

# Chapitre 2

Calcul par la méthode statique équivalente

## **II.1. Principe de la méthode statique équivalente:**

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.

Les forces sismiques horizontales équivalentes seront considérées appliquées successivement suivant deux directions orthogonales X et Y.

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

## **II.2. Condition d'application:**

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

- A. Le bâtiment ou bloc étudié, satisfaisait aux conditions de régularité en plan et en élévation prescrites au chapitre III, paragraphe 3.5 du RPA avec une hauteur au plus égale à 65m en zones I et II et à 30m en zones III
- B. Le bâtiment ou bloc étudié présente une configuration irrégulière tout en respectant, outre les conditions de hauteur énoncées en a), des conditions complémentaires (voir RPA-page33)

### **II.2.1. Régularité en plan:**

- A. Le bâtiment doit présenter une configuration sensiblement symétrique vis à vis de deux directions orthogonales aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celle des masses : **OK**
- B. A chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre de gravité des masses et le centre des rigidités ne dépasse pas 15% de la dimension du bâtiment mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.

#### **- Centre de gravité des masses :**

Pour simplifier le calcul on propose que le CDG est coïncide au CDG du plancher :

$$X_G = L_x/2 = 11.15 \text{ m}$$

$$Y_G = L_y/2 = 4.80 \text{ m}$$

### Centre de rigidités:

Le centre de rigidité est calculé comme suit :

$$X_C = \frac{\sum X_i \cdot R_{it}}{\sum R_{it}} = \frac{\sum X_i \cdot I_{it}}{\sum I_{it}} ; \quad Y_C = \frac{\sum Y_i \cdot R_{it}}{\sum R_{it}} = \frac{\sum Y_i \cdot I_{it}}{\sum I_{it}}$$

Avec:  $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{I_i} : \text{moment d'inertie du file 'i'} \\ \mathbf{R_i} : \text{rigidité du file 'i'} \end{array} \right.$

$\mathbf{R_i} = 12EI/h^3$  ;  $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{E} : \text{module de Young du béton} \\ \mathbf{h} : \text{hauteur du poteau ou voile} \end{array} \right.$

$$I_{\text{poteau}} = b \cdot \frac{h^3}{12} = 0.35 \times \frac{0.45^3}{12} = 0.0026 \text{ m}^4$$

$$I_{\text{voile}} = b \cdot \frac{h^3}{12} = 0.2 \times \frac{1^3}{12} = 0.0168 \text{ m}^4$$

Inertie de files longitudinales :

$$\left\{ \begin{array}{l} Y=0 \text{ ou } 9.60 \text{ m} \quad \Longrightarrow \quad I_{il} = 0.0492 \text{ m}^4 \text{ (file de rive)} \\ Y= 3.85 \text{ m} \quad \Longrightarrow \quad I_{il} = 0.0156 \text{ m}^4 \text{ (file intermédiaire)} \end{array} \right.$$

Inertie de files transversales :

$$\left\{ \begin{array}{l} x= 0 \text{ ou } 22.30 \text{ m} \quad \Longrightarrow \quad I_{it} = 0.0414 \text{ m}^4 \text{ (file de rive)} \\ x= 4.55 \text{ m} ; 9.35 \text{ m} ; 12.65 \text{ m} ; 17.45 \text{ m} \quad \Longrightarrow \quad I_{it} = 0.0078 \text{ m}^4 \text{ (file intermédiaire)} \end{array} \right.$$

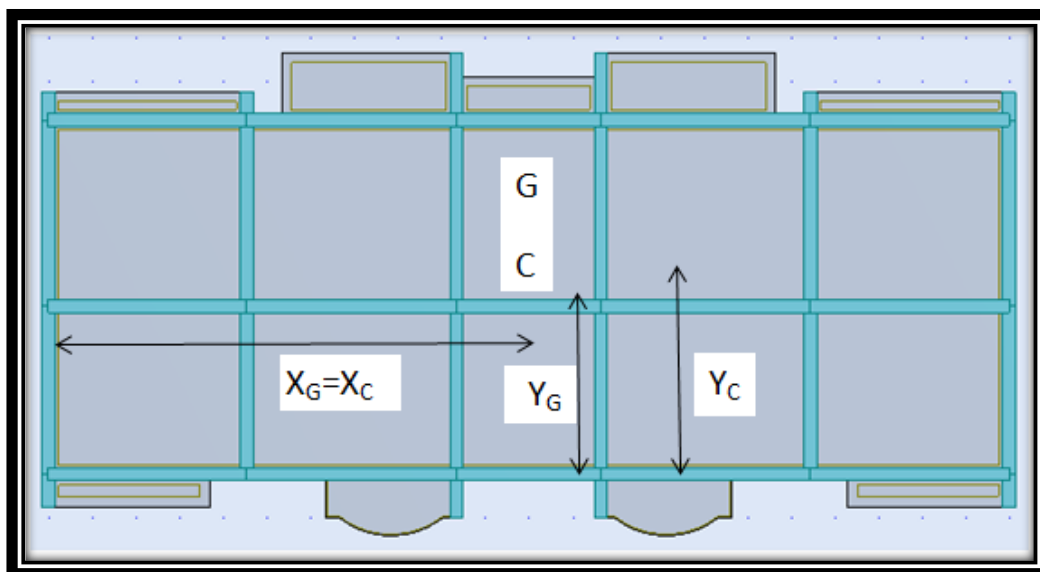
Après le calcul on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_C = 11.05 \text{ m} \\ Y_C = 4.80 \text{ m} \end{array} \right.$$

Donc on peut calculer l'excentricité :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_X = |X_G - X_C| = 0.1 \text{ m} < 15\% L_X \\ e_Y = |Y_G - Y_C| = 0 \text{ m} < 15\% L_Y \text{ (Symétrie)} \end{array} \right.$$

Donc la condition de l'excentricité du RPA est vérifiée (régularité structurelle).....OK



(Figure II.1) : Position du C.D.G et C.T

- A. La forme du bâtiment doit être compacte avec un rapport longueur/largeur du plancher inférieur ou égal 4  $L_x/L_y = 22.30/9.60 = 2.32 \leq 4$  .....OK
- B. La somme des dimensions des parties rentrantes ou saillantes du bâtiment dans une direction donnée ne doit pas excéder 25% de la dimension totale du bâtiment dans cette direction (pas de décrochement).....OK
- C. Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante vis à vis de celle des contreventements verticaux pour être considérés comme indéformables dans leur plan. Dans ce cadre la surface totale des ouvertures de plancher doit rester inférieure à 15% de celle de ce dernier. Dans se cas pas des ouvertures sur plancher.....OK

### **II.2.2. Régularité en élévation:**

- Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu, dont la charge ne se transmette pas directement à la fondation. **OK**
- Aussi bien la raideur que la masse des différents niveaux restent constants ou diminuent progressivement et sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment. **OK**
- Dans le cas de décrochements en élévation, la variation des dimensions en plan du bâtiment entre deux niveaux successifs ne dépasse pas 20% dans les deux directions de calcul et ne s'effectue que dans le sens d'une diminution avec la hauteur. La plus grande dimension latérale du bâtiment n'excède pas 1,5 fois sa plus petite dimension. Dans ce cas pas de décrochement en élévation **OK**

Donc cette structure est régulière en plan et en élévation avec

$H_{\text{totale}} = 19.04 \leq 30\text{m}$  ; pour cela on peut utiliser

la méthode statique équivalente

### **II.3. Modélisation:**

1. 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
2. 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.
3. Seul le mode fondamental de vibration de la structure est à considérer dans le calcul de la force sismique totale

## II.4. 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 la formule :

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

$A$  : coefficient d'accélération de zone, donné par le tableau 4.1 du RPA suivant la zone sismique et le groupe d'usage du bâtiment :

$A=0.25$  (zone III, et groupe d'usage 2)

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

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

$T_2$  : période caractéristique, associée à la catégorie du site et donnée par le tableau 4.7 du RPA :

$T_2=0.50\text{s}$  (SiteS3)

$\eta$ : facteur de correction d'amortissement donné par la formule :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2 + \xi)}} \geq 0.7$$

où  $\xi$  (%) est le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

$\xi=7\%$  (Portiques en Béton armé avec Remplissage Dense) donc  $\eta=0.88$

**\* Estimation de la période fondamentale de la structure :**

1. 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.

2. La formule empirique à utiliser selon les cas est la suivante :  $T = C_T h_N^{3/4}$  ;  $h_N$ : hauteur mesurée en mètres à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau (N).  $h_N = 15.50$  m

$C_T$  : coefficient, fonction du système de contreventement, du type de remplissage et donné par le tableau 4.6 du RPA ;  $C_T = 0.05$  (contreventement mixte voiles+portiques)

$$T = 0.05 \times 15.50^{3/4} = 0.39 \text{ sec}$$

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 respectivement par les deux formules.

$$T_x = \frac{0.09 \times 15.50}{\sqrt{22.30}} = 0.29 \text{ sec}$$

$$T_y = \frac{0.09 \times 15.50}{\sqrt{9.60}} = 0.45 \text{ sec}$$

Donc :  $T_x = \min(0.46 ; 0.29) = 0.29$   
sec

$T_y = \min(0.46 ; 0.45) = 0.45$  sec

$T_x ; T_y \leq T_2 \dots \dots \dots D = 2.5 \eta = 2.20$

**R : coefficient de comportement**

global de la structure sa valeur unique est donnée par le tableau 4.3 en fonction du système de contreventement tel que défini en 3.4 (voir RPA)

Système mixte portiques/voiles avec interaction donc : **R=5**

**Q : facteur de qualité :**

Le facteur de qualité de la structure est fonction 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

La valeur de Q est déterminée par la formule :

$$Q = 1 + \sum_1^6 P_q$$

$P_q$  est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité  $q$  " est satisfait ou non". Sa valeur est donnée au tableau 4.4 du RPA Les critères de qualité "q" à vérifier sont :

Conditions minimales sur les files de contreventement:

1. 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. (02 travées dans le sens Y) **NON**
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. (03 files dans le sens X) **NON**
3. Régularité en plan: La structure est classée régulière en plan. **OUI**
4. Régularité en élévation. **OUI**
5. Contrôle de la qualité des matériaux :Des essais systématiques sur les matériaux mis en œuvre doivent être réalisés par l'entreprise **OUI**
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 **OUI**

<i>Critère q</i>	<i>P<sub>q</sub></i>	
	<i>Observé</i>	<i>N/ Observé</i>
<b>1. Conditions minimales sur les files d'contreventement</b>	<b>0</b>	<b>0.05</b>
<b>2. Redondance en plan</b>	<b>0</b>	<b>0.05</b>
<b>3. Régularité en plan</b>	<b>0</b>	<b>0.05</b>
<b>4. Régularité en élévation</b>	<b>0</b>	<b>0.05</b>
<b>5. Contrôle de la qualité des matériaux</b>	<b>0</b>	<b>0.05</b>
<b>6. Contrôle de la qualité de l'exécution</b>	<b>0</b>	<b>0.10</b>

(Tableau II.1) : Valeurs des pénalités P<sub>q</sub>

Don :  $Q=1+(0.05+0.05+0+0+0+0)=1.10$

**W : poids total de la structure :**

W est égal à la somme des poids W<sub>i</sub>, calculés à chaque niveau (i) :  $W = \sum_{i=1}^n W_i$

avec  $W_i = W_{Gi} + \beta W_{Qi}$

**W<sub>Gi</sub> :** poids dû aux charges permanentes et à celles des équipements fixes éventuels, solidaires de la structure

**W<sub>Qi</sub> :** charges d'exploitation

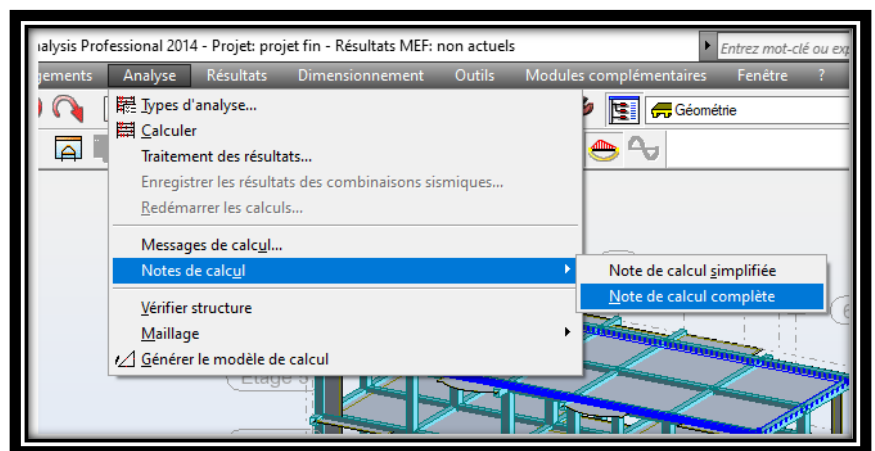
**β:** coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation et donné par le tableau 4.5 du RPA.

Bâtiments d'habitation... ..... **β=0.2**

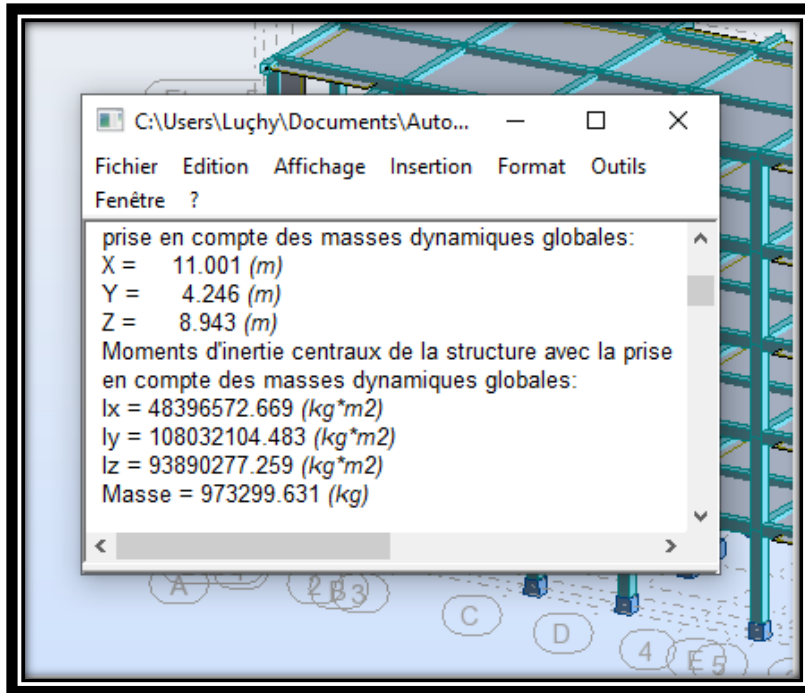
**W = 973299.631 kg = 9732.99kn**

<p><b>La masse de la structure selon robot analyse</b></p>
<p><b>9732.99kn</b></p>

(Tableau II.2) : Poids total de la structure selon robot



(Figure II.2.1) : Comment trouver le poids



(Figure II.2.2) : Comment trouver le poids

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

$$V = \frac{A \times D \times Q}{R} \times W = \frac{0.25 \times 2.2 \times 1.10}{5} \times 9732.99 = 1177.70 \text{ kn}$$

Donc :  $V_X = V_Y = 1177.70 \text{ KN} (D_X = D_Y)$

### **II.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 les formules suivantes :

$$V_K = F_T + \sum F_i$$

La force concentrée  $F_t$  au sommet de la structure permet de tenir compte de l'influence des modes supérieurs de vibration.

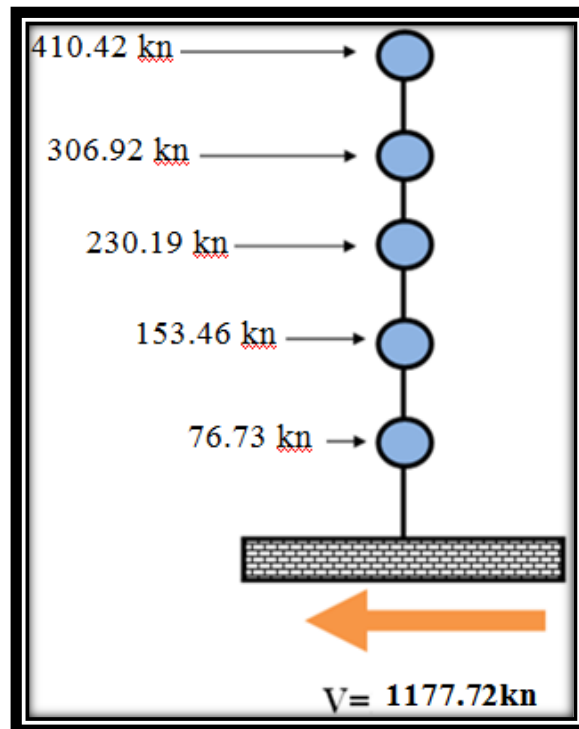
La valeur de  $F_t$  sera prise égale à 0 quand  $T$  est plus petit ou égale à 0,7 secondes...  $F_t = 0$  ( $T_x$  et  $T_y \leq 0.7s$ )

La partie restante de  $V$  soit  $(V - F_t)$  doit être distribuée sur la hauteur de la structure suivant la formule :  $F_i = (V - F_t) W_i \cdot h_i / \sum (W_j \cdot h_j)$

Les résultats représentés dans ce tableau :

Niveaux	(V-Ft) (kn)	Wi (kn)	hi (m)	Wi*hi	$\sum Wjhj$	Fi (kn)
Niveau 01	1177.70	1919.80	3.10	5951.38	<b>91347.24</b>	76.73 kn
Niveau 02	1177.70	1919.80	6.20	11902.76	<b>91347.24</b>	153.46 kn
Niveau 03	1177.70	1919.80	9.30	17854.14	<b>91347.24</b>	230.19 kn
Niveau 04	1177.70	1919.80	12.40	23805.52	<b>91347.24</b>	306.92 kn
Niveau 05	1177.70	2053.77	15.50	31833.43	<b>91347.24</b>	410.42 kn
$\Sigma$		<b>9732.99kn</b>		<b>91347.24kn</b>		<b>1177.72kn</b>

(Tableau II.3) :Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur



(Figure II.3) :Distribution de la résultante des forces sismiques selon la hauteur

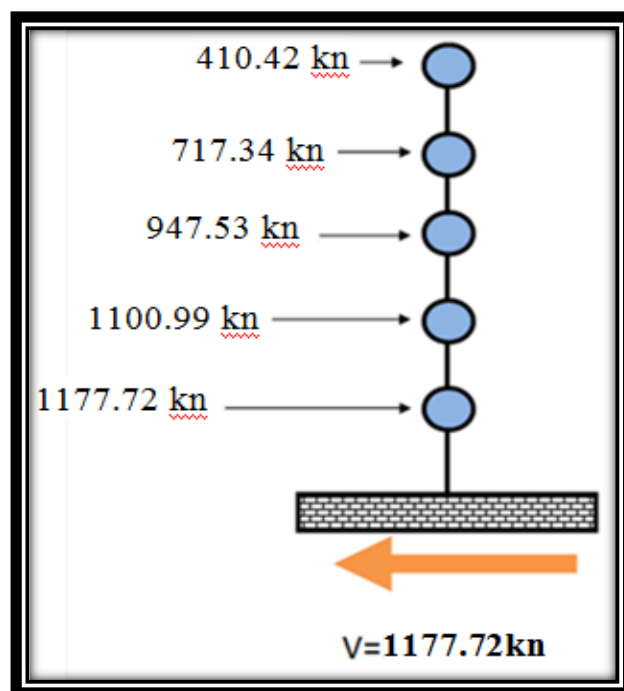
• **II.6. Distribution de l'effort tranchant selon la hauteur:**

L'effort tranchant au niveau de l'étage k :

$$V_K = F_T + \sum_{i=k}^n F_i$$

<i>Niveaux</i>	<i>Fi (kn)</i>	<i>Vi (kn)</i>
<i>Niveau 01</i>	76.73 kn	1177.72kn
<i>Niveau 02</i>	153.46 kn	1100.99kn
<i>Niveau 03</i>	230.19 kn	947.53kn
<i>Niveau 04</i>	306.92 kn	717.34 kn
<i>Niveau 05</i>	410.42 kn	410.42 kn
$\Sigma$	<b>1177.72kn</b>	

(TableauII.4) : Effort tranchant au niveau d'étage



(Figure II.4) : Effort tranchant au niveau d'étage

## II.7. Calcul des moments fléchissant selon hauteur:

Le moment fléchissant au niveau de l'étage k est calculé comme suit:

$$M_K = M_{K+1} + V_{K+1} \times h_e \text{ avec:}$$

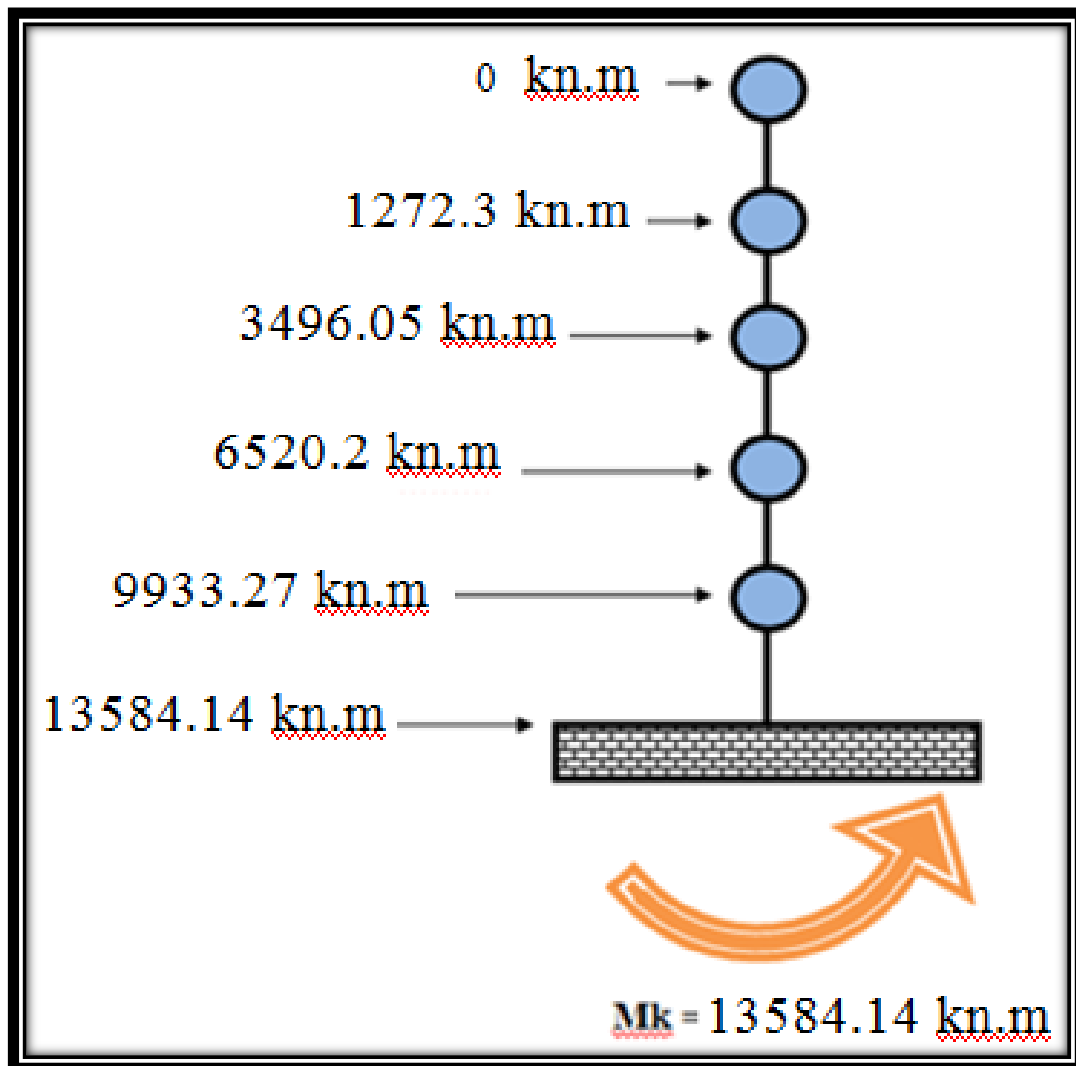
$M_k, M_{k+1}$ : moments fléchissant au niveau de l'étage k et k+1

$V_{k+1}$ : effort tranchant au niveau de l'étage k+1

$h_e$ : hauteur d'étage k+1 ;  $h_e = h_{k+1} - h_k$

Niveaux k	$V_{k+1}$ (kn)	$V_{k+1} * h_e$	$M_k$ (kn.m)
Niveau +00	1177.72 kn	3650.87	13584.14kn.m
Niveau 01	1100.99 kn	3413.07	9933.27kn.m
Niveau 02	947.53 kn	3024.15	6520.2kn.m
Niveau 03	717.34 kn	2223.75	3496.05kn.m
Niveau 04	410.42 kn	1272.30	1272.3kn.m
Niveau 05	0	0	0kn.m

(Tableau II.5) : Moments fléchissant au niveau d'étage



(Figure II.5) : Moments fléchissant au niveau d'étage

## **II.8. Distribution horizontale des forces sismiques:**

$$\left\{ \begin{array}{l} e_X = |X_G - X_C| = 0 \text{ m} < 15\% L_X \text{ (Symétrie)} \\ e_Y = |Y_G - Y_C| = 0.08 \text{ m} < 15\% L_Y \end{array} \right.$$

On néglige l'effet de la torsion parce que l'excentricité est très faible,  $F_{ij}$  sont appliquées sur les nœuds du portique comme des forces concentrées.

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

$$F_{ij} = F_i \cdot \frac{R_j}{\sum R_j} = F_i \cdot \frac{I_j}{\sum I_j}$$

Avec:  $\left\{ \begin{array}{l} I_j : \text{moment d'inertie du file 'j'} \\ R_j : \text{rigidité du file 'j'} \end{array} \right.$

### **II.8.1. Distribution horizontale des forces sismiques sens XX:**

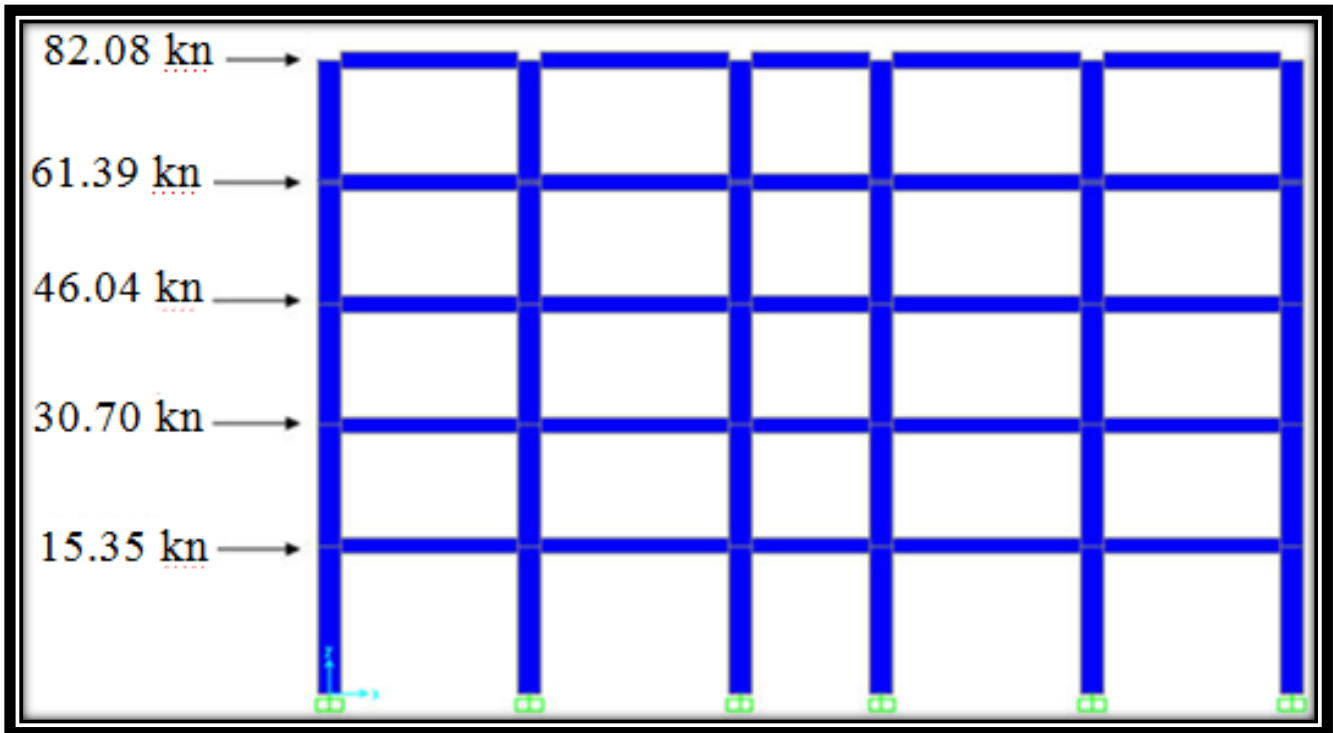
Les résultats représentés dans ces tableaux :

<i>Niveaux</i>	<i>Files</i>	<i>Fi</i>	<i>Ii</i>	<i>Fi*Ii/∑Ii</i>
<i>Niveau 01</i>	Inter	76.73 kn	0.0156	15.35 kn
<i>Niveau 02</i>	Inter	153.46 kn	0.0156	30.70 kn
<i>Niveau 03</i>	Inter	230.19 kn	0.0156	46.04 kn
<i>Niveau 04</i>	Inter	306.92 kn	0.0156	61.39 kn
<i>Niveau 05</i>	Inter	410.42 kn	0.0156	82.08 kn

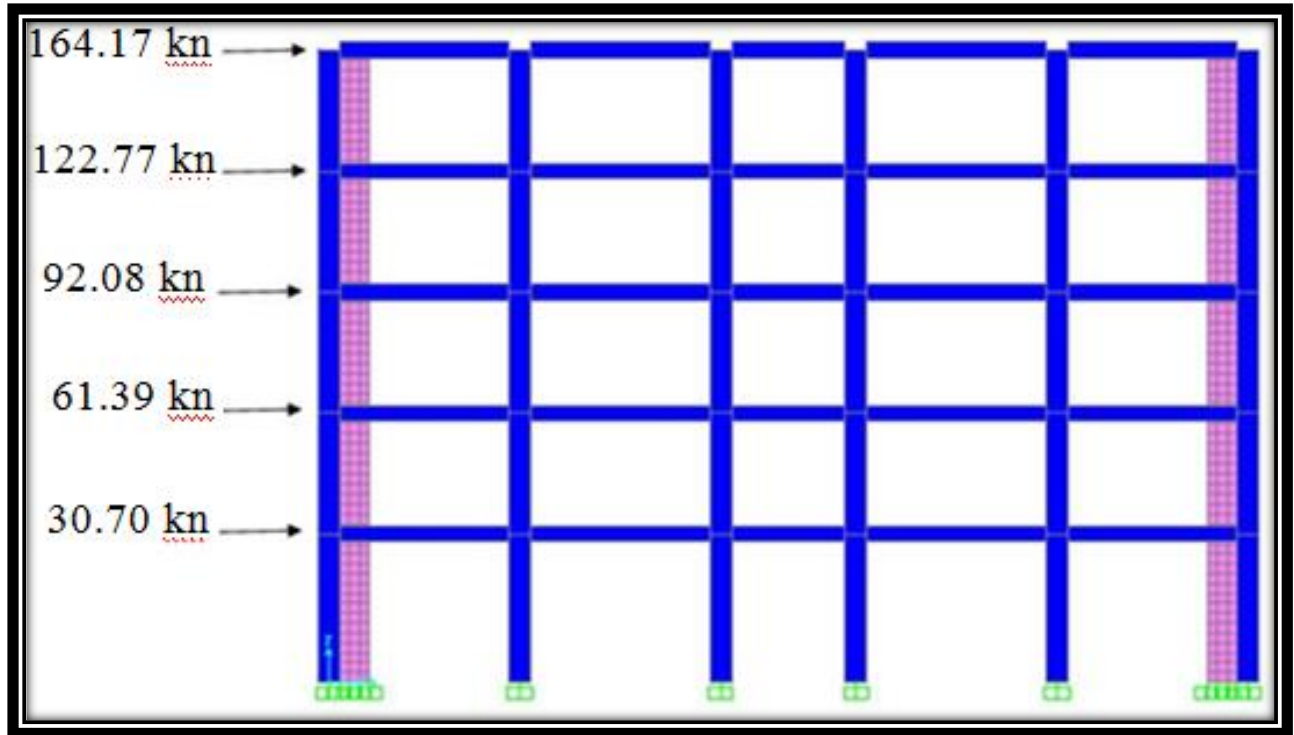
(Tableau II.6) : Forces sismiques sur files intermédiaires sens XX

<i>Niveaux</i>	<i>Files</i>	<i>Fi</i>	<i>Ii</i>	<i>Fi*Ii/∑Ii</i>
<i>Niveau 01</i>	Rive	76.73 kn	0.0492	30.70 kn
<i>Niveau 02</i>	Rive	153.46 kn	0.0492	61.39 kn
<i>Niveau 03</i>	Rive	230.19 kn	0.0492	92.08 kn
<i>Niveau 04</i>	Rive	306.92 kn	0.0492	122.77 kn
<i>Niveau 05</i>	Rive	410.42 kn	0.0492	164.17 kn

(Tableau II.7) : Forces sismiques sur files de rives sens XX



(Figure II.6) : Forces sismiques sur files intermédiaires sens XX



(Figure II.7) : Forces sismiques sur files de rives sens XX

### II.8.2. Distribution horizontale des forces sismiques sens YY:

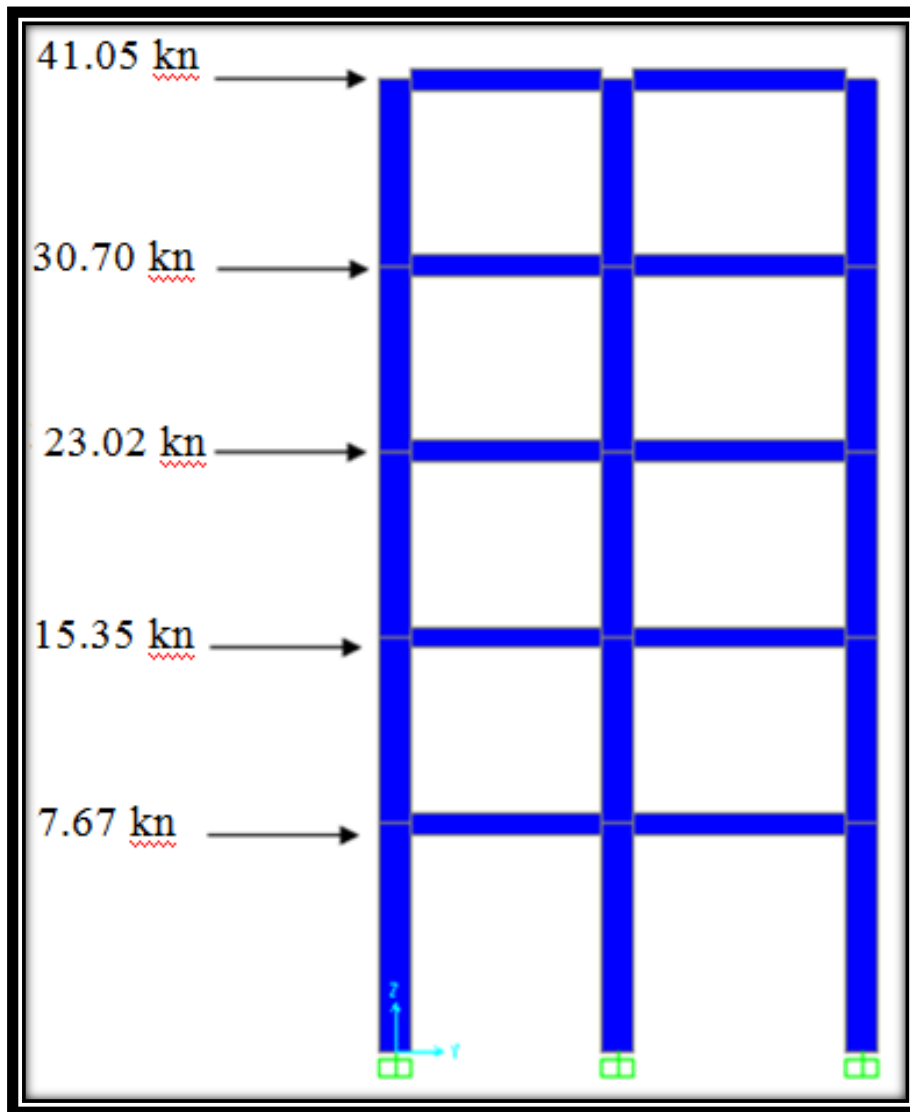
Les résultats représentés dans ces tableaux :

Niveaux	Files	$F_i$	$I_i$	$F_i \cdot I_i / \sum I_i$
Niveau 01	inter	76.73 kn	0.0078	7.67 kn
Niveau 02	inter	153.46 kn	0.0078	15.35 kn
Niveau 03	inter	230.19 kn	0.0078	23.02 kn
Niveau 04	inter	306.92 kn	0.0078	30.70 kn
Niveau 05	inter	410.42 kn	0.0078	41.05 kn

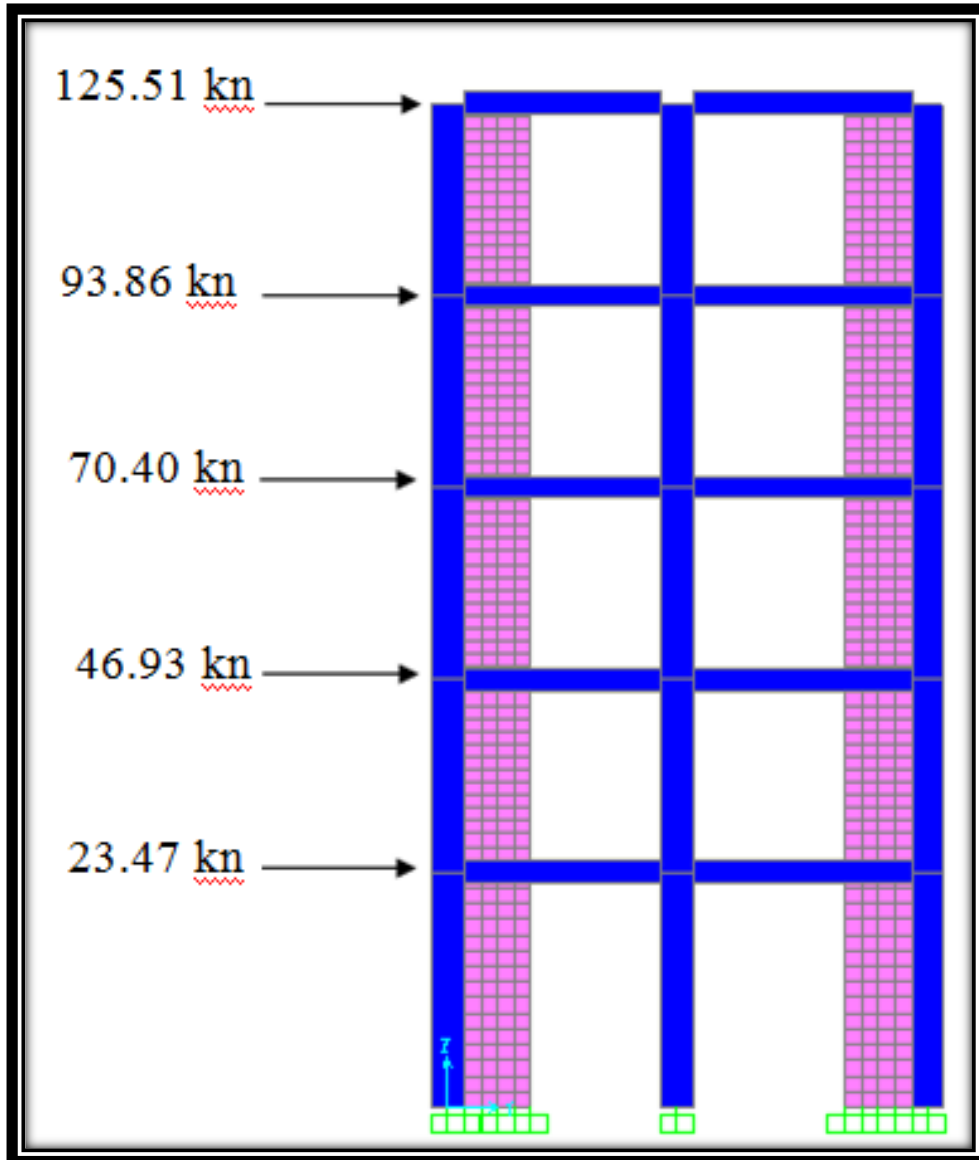
(Tableau II.8) : Forces sismiques sur files intermédiaires sens YY

Niveaux	Files	$F_i$	$I_i$	$F_i \cdot I_i / \sum I_i$
Niveau 01	rive	76.73 kn	0.0414	23.47 kn
Niveau 02	rive	153.46 kn	0.0414	46.93 kn
Niveau 03	rive	230.19 kn	0.0414	70.40 kn
Niveau 04	rive	306.92 kn	0.0414	93.86 kn
Niveau 05	rive	410.42 kn	0.0414	125.51 kn

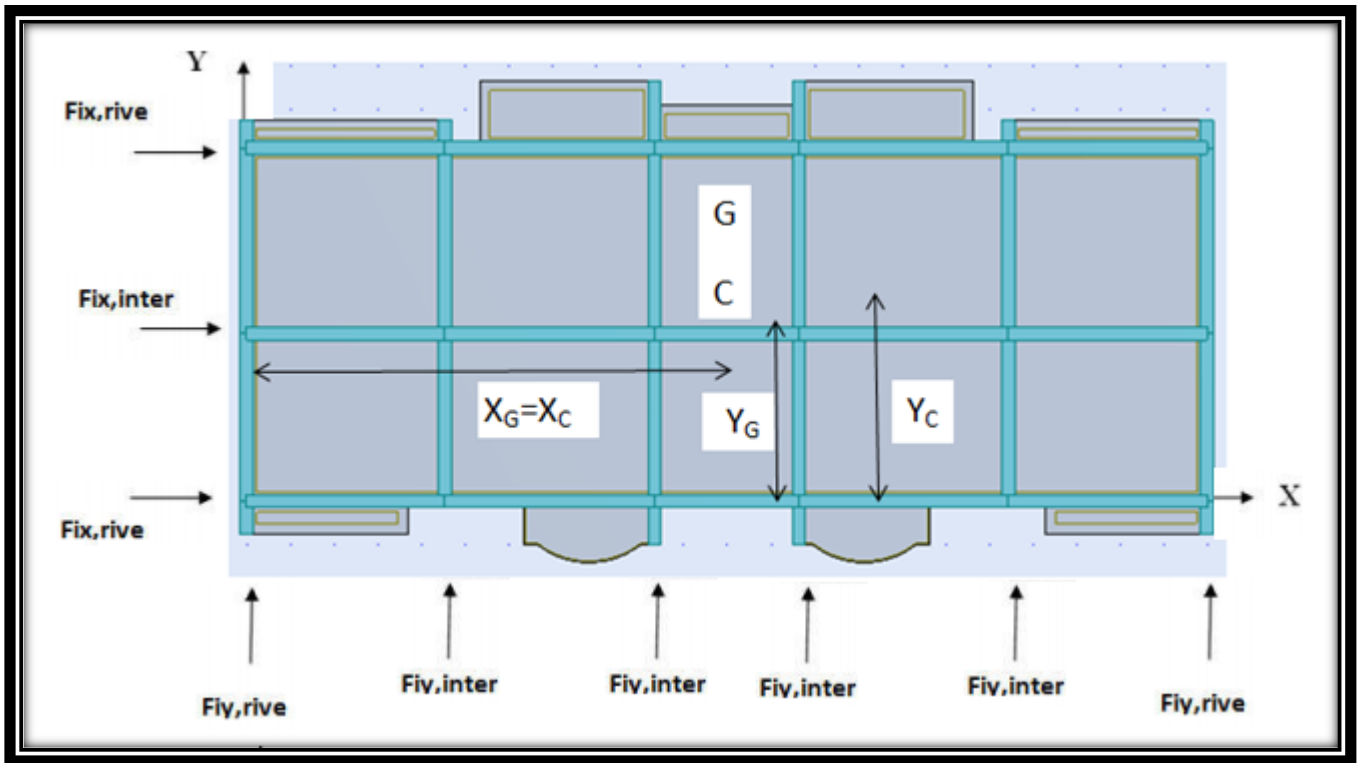
(Tableau II.9) : Forces sismiques sur files de rives sens YY



(Figure II.8) : Forces sismiques sur files intermédiaires sens YY



(Figure II.9) :Forces sismiques sur files de rives sens YY



(Figure II.10) : Distribution horizontale du force sismique d'étage 'i'

# Chapitre 3

Calcul par la méthode dynamique modale  
spectrale

### **III.1.Principe de la méthode dynamique modale spectrale :**

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

### **III.2. Modélisation :**

a) Pour les structures régulières en plan comportant des planchers rigides, l'analyse est 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 en translation horizontale.

b) 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).

c) Pour les structures régulières ou non comportant des planchers flexibles, elles sont représentées par des modèles tridimensionnels encastrés à la base et à plusieurs DDL par plancher.

d) La déformabilité du sol de fondation doit être prise en compte dans le modèle toutes les fois où la réponse de la structure en dépend de façon significative.

e) 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 (ex : contribution des zones nodales et des éléments non structuraux à la rigidité du bâtiment).

f) Dans le cas des bâtiments en béton armé ou en maçonnerie la rigidité des éléments porteurs doit être calculée en considérant les sections non fissurées. Si les déplacements sont critiques particulièrement dans le cas de structures associées à des valeurs élevées du coefficient de comportement, une estimation plus précise de la rigidité devient nécessaire par la prise en compte de sections fissurées.

g) Calcul de l'action sismique :

$$F_i = M \cdot \Phi_i \cdot S_a \cdot \gamma_i \text{ (dans les deux directions)}$$

**M**:matrice de masse

**$\Phi_i$** :vecteur du mode i

**S<sub>a</sub>**:accélération spectrale (spectre de réponse)

**$\gamma_i$** : facteur de participation du mode i

### • III.3. Etapes de calcul:

1) Détermination des caractéristiques dynamiques de la structure : périodes et modes propres par la résolution de l'équation :

$$|\mathbf{K} - \mathbf{W}^2 \mathbf{M}| = 0$$

avec :

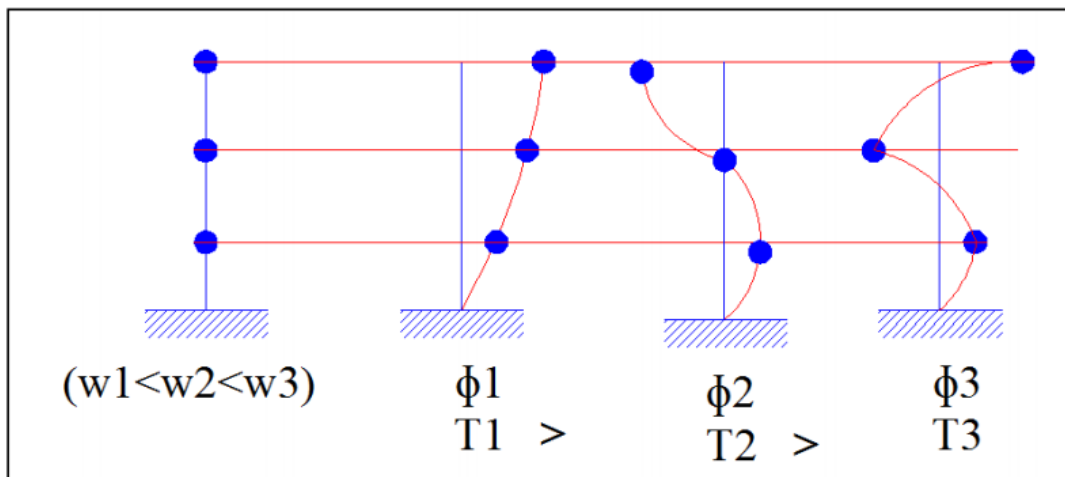
**K** : matrice de rigidité

**M** : matrice de masse

La résolution de cette équation fournit les valeurs des pulsations  $w_i$  relatives aux 'n' modes de vibration.

A chaque pulsation propre  $w_i$  correspond une forme propre  $\Phi_i$  tel que :

$$|\mathbf{K} - W_i^2 \mathbf{M}| \Phi_i = 0$$



(Figure III.1) :Modes propres de vibration

2) Détermination du facteur de participation de chaque mode :

$$\gamma_i = \Phi_i^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{e}_x / \mathbf{M}^* \text{ avec :}$$

$$\mathbf{e}_x : \text{vecteur de direction ; } \mathbf{e}_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{M}^* : \text{masse généralisée ; } \mathbf{M}^* = \Phi_i^T \cdot \mathbf{M} \cdot \Phi_i$$

Ce facteur peut également désigner par :  $\frac{\mathbf{r}_n}{\mathbf{M}^*}$  ; du fait que l'équation du mouvement (découplée) s'écrit :

$$\mathbf{Z} + 2 \xi_n \cdot \mathbf{W}_n \cdot \mathbf{W}_n \cdot \mathbf{Z}_n = (-\mathbf{r}_n / \mathbf{M}^*) \cdot \mathbf{X}_g$$

$\mathbf{X}_g$ : Accélération du sol.

3) Détermination de l'accélération spectrale :

A partir du spectre de réponse on affecte à chaque période  $T_i$  pour un amortissement donné une valeur de l'accélération  $S_a$ .

4) Evaluation des forces sismiques pour chaque mode :

L'action sismique du mode  $i$  est calculée comme suit :

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{M} \cdot \Phi_i \cdot S_a \cdot \gamma_i \text{ (dans les deux directions)}$$

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{1i} \\ \mathbf{F}_{2i} \\ \cdot \\ \mathbf{F}_{ni} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{m}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{m}_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_{1i} \\ \Phi_{2i} \\ \cdot \\ \Phi_{ni} \end{Bmatrix} \cdot S_{ai} \cdot \gamma_i$$

**Exemple :**

Si on a 3 modes :

$$\Phi_i = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \Phi_{23} \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & \Phi_{33} \end{pmatrix}$$

On aura 3 forces sismiques pour chaque mode :

$$\mathbf{1er mode : } w_1 \dots T_1 \dots S_{a1}$$

**2<sup>me</sup> mode** :  $w_2 \dots T_2 \dots S_{a2}$

**3<sup>me</sup> mode** :  $w_3 \dots T_3 \dots S_{a3}$

**1<sup>er</sup> mode** :

$$\begin{Bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_{11} \\ \Phi_{21} \\ \Phi_{31} \end{Bmatrix} \cdot S_{ai} \cdot \gamma_i$$

$$M^* = \{ \Phi_{11} \quad \Phi_{21} \quad \Phi_{31} \} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_{11} \\ \Phi_{21} \\ \Phi_{31} \end{Bmatrix} = m_1^*$$

$$r_1 = \{ \Phi_{11} \quad \Phi_{21} \quad \Phi_{31} \} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$\gamma_1 = r_1 / m_1^*$$

D'où :

$$F_{11} = m_1 \cdot \Phi_{11} \cdot S_{a1} \cdot \gamma_1$$

$$F_{12} = m_2 \cdot \Phi_{21} \cdot S_{a1} \cdot \gamma_1$$

$$F_{13} = m_3 \cdot \Phi_{31} \cdot S_{a1} \cdot \gamma_1$$

De la même manière :

**2<sup>me</sup> mode** :

$$F_{21} = m_1 \cdot \Phi_{12} \cdot S_{a2} \cdot \gamma_2$$

$$F_{22} = m_2 \cdot \Phi_{22} \cdot S_{a2} \cdot \gamma_2$$

$$F_{23} = m_3 \cdot \Phi_{32} \cdot S_{a2} \cdot \gamma_2$$

$$\text{avec : } \gamma_2 = r_2 / m_2^*$$

**3<sup>me</sup> mode** :

$$F_{31} = m_1 \cdot \Phi_{13} \cdot S_{a3} \cdot \gamma_3$$

$$F_{32} = m_2 \cdot \Phi_{23} \cdot S_{a3} \cdot \gamma_3$$

$$F_{33} = m_3 \cdot \Phi_{33} \cdot S_{a3} \cdot \gamma_3$$

$$\text{avec : } \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1$$

5) Evaluation de la sollicitation maximale résultante :

La force sismique de calcul résultante à l'étage k est donnée par la moyenne quadratique :

$$F_K = \sqrt{\left( \sum F_{iK}^2 \right)}$$

$$F_1 = \sqrt{(F_{11}^2 + F_{21}^2 + F_{31}^2)}$$

$$F_2 = \sqrt{(F_{12}^2 + F_{22}^2 + F_{32}^2)}$$

$$F_3 = \sqrt{(F_{13}^2 + F_{23}^2 + F_{33}^2)}$$

**Remarque :**

On peut également calculer la masse modale et son pourcentage par rapport à la masse totale :

$$M_{mi} = \begin{cases} (\Phi_1^T \cdot M \cdot e_x)^2 / m_1^* = r_1^2 / m_1^* \\ (\Phi_2^T \cdot M \cdot e_x)^2 / m_2^* = r_2^2 / m_2^* \\ (\Phi_3^T \cdot M \cdot e_x)^2 / m_3^* = r_3^2 / m_3^* \end{cases}$$

$$P_{mi} = M_{mi} \cdot 100 / (m_1 + m_2 + m_3)$$

D'ou :

$$P_{m1} = M_{m1} \cdot 100 / (m_1 + m_2 + m_3)$$

$$P_{m2} = M_{m2} \cdot 100 / (m_1 + m_2 + m_3)$$

$$P_{m3} = M_{m3} \cdot 100 / (m_1 + m_2 + m_3)$$

**6) Les sollicitations à la base :**

\* Efforts tranchants :

$$T_{base1} = F_{11} + F_{21} + F_{31} \dots \dots \dots \text{mode1}$$

$$T_{base2} = F_{12} + F_{22} + F_{32} \dots \dots \dots \text{mode2}$$

$$T_{base3} = F_{13} + F_{23} + F_{33} \dots \dots \dots \text{mode3}$$

\* Moments fléchissant :

$$M_{base1} = F_{11} \cdot h + F_{21} \cdot 2h + F_{31} \cdot 3h \dots \dots \dots \text{mode1}$$

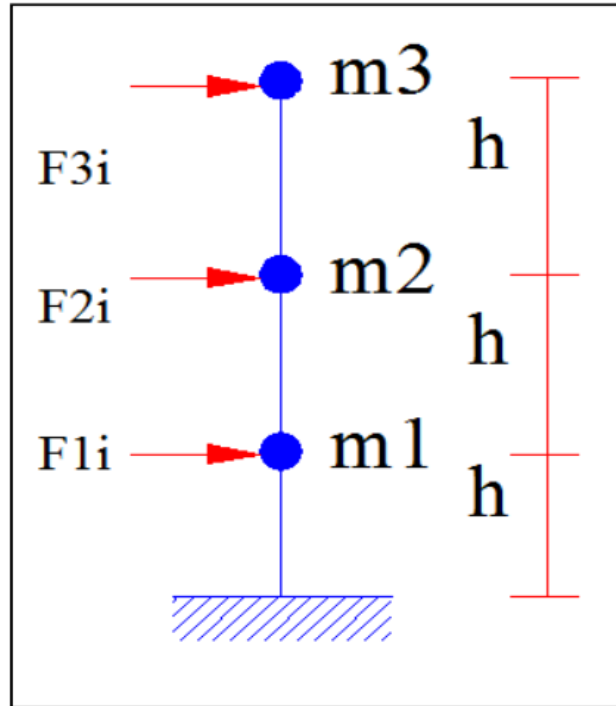
$$M_{base2} = F_{12} \cdot h + F_{22} \cdot 2h + F_{32} \cdot 3h \dots \dots \dots \text{mode2}$$

$$M_{base3} = F_{13} \cdot h + F_{23} \cdot 2h + F_{33} \cdot 3h \dots \dots \dots \text{mode3}$$

En fin :

$$T_{base} = \sqrt{(T_{base1}^2 + T_{base2}^2 + T_{base3}^2)}$$

$$M_{base} = \sqrt{(M_{base1}^2 + M_{base2}^2 + M_{base3}^2)}$$



(Figure III.2) : Forces sismiques du mode « i »

### 7) Calcul des déplacements :

Les valeurs spectrales du déplacement ( $S_{u,n}$ ) =  $S_{a,n} / W_n^2$  (tirées du spectre de réponse correspond à chaque mode), d'abord le déplacement en coordonnées modales :

$$Z_{n,max} = |r_n| \cdot S_{u,n}(W_n, \xi) / m_n^* = |r_n| \cdot S_{a,n} / (m_n^* \cdot W_n^2)$$

Avec :  $r_n = \Phi_n^T \cdot M \cdot e_x$

Ensuite on passe aux déplacements relatifs maximaux d'étage :

$$X_{n,max} = A_n \cdot Z_{n,max}$$

$$\begin{Bmatrix} X_{1n,max} \\ X_{2n,max} \\ \cdot \\ X_{3n,max} \end{Bmatrix} = X_{n,max} = \begin{Bmatrix} A_{1n} \\ A_{2n} \\ \cdot \\ A_{3n} \end{Bmatrix} \cdot Z_{n,max}$$

### Exemple :

Si on a 3 masse ( 3 mode) :

**1er mode :**

$$X_{11} = \Phi_{11} \cdot S_{a1} \cdot \gamma_1 / W_1^2$$

$$X_{12} = \Phi_{21} \cdot S_{a1} \cdot \gamma_1 / W_1^2$$

$$X_{13} = \Phi_{31} \cdot S_{a1} \cdot \gamma_1 / W_1^2$$

**2er mode :**

$$X_{21} = \Phi_{12} \cdot S_{a2} \cdot \gamma_2 / W_2^2$$

$$X_{22} = \Phi_{22} \cdot S_{a2} \cdot \gamma_2 / W_2^2$$

$$X_{23} = \Phi_{32} \cdot S_{a2} \cdot \gamma_2 / W_2^2$$

**3er mode :**

$$X_{31} = \Phi_{13} \cdot S_{a3} \cdot \gamma_3 / W_3^2$$

$$X_{32} = \Phi_{23} \cdot S_{a3} \cdot \gamma_3 / W_3^2$$

$$X_{33} = \Phi_{33} \cdot S_{a3} \cdot \gamma_3 / W_3^2$$

Avec :

$$\Phi_{i,n} = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \\ \Phi_{2i} \\ \Phi_{3i} \end{bmatrix}; \text{ avec : } n = 1, 2, 3 \text{ et } i = 1, 2, 3 \text{ (vecteur de direction du mode } i \text{)}.$$

Et en fin :

$$X_{1,\max} = \sqrt{(X_{11}^2 + X_{21}^2 + X_{31}^2)} \dots \dots \dots \text{étage1}$$

$$X_{2,\max} = \sqrt{(X_{12}^2 + X_{22}^2 + X_{32}^2)} \dots \dots \dots \text{étage2}$$

$$X_{3,\max} = \sqrt{(X_{13}^2 + X_{23}^2 + X_{33}^2)} \dots \dots \dots \text{étage3}$$

•□ On peut également calculer les forces du rappel élastiques par :

$$F_{1i} = K \cdot X_{1i,\max} \quad (\text{avant le superposition})$$

$$F_{2i} = K \cdot X_{2i,\max}$$

.

.

$$F = [K] \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{21} \\ X_{31} \end{bmatrix}$$

Selon la loi de superposition des effets élastiques on peut déduire la force sismique pour l'étage K (masse K) :

$$F_k = \sqrt{\left(\sum F_{ik}^2\right)}$$

• **III.4. Spectre de réponse de calcul :**

L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant :

$$Sa/g = \begin{cases} 1.25 A \left( 1 + \frac{T}{T_1} \left( 2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & \dots\dots\dots 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta (1.25 A) \left( \frac{Q}{R} \right) & \dots\dots\dots T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta (1.25 A) \left( \frac{Q}{R} \right) \left( \frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & \dots\dots\dots T_2 \leq T \leq 0.3s \\ 2.5\eta (1.25 A) \left( \frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left( \frac{3}{T} \right)^{5/3} \left( \frac{Q}{R} \right) & \dots\dots\dots T > 0.3s \end{cases}$$

**A** : coefficient d'accélération de zone (tableau 4.1) du RPA

**A=0.25** (zone III, et groupe d'usage 2).

**η** : facteur de correction d'amortissement (quant l'amortissement est différent de 5%) :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2+\xi)}} \geq 0.7$$

**ξ** : pourcentage d'amortissement critique (tableau 4.2) du RPA

**ξ=7%** (Portiques en Béton armé avec Remplissage Dense) ; donc **η=0.88**

**R** : coefficient de comportement de la structure (tableau 4.3) du RPA

Système mixte portiques/voiles avec interaction donc : **R=5**

**T1, T2** : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site (tableau 4.7)

Donc : **T1=0.15s, T2=0.50s** (Site S3)

Q : facteur de qualité (tableau 4.4)

Dans la détermination de la valeur de Q, il y a lieu de tenir compte que les irrégularités en plan et en élévation ont déjà été prises en charge par le modèle. Par ailleurs, en cas d'analyse tridimensionnelle il y a lieu de prendre comme valeur de Q la plus pénalisante, des valeurs calculées suivant les deux directions orthogonales de référence. L'action sismique doit être appliquée dans toutes les directions jugées déterminantes pour le calcul des forces sismiques ainsi que les directions qui leur sont perpendiculaires, compte tenu de la configuration en plan de la structure. Pour les structures ayant leurs éléments de contreventement distribués le long de deux directions orthogonales, ces deux directions sont à retenir comme directions d'excitation.

La valeur de Q est déterminée par la formule :

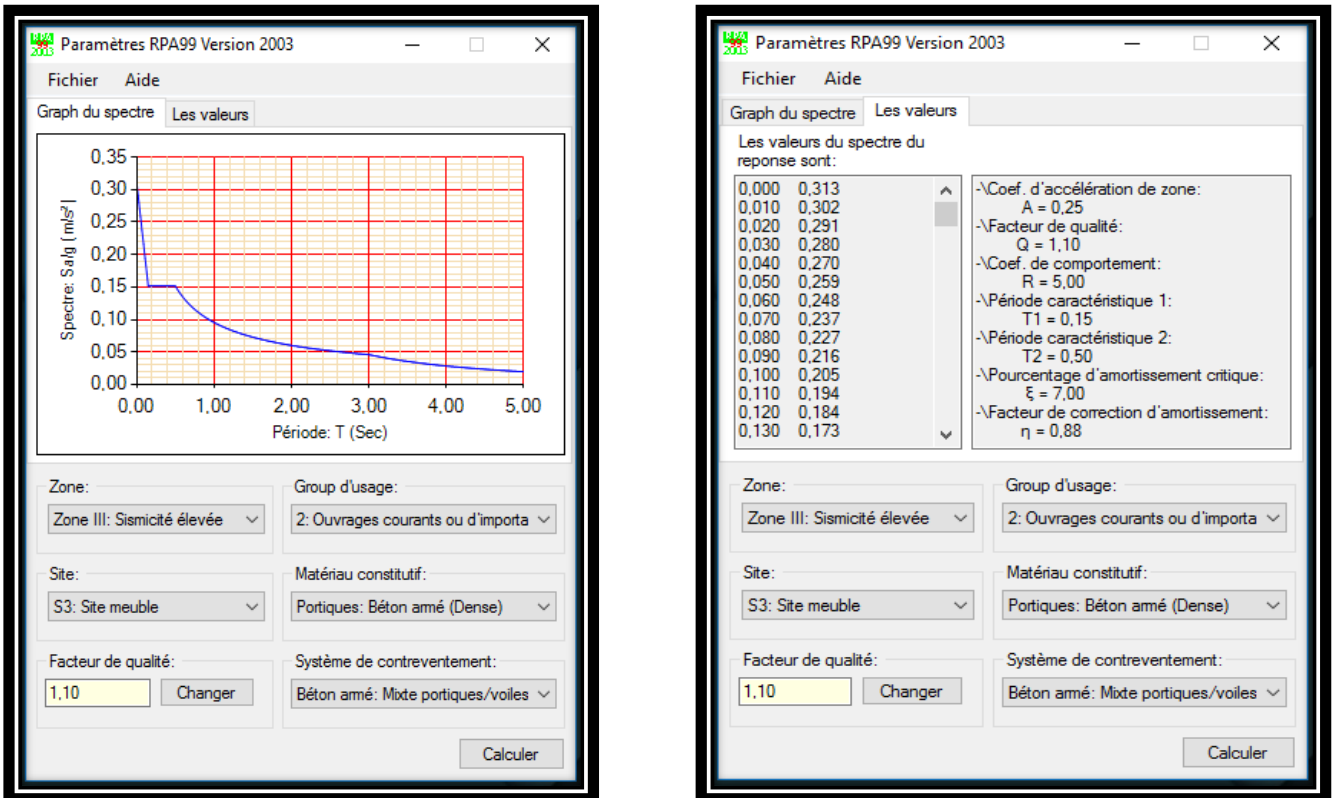
$$Q = 1 + \sum_1^6 P_q$$

**P<sub>q</sub>** : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité q " est satisfait ou non".

Sa valeur est donnée au tableau 4.4 du RPA

**Donc : Q=1+0.05×2=1.10**

Après l'entrer de tous les donnés sismiques (**A, site, R, Q, ξ**) sur la formule précédente, On trouve le spectre de réponse de calcul pour cette structure :



(Figure III.3) : Spectre de réponse de calcul sous forme graphique

Spectre de réponse de calcul sous forme de tableau :

Période $T_i$ (sec)	Accélération (Sa/g)
0,000	0,314
0,100	0,206
0,200	0,153
0,300	0,153
0,400	0,153
0,500	0,153
0,600	0,135
0,700	0,122
0,800	0,112
0,900	0,103
1,000	0,096
1,100	0,091
1,200	0,086
1,300	0,081
1,400	0,077
1,500	0,074
1,600	0,071
1,700	0,068
1,800	0,066
1,900	0,063
2,000	0,061
2,100	0,059
2,200	0,057
2,300	0,056
2,400	0,054
2,500	0,053
2,600	0,052
2,700	0,05
2,800	0,049
2,900	0,048
3,000	0,047
3,100	0,044
3,200	0,042
3,300	0,04
3,400	0,038
3,500	0,037
3,600	0,035
3,700	0,033
3,800	0,032
3,900	0,031
4,000	0,029
4,100	0,028
4,200	0,027
4,300	0,026
4,400	0,025
4,500	0,024
4,600	0,024
4,700	0,023

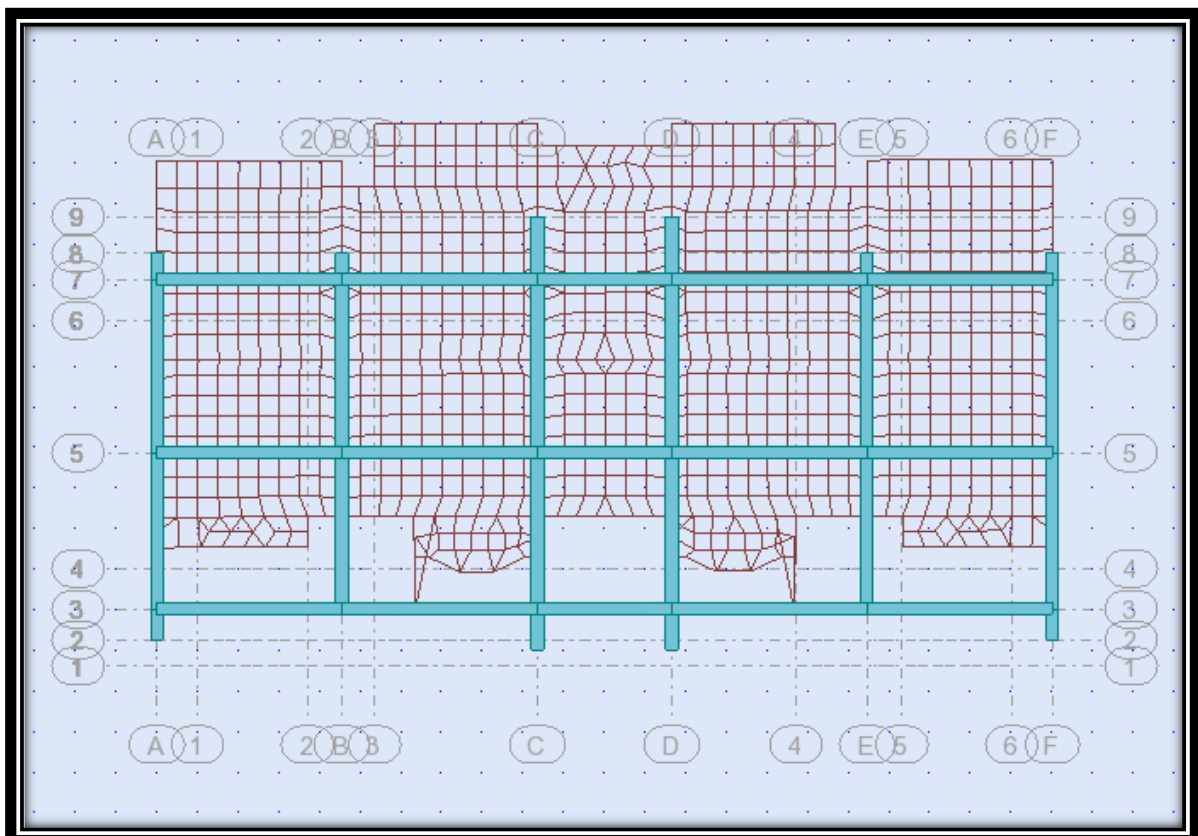
4,800	0,022
4,900	0,021
5,000	0,021

Tableau (III.1) : Spectre de réponse de calcul sous forme de tableau

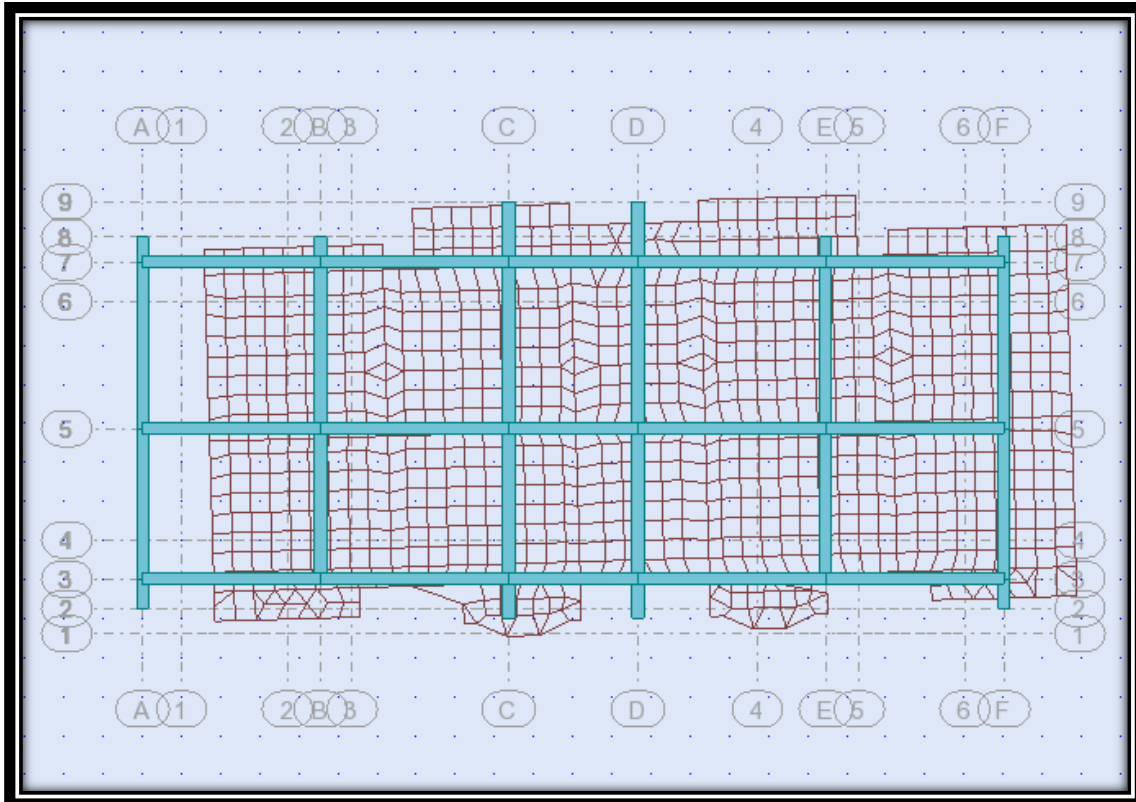
• **III.5. Modélisation par ROBOT-V14 :**

Le logiciel de calcul ROBOT est appliqué tout d’abord pour effectuer l’analyse modale afin de déterminer les fréquences et les modes propres de la structure, ensuite le calcul des efforts sismiques est mené sur la base de ces résultats et du spectre de réponse fourni par le code RPA. Par ailleurs, l’amplitude du spectre de réponse est ajustée de façon à ce que l’effort tranchant à la base obtenu par la méthode dynamique soit égal à celui obtenu par la formule empirique donnée par le code RPA. Sous l’action des efforts sismiques, le bâtiment subit, d’un mouvement de translation pure, parce que le mouvement de rotation est très faible (à cause de la régularité de la structure) et les modes de vibration sont, dans ce cas des modes de translation pure. La translation génère, des forces latérales au niveau des planchers du bâtiment.

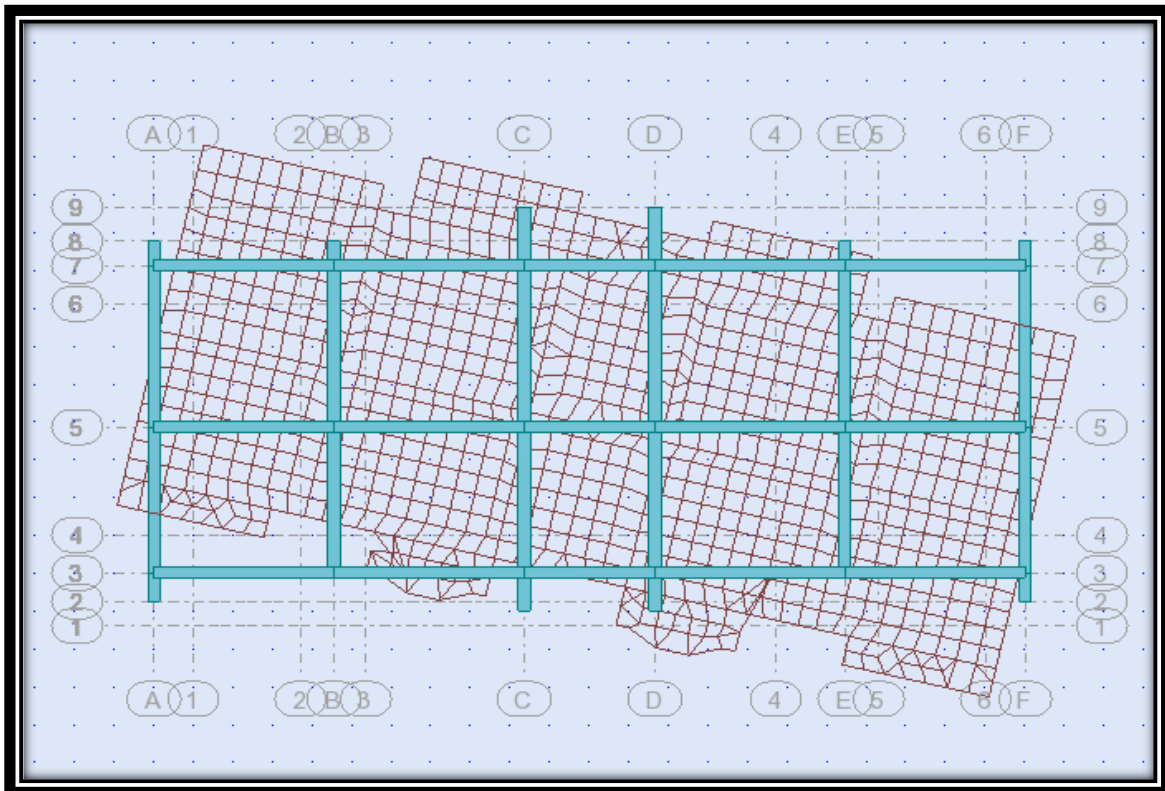
Ces modes propres sont les suivants :



(Figure III.4) : 1<sup>er</sup> mode de vibration  $T_1=0.55\text{sec}$  Translation selon YY  
Avec masse modale  $M_y=74.65\%M_{\text{structure}}$  et  $M_x=0.01\%M_{\text{structure}}$



**(Figure III.5) : 2<sup>me</sup> mode de vibration  $T_2=0.51\text{sec}$  Translation selon XX  
Avec masse modale  $M_x=74.71\%M_{\text{structure}}$  et  $M_y=0.01\%M_{\text{structure}}$**



**(Figure III.6) : 3<sup>me</sup> mode de vibration  $T_3=0.45\text{sec}$  Torsion d'axe vertical  
Avec masse modale  $M_x=1.26\%M_{\text{structure}}$  et  $M_y=0.01\%M_{\text{structure}}$**

### **III.6. Nombre de modes à considérer :**

- a) Pour les structures représentées par des modèles plans dans deux directions orthogonales, le nombre de modes de vibration 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.
- b) Dans le cas où les conditions décrites ci-dessus 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 :  

$$K \geq 3\sqrt{N} \text{ et } T_k \leq 0.20\text{sec}$$

Où : **N** est le nombre de niveaux au dessus du sol et **T<sub>k</sub>** la période du mode **K**.

Cas/Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses cumulées UX [%]	Masses cumulées UY [%]	Masses Modale UX [%]	Masses Modale UY [%]
Modale/1	1,81	0,55	0,00	74,65	0,00	74,65
Modale /2	1,95	0,51	74,71	74,65	74,71	0,00
Modale /3	2,22	0,45	75,97	74,65	1,26	0,00
Modale /4	6,17	0,16	75,99	88,32	0,02	13,67
Modale /5	6,53	0,15	89,04	88,34	13,05	0,02
Modale /6	8,47	0,12	89,04	88,34	0,00	0,00
Modale /7	11,95	0,08	89,04	93,67	0,00	5,33
Modale /8	13,21	0,08	94,65	93,67	5,61	0,00
Modale /9	17,78	0,06	94,65	96,00	0,00	2,33
Modale /10	18,08	0,06	94,65	96,01	0,00	0,01
Modale /11	20,54	0,05	94,65	96,02	0,00	0,01
Modale /12	20,65	0,05	97,16	96,03	2,51	0,00

**Tableau (III.2) : Périodes et masses modales selon ROBOT**

On remarque que :

1.  $\sum UX=97.16\% \geq 90\%$  et  $\sum UY=96.03\% \geq 90\% \dots\dots\dots \mathbf{OK}$

Le pourcentage des participations massiques atteint les 90% dans le **8<sup>ème</sup> mode**. Alors la somme des masses modales (Somme de  $\alpha_i$ ) effectives est égale à 90 % au moins de la masses totale de la structure.

2. tous les modes ayant une masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale de la structure.....**OK**

Donc le nombre de modes à considérer (**n=12**) est suffisant pour l'analyse de cette structure par la méthode dynamique modale spectrale.

**III.7. Combinaison des réponses modales :**

a) Les réponses de deux modes de vibration i et j de périodes  $T_i, T_j$  et d'amortissement  $\xi_i, \xi_j$  sont considérées comme indépendantes si le rapport :  $r = T_i / T_j (T_i \leq T_j)$  .

vérifie :  $r \leq 10 / (10 + \sqrt{\xi_i \xi_j})$

b) Dans le cas où toutes les réponses modales retenues sont indépendantes les unes des autres, la réponse totale est donnée par :

$$E = \pm \sqrt{\left( \sum_{i=1}^k E_{ik}^2 \right)}$$

**E** : effet de l'action sismique considéré

**E<sub>i</sub>** : 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 ; E1 et E2 par exemple, la réponse totale est donnée par :

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

### III.8. 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 déterminée par la méthode statique équivalente  $V$  pour une valeur de la période fondamentale donnée par la formule empirique appropriée. Si  $V_t < 0.80 V$ , il faudra augmenter tous les paramètres de la réponse (forces, déplacements ,moments,...) dans le rapport  $0.8 V/V_t$

Cas	Fx [KN]	Fy [KN]	Fz[KN]
Ex	1101,17	4,96	0,00
Ey	4,92	1040,22	0,00
G+0.2Q	2,46600e-006	8,00484e-016	<b>9732.99kn</b>

**Tableau (III.3) : Réaction à la base de la structure**

$$V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} \cdot W = 1177.7 \text{kn}$$

$$V_{tx} = 1101.17 \text{kn} > 0.8V = 942.16 \text{kn}$$

$$V_{ty} = 1040.22 \text{kn} > 0.8V = 942.16 \text{kn}$$

Donc la condition du RPA est vérifiée. ....OK

### III.9. Calcul des déplacements :

Le déplacement horizontal à chaque niveau "k" de la structure est calculé comme suit :

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

$\delta_{ek}$ : déplacement dû 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" est égal à :

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

# Chapitre 4

## Discussions des sollicitations et des déplacements

### **IV.1. Introduction :**

Dans ce chapitre on tire les sollicitations (moments fléchissant M, efforts normaux N et efforts tranchants T) et les déplacements des éléments structuraux qui sont calculés par les deux méthodes : statique et dynamique, et enfin la comparaison entre ces résultats. Cette comparaison permet de mettre en évidence les ressemblances et les différences en termes de répartitions des sollicitations (M, N, et T) et des déplacements dans les structures qui présentent une configuration régulière.

Cas	Fx [KN]	Fy [KN]	Mx[KN]	My[KN]
Ex	1101,17	4,96	23,26	12419,73
Ey	4,92	1040,22	11782,44	22,35

**Tableau (IV.1) : Réactions à la base de la structure selon la méthode dynamique**

Cas	Fx [KN]	Fy [KN]	Mx [KN]	My [KN]
Ex	-1177.70	1,15138e-004	3,698e-003	13584.14
Ey	3,69898e-003	-1177.72	-13584.14	1,151e-004

**Tableau (IV.2) :Réactions à la base de la structure selon la méthode statique**

On remarque que les réactions sont très proche entres eux :

$$E_{x,statique}/E_{x,dynamique} = 1.06 \dots\dots\dots \text{sensx}$$

$$E_{y,statique}/E_{y,dynamique} = 1.1 \dots\dots\dots \text{sensy}$$

$$M_{x,statique}/M_{x,dynamique} = 1.1 \dots\dots\dots \text{sensx}$$

$$M_{y,statique}/M_{y,dynamique} = 1.09 \dots\dots\dots \text{sensy}$$

## IV.2.Efforts tranchants aux niveaux des étages:

Les efforts tranchants de la méthode modale sont tirés par ROBOT par contre les efforts tranchants statiques sont calculés manuellement.

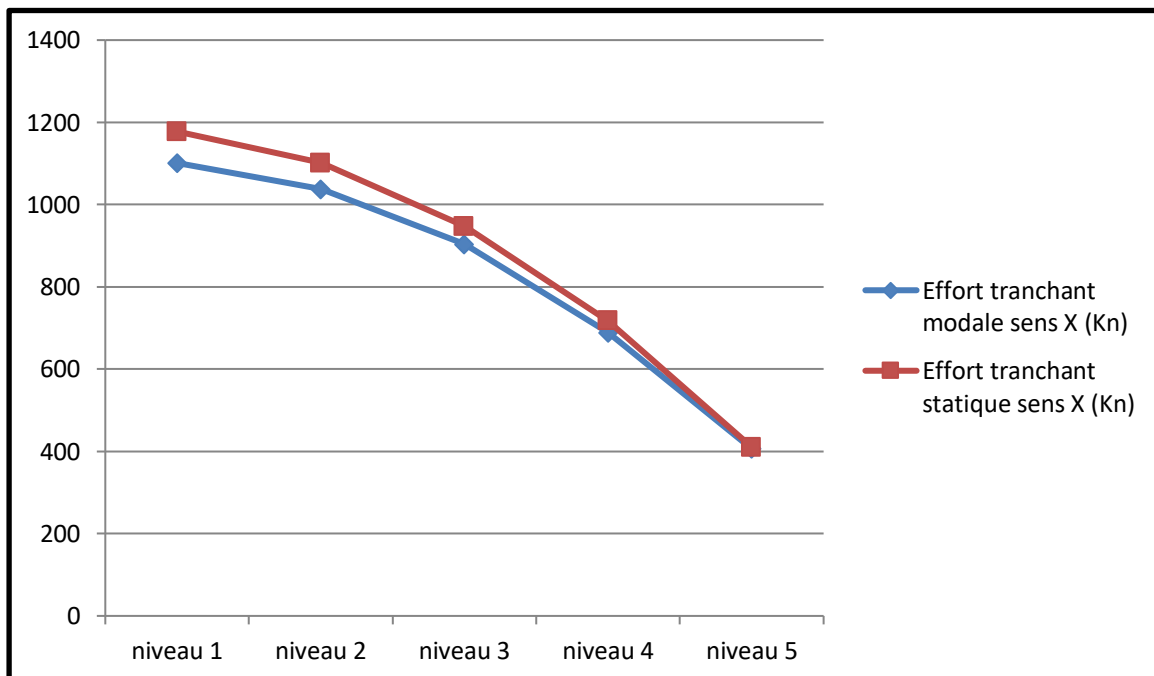
étage	Méthode statique		Méthode modale		...	.....
Niveaux	Fi (Kn)	Vi (Kn) (sens x et y)	Vi,x (Kn)	Vi,y (Kn)	Vi/Vi,x	Vi/Vi,y
Niveau 01	76.73 kn	1177.72 kn	1101,17	1040,22	<b>1.06</b>	<b>1.13</b>
Niveau 02	153.46 kn	1100.99 kn	1037,62	981,95	<b>1.06</b>	<b>1.13</b>
Niveau 03	230.19 kn	947.53 kn	903,31	857,09	<b>1.04</b>	<b>1.10</b>
Niveau 04	306.92 kn	717.34 kn	689,00	658,73	<b>1.04</b>	<b>1.08</b>
Niveau 05	410.42 kn	410.42 kn	406,17	392,46	<b>1.01</b>	<b>1.04</b>

**Tableau (IV.3) : Efforts tranchants aux niveaux des étages**

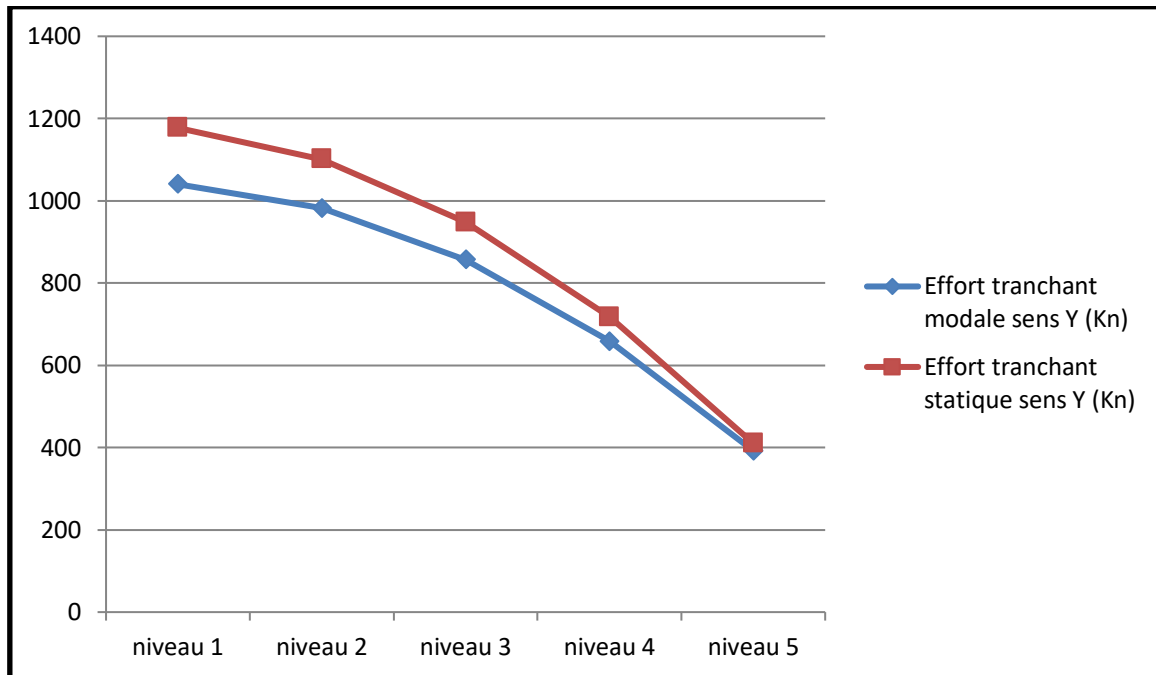
On remarque clairement la ressemblance entre les efforts tranchants :

$$1.01 \leq V_i/V_{i,x} \leq 1.06 \dots \text{sens } x$$

$$1.04 \leq V_i/V_{i,y} \leq 1.13 \dots \text{sens } y$$



**(Figure IV.1) : Comparaison des efforts tranchants aux niveaux des étages sens X**



(Figure IV.2) :Comparaison des efforts tranchants aux niveaux des étages sens Y

### • IV.3. Déplacements aux niveaux des étages :

Le déplacement horizontal à chaque niveau "k" de la structure est calculé comme suit :

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

$\delta_{ek}$  : déplacement dû 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" est égal à :

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

Les résultats sont représentés dans ces tableaux :

Niveau	Déplacement (cm)	
	Selon x	Selon y
Niveau 1	0,8	0,9
Niveau 2	2,3	2,4
Niveau 3	3,6	4
Niveau 4	4,9	5,5
Niveau 5	5,8	6,7

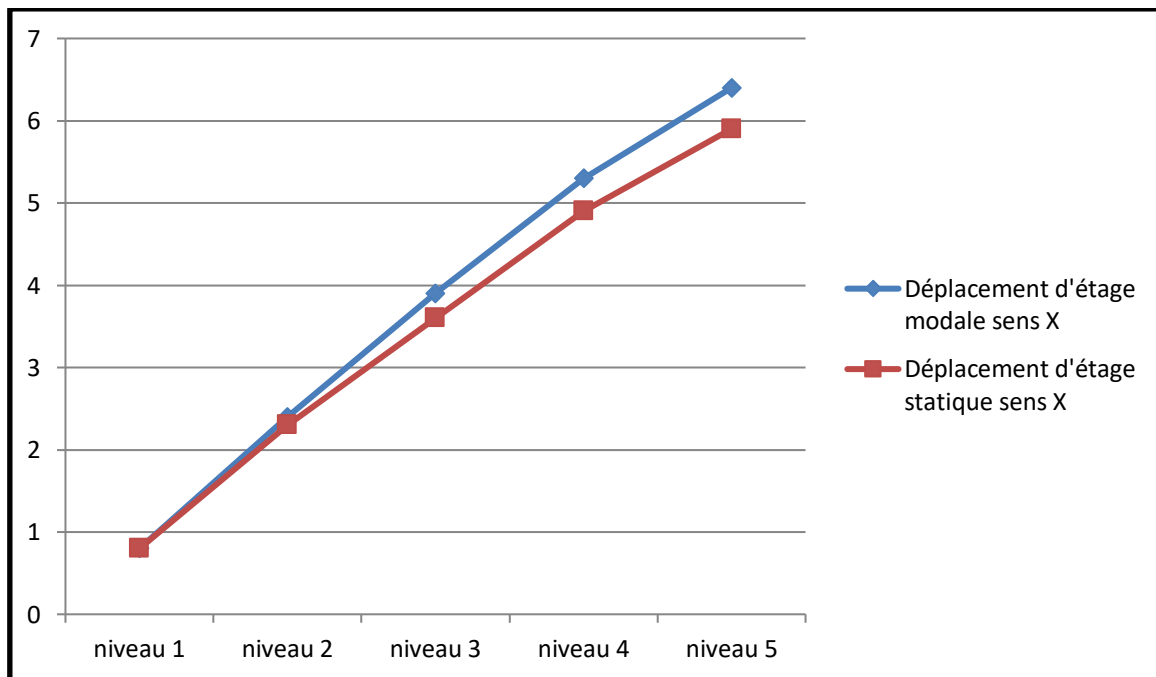
Tableau (IV.4) : Déplacements des étages selon la méthode statique

Niveau	Déplacement (cm)	
	Selon x	Selon y
Niveau 1	0,8	0,9
Niveau 2	2,4	2,5
Niveau 3	3,9	4,3
Niveau 4	5,3	5,9
Niveau 5	6,4	7,2

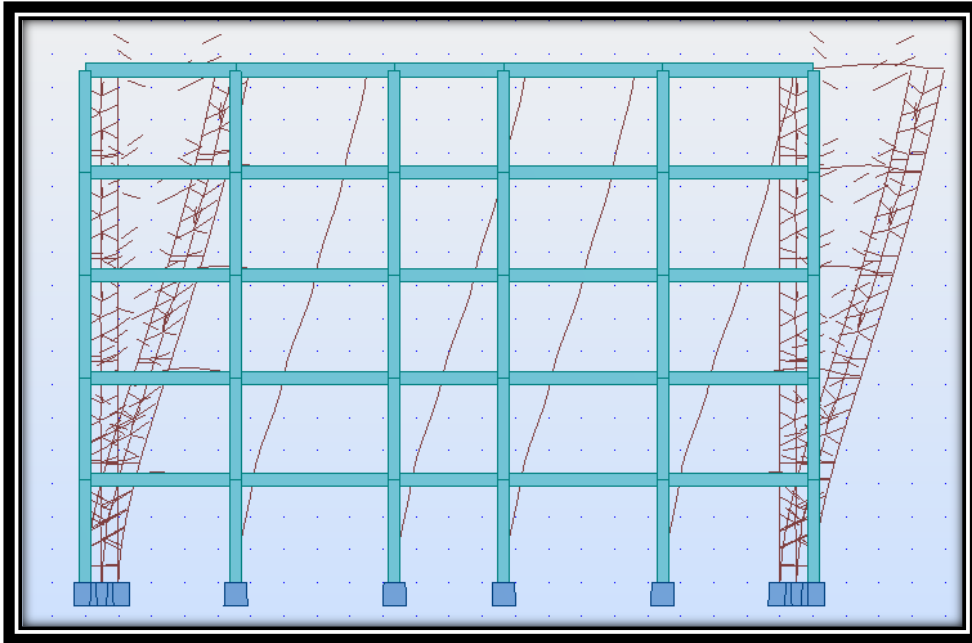
**Tableau (IV.5) :Déplacements des étages selon la méthode modale**

Niveaux	déplacements statique(cm)	déplacements modale(cm)	$\delta k \text{ stat}/\delta k \text{ modale}$
Niveau 01	0.8	0.8	<b>1</b>
Niveau 02	2.3	2.4	<b>0,95</b>
Niveau 03	3.6	3.9	<b>0,92</b>
Niveau 04	4.9	5.3	<b>0,92</b>
Niveau 05	5.9	6.4	<b>0,92</b>

**Tableau (IV.6) :Comparaison des déplacements des étages sens X**



**(Figure IV.3) : Comparaison des déplacements des étages sens X**



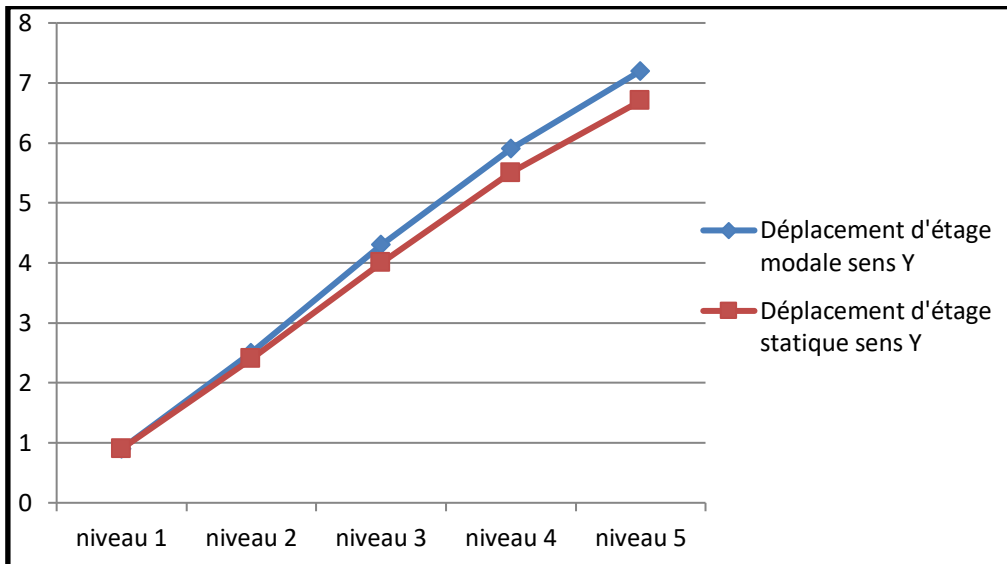
(Figure IV.4) :Déplacements des étages sens X

Même que les sollicitations, on remarque clairement la ressemblance entre les déplacements des étages :

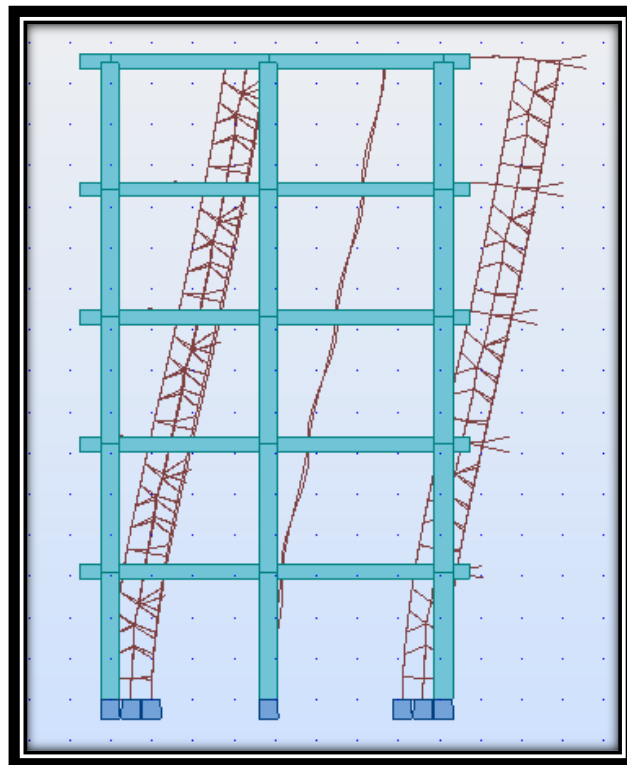
$$0.92 \leq \delta_{k,statique} / \delta_{k,dynamique} \leq 1 \dots \text{sens x}$$

Niveaux	déplacements statique(cm)	déplacements modale(cm)	$\delta k \text{ stat} / \delta k \text{ modale}$
Niveau 01	0.9	0.9	<b>1</b>
Niveau 02	2.4	2.5	<b>0,96</b>
Niveau 03	4	4.3	<b>0,93</b>
Niveau 04	5.5	5.9	<b>0,93</b>
Niveau 05	6.7	7.2	<b>0,93</b>

Tableau (IV.7) : Comparaison des déplacements des étages sens Y



(Figure IV.5) : Comparaison des déplacements des étages sens Y



(Figure IV.6) : Déplacements des étages sens Y

Même que les sollicitations, on remarque clairement la ressemblance entre les déplacements des étages :

$$0.93 \leq \delta_{k,statique} / \delta_{k,dynamique} \leq 1 \dots \dots \dots \text{sens } y$$

# Conclusion

## • Conclusion générale :

A la fin de cette étude, on peut dire que :

La méthode statique équivalente et la méthode dynamique modale spectrale donnent des sollicitations (efforts normaux et efforts tranchants) et des déplacements très proches entre eux pour les bâtiments qui présentent une configuration régulière en plan et

en élévation. Par conséquent, pour ceux qui s'intéressent à l'étude de ce type de bâtiments, choisissez librement et sans aucun doute l'une de ces deux méthodes.

### 2. Perspectives :

Comme perspectives, on propose de poursuivre l'étude dans ce même sujet de recherche mais pour les deux cas suivantes :

- Cas d'un bâtiment régulier en charpente métallique.
- Cas des bâtiments irréguliers.

## • Bibliographie

- Règles parasismiques Algériennes (RPA 99-V2003)
- Calcul des ouvrages en béton armé (Mr.REFRAFI)
- Aide-mémoire Résistance des matériaux (Jean Goulet, Jean-Pierre Boutinet Frédéric Lerouge)
- Thèses traités
- Cours de génie parasismique (Mr.MAMEN)
- DTR B.C.2.2 charges permanentes et charges d'exploitation
- Béton Armé Guide de calcul (Mr.REFRAFI)
- Règles de conception et de calcul des structures en béton armé C.B.A.93
- Règles BAEL 91 révisées 99
- Mémoire (Etude-comparative-entre-la-méthode-statique-équivalente) (UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA)