

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté Des Sciences Et De La Technologie  
Département De Génie Civil Et Travaux Publics



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Civil  
Domaine : Sciences et de la technologie  
Filière : Génie Civil  
Spécialité : Structure  
Thème

## Calcul plastique d'une structure en béton armé utilisant la méthode pas à pas

**Présenté Par :**

- Mme. FORTAS Fatiha
- Melle. DJOUDJAOUI Aicha Abir

**Devant le jury composé de :**

D <sup>r</sup> . ABDELBARI	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Présidente
Mme. MOUSSI	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Examinatrice
P <sup>r</sup> . TAHAR BERRABAH	UAT.B. B (Ain Témouchent)	Encadrante
D <sup>r</sup> . LAGAGUINE	U Badji Mokhtar (Annaba)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

## ***Remerciement***

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme Tahar Berrabeh Amina, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel pour sa patience et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*On remercie aussi Lagaguine Marwa (Co-encadrante) pour son aide et sa patience avec nous.*

*Nous sommes aussi reconnaissants envers les membres du Jury qui nous ont donné l'immense honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et à toute la promotion de Master génie civil.*

## ***Dédicace***

***Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect à :***

***Mes très chers parents qui m'ont vraiment soutenu et encouragé durant ma vie, et leur aide  
moral et matériel.***

***Mon cher frère, ma cousine, mes tantes, mes oncles, ma grand-mère, ma petite sœur wissem,  
mes petits cousins, et toute ma famille.***

***Ainsi à tous mes ami(e)s et à toute personne chère à mon cœur.***

***Abir***

## **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect à :*

*Mes très chers parents qui m'ont vraiment soutenu et encouragé durant ma vie,  
et leur aide moral et matériel.*

*Mes chers frères, mon mari, ma belle-sœur aïcha, mes tantes, mes cousines, et  
toute ma famille.*

*Ainsi à tous La famille Lahmar, Djemai...*

***Fatiha***

---

## Résumé

---

Ce projet présente une étude détaillée d'un bâtiment à usage d'habitation R+4, implanté dans la wilaya Ain Témouchent à ouled boujema. Cette région est classée en zone sismique II a (moyenne sismicité) selon le règlement parasismique algérien (RPA version 2003), le contreventement de cette structure est assuré par des portiques auto-stables (poteau\_ poutre) en béton armé.

Une vérification de cette construction selon les règlements en vigueur (RPA99version 2003 et BAEL91) a été menée avec une analyse sismique par la méthode statique équivalente à l'aide de logiciel de calcul SAP2000, la détermination des moments résistants ultimes des sections critiques a été effectuée par le logiciel de calcul SOCOTEC.

Cette étude consiste à :

- La première entame la description générale du projet avec une présentation des caractéristiques des matériaux, ensuite le pré dimensionnement de la structure et enfin la descente des charges.
- L'étude dynamique de la structure a été entamée dans la deuxième partie par logiciel SAP2000 afin de déterminer les différentes sollicitations dues aux chargements (charge sismique), ensuite l'objectif d'étude des éléments structuraux (poutre, poteau).
- Afin d'évaluer l'état du bâtiment une analyse plastique par la méthode pas-à-pas d'un portique témoin a été effectuée.

**Mots clés :** bâtiment, béton armé, SAP2000, RPA99 modifié2003, BAEL91, moment résistant ultime, section critique.

---

## Abstract

---

This project presents a detailed study of a residential building with 4 floors (R+4) located in the wilaya of Ain Témouchent in Ouled Boujemaâ. This region is classified as seismic zone II a (moderate seismicity) according to the Algerian seismic regulations (RPA version 2003). The bracing of this structure is ensured by self-stable frames (column-beam) made of reinforced concrete.

A verification of this construction according to the current regulations (RPA99 version 2003 and BAEL91) was carried out with a seismic analysis using the equivalent static method with the calculation software SAP2000. The determination of the ultimate resistant moments of the critical sections was performed using the SOCOTEC calculation software.

This study consists of:

- The first part involves the general description of the project with a presentation of the characteristics of the materials, followed by the preliminary design of the structure and finally the load distribution.
- The dynamic study of the structure was initiated in the second part using the SAP2000 software to determine the different stresses due to loads (seismic load), followed by the study of the structural elements (beam, column).
- In order to assess the state of the building, a plastic analysis by the step-by-step method of a sample frame was performed.

**Keywords:** building, reinforced concrete, SAP2000, RPA99 modified 2003, BAEL91, ultimate resisting moment, critical section.

## ملخص

يقدم هذا المشروع دراسة مفصلة لمبنى سكني مكون من طابق أرضي وأربعة طوابق علوية (R+4) يقع في ولاية عين تيموشنت في أولاد بوجمعة. تصنف هذه المنطقة ضمن المنطقة الزلزالية II a (زلزالية متوسطة) وفقاً للوائح الزلزالية الجزائرية (RPA) إصدار 2003. (يتم تأمين تدعيم هذه الهيكلية من خلال إطارات مستقرة ذاتياً (عمود-عارضة) مصنوعة من الخرسانة المسلحة.

تم التحقق من هذا البناء وفقاً للوائح الحالية (RPA99) إصدار 2003 و (BAEL91) مع إجراء تحليل زلزالي باستخدام طريقة الاستاتيكا المكافئة بمساعدة برنامج الحساب SAP2000. تم تحديد العزوم المقاومة القصوى للقطاعات الحرجة باستخدام برنامج الحساب SOCOTEC.

تتكون هذه الدراسة من:

- الجزء الأول يتضمن الوصف العام للمشروع مع عرض خصائص المواد، ثم التصميم المبدئي للهيكل وأخيراً توزيع الأحمال.
  - تم بدء الدراسة الديناميكية للهيكل في الجزء الثاني باستخدام برنامج SAP2000 لتحديد الإجهادات المختلفة الناتجة عن الأحمال (الحمل الزلزالي)، ثم دراسة العناصر الهيكلية (العارضة، العمود).
  - من أجل تقييم حالة المبنى، تم إجراء تحليل بلاستيكي بطريقة الخطوة بخطوة لإطار نموذجي.
- الكلمات المفتاحية: مبنى، خرسانة مسلحة، SAP2000، RPA99 المعدل 2003، BAEL91، عزم مقاوم نهائي، قطاع حرج.

## Liste des abréviations

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>
<b><math>f_{c28}</math></b>	La Résistance A La Compression A 28 Jours
<b><math>f_{t28}</math></b>	La Résistance A La Traction A 28 Jours
<b><math>ft28</math></b>	Module De Young Instantané A L'âge De J Jours
<b><math>E_b</math></b>	Coefficient Partiel De Sécurité Sur Le Béton
<b><math>\gamma_s</math></b>	Module De Young De L'acier
<b><math>\nu</math></b>	Coefficient De Poisson
<b><math>\epsilon_e</math></b>	Déformation Elastique D'acier
<b><math>\epsilon_u</math></b>	Déformation Maximale D'acier
<b><math>G</math></b>	Charges Permanentes
<b><math>Q</math></b>	Surcharge D'exploitation
<b><math>\lambda_e</math></b>	L'élancement Du Poteau
<b><math>L_f</math></b>	Longueur De Flambement Du Poteau
<b><math>i</math></b>	Rayon De Giration
<b><math>I</math></b>	Moment D'inertie De La Section Par Rapport A Son Centre De Gravité
<b><math>B</math></b>	Section Droite Du Poteau
<b><math>H_{cal}</math></b>	Hauteur De Calcul Du Poteau Considéré
<b><math>L_{cal}</math></b>	Portée De La Poutre Considérée
<b><math>V</math></b>	Force Sismique Totale A La Base
<b><math>A</math></b>	Coefficient D'accélération De Zone
<b><math>D</math></b>	Facteur D'amplification Dynamique Moyen
<b><math>R</math></b>	Coefficient De Comportement Global De La Structure Dépend Du Mode De Contreventement
<b><math>W</math></b>	Poids De La Structure
<b><math>Q</math></b>	Facteur De La Qualité
<b><math>T</math></b>	Période Fondamentale De La Structure
<b><math>CT</math></b>	Coefficient, Fonction Du Système De Contreventement, Du Type De Remplissage
<b><math>HN</math></b>	Hauteur Mesurée En Mètres A Partir De La Base De La Structure Jusqu'au Dernier Niveau (N)

<b>T1, T2</b>	Périodes Caractéristiques Associées A La Catégorie De Site
<b>e</b>	Excentricité
<b>r</b>	Nombre De Redondance Ou Degré D'hyperstaticité
<b>Mf</b>	Moment Fléchissant De La Poutre
<b>Mp</b>	Moment Plastique De La Section
<b><math>\lambda</math></b>	Facteur De Charge
<b>DMT</b>	Diagramme Des Moments Totaux
<b>RDC</b>	Rez De Chaussée

## Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Caractéristiques des matériaux, pré dimensionnement et descente des charges ....	1
1.1 Présentation de l'ouvrage .....	3
1.1.1 Caractéristiques géométriques.....	4
1.1.2 Données du site .....	4
1.1.3 Caractéristiques des matériaux.....	4
1.1.3.1 Béton .....	4
1.2 Hypothèses de calcul.....	5
1.2.1 Acier .....	8
1.2.2 Briques .....	8
1.2.3 Plâtre.....	9
1.3 Caractéristique mécanique des matériaux .....	9
1.3.1 Introduction .....	9
1.3.2 Etat limite .....	9
1.3.2.1 Etat Limite Ultime (ELU) .....	10
1.3.3 Statut de limitation de service (ELS) .....	10
1.3.4 Notion d'action (charges).....	10
1.3.5 Conclusion.....	11
1.4 Pré dimensionnement des éléments de la structure .....	11
1.4.1 Introduction .....	11
1.4.2 Pré-dimensionnement des éléments secondaires .....	11
1.4.2.1 Les planchers.....	11
1.4.3 Prédimensionnement des éléments résistants (principaux) .....	13
1.4.3.1 Prédimensionnement Des Poutres .....	13
1.4.3.2 Pré dimensionnement des escaliers .....	19
1.5 Evaluation des charges et surcharges .....	22
<b>Chapitre 2 : Étude sismique et des Eléments Structuraux .....</b>	<b>25</b>
2.1 Introduction .....	26
2.2 Présentation du programme sap2000 .....	26
2.3 Choix de la Méthode de calcul .....	27
2.4 Type de contreventement.....	28
2.5 Classification du site .....	28
2.6 Méthode statique équivalente.....	28

2.6.1 Principe.....	28
2.6.2 Modélisation.....	29
2.7 Calcul de la force sismique totale (VOIR MODIFICATIFS ET COMPLEMENTS AUX rpa 99) .....	29
2.8 Détermination du coefficient de comportement global.....	32
2.9 Etude Des Eléments Structuraux .....	33
2.9.1 Les poteaux .....	33
2.9.1.1 Définition .....	33
2.9.2 Calcul du ferrailage longitudinal .....	33
2.10 Les poutres .....	35
2.10.1 Définition .....	35
2.10.2 Calcul des armatures longitudinales .....	35
<b>Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures .....</b>	<b>38</b>
3.1 Introduction .....	39
3.2 Diagramme contrainte-déformation pour un acier doux .....	39
3.3 Hypothèses de la théorie de plasticité .....	41
3.4 Flexion plastique .....	41
3.5 Moment plastique de résistance.....	43
3.6 Plasticité des éléments poutres, portiques .....	44
3.6.1 Introduction .....	44
3.6.2 Rupture d'un portique simple .....	45
3.6.3 Comportement d'un portique sous un chargement croissant.....	46
3.7 Principe de la méthode pas à pas.....	50
3.8 Méthode de Muto .....	50
3.8.1 Principe de la méthode .....	50
3.8.2 Calcul des raideurs des poteaux et des poutres.....	51
3.8.3 Calcul des raideurs de poteau.....	52
3.8.4 Calcul des raideurs des poutres .....	52
3.8.5 Calcul des coefficients <b>K</b> relatif aux portiques : .....	53
3.8.6 Calcul des coefficients correcteurs ( <b>ai</b> ) .....	53
3.8.7 Calcul de la rigidité des poteaux suivant les deux sens : .....	53
3.8.8 Calcul des rigidités relatives de niveau des portiques $R_j$ .....	54
3.8.8.1 Sens longitudinal .....	54
3.8.8.2 Sens transversal .....	54
3.8.9 Calcul du centre de torsion $C_j$ à l'étage « j » .....	55

3.9 Définition du logiciel SOCOTEC .....	55
3.10 Analyse plastique des portiques de la structure.....	59
3.11 Analyse plastique du portique.....	60
<b>Conclusion générale</b> .....	74
Références .....	74

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : la façade principale du bâtiment.....	3
<b>Figure 2</b> : Vue en plan du bâtiment.....	4
<b>Figure 3</b> : Evolution de la résistance du béton $f_{cj}$ en fonction de son âge .....	6
<b>Figure 4</b> : Résistance à la compression.....	7
<b>Figure 5</b> : Evolution de la résistance du béton à la traction $f_{tj}$ en fonction de celle à la compression $f_{cj}$ .....	7
<b>Figure 6</b> : Briques creuses de 6 et 12 trous. ....	9
<b>Figure 7</b> : Diagramme contrainte-déformation de l'acier. ....	10
<b>Figure 8</b> : Plancher à corps creux .....	12
<b>Figure 9</b> : coupe verticale du plancher à corps creux.....	13
<b>Figure 10</b> : Section réduite du voile.....	18
<b>Figure 11</b> : Schéma d'escaliers. ....	19
<b>Figure 12</b> : schéma et dimensions de l'escalier à deux volées .....	20
<b>Figure 13</b> : Plancher type terrasse.....	22
<b>Figure 14</b> : Dimension de l'acrotère .....	23
<b>Figure 15</b> : Le logiciel de calcul utilisé : SAP2000 Version14 .....	26
<b>Figure 16</b> : Module de masse source .....	32
<b>Figure 17</b> : Diagramme contrainte-déformation pour un acier doux.....	40
<b>Figure 18</b> : Diagramme contrainte-déformation élasto-plastique idéal .....	41
<b>Figure 19</b> : développement de la plasticité dans une section .....	42
<b>Figure 20</b> : Diffusion de la plasticité au niveau de la rotule plastique.....	42
<b>Figure 21</b> : Caractéristiques du diagramme moment-courbure pour différentes formes de sections transversales.....	43
<b>Figure 22</b> : propagation de la plasticité à travers une section.....	44
<b>Figure 23</b> : Diagramme idéal de la relation moment courbure .....	45
<b>Figure 24</b> : Comportement d'un portique sous un chargement croissant.....	46
<b>Figure 25</b> :Diagramme du moment fléchissant .....	48
<b>Figure 26</b> : Détermination des paramètres de calcul .....	51
<b>Figure 27</b> : Coefficients $K$ .....	53
<b>Figure 28</b> :Interface du socotec.....	57
<b>Figure 29</b> :Exemple des résultats.....	57
<b>Figure 30</b> : L'effort tranchant qui revient à chaque niveau du portique .....	58
<b>Figure 31</b> : Positions des sections critiques.....	59
<b>Figure 32</b> : Chargement du portique (kN). ....	60
<b>Figure 33</b> : Portique sousnouveau charge V et H concentrées.....	61
<b>Figure 34</b> : l'ordre de l'apparition des rotules au portique.....	73
<b>Figure 35</b> : courbe ( $\lambda - \Delta$ ) du portique transversale .....	74

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : caractéristiques géométriques .....	4
<b>Tableau 2</b> : types et caractéristique de l'acier .....	8
<b>Tableau 3</b> : les sections des poutres sont résumées .....	15
<b>Tableau 4</b> : Charge à la terrasse due aux plancher à corps creu .....	22
<b>Tableau 5</b> : Charge due aux planchers à corps creux de niveau courant .....	22
<b>Tableau 6</b> : Charge permanente du mur extérieur.....	23
<b>Tableau 7</b> : Charge permanente mur intérieur .....	23
<b>Tableau 8</b> : Charge du palier .....	24
<b>Tableau 9</b> : Charge du Volée.....	24
<b>Tableau 10</b> : Classification des zones sismiques.....	27
<b>Tableau 11</b> : Classification du site (rpa99 version 2003) .....	28
<b>Tableau 12</b> : Pénalité correspondante au critère .....	30
<b>Tableau 13</b> : Caractéristiques mécaniques des matériaux.....	33
<b>Tableau 14</b> : Ferrailage de Poteau.....	35
<b>Tableau 15</b> : Figure détermination du mécanisme de ruine d'un portique simple.....	47
<b>Tableau 16</b> : Distribution horizontale de la force sismique .....	50
<b>Tableau 17</b> : Calcul des raideurs de poteau .....	52
<b>Tableau 18</b> : Calcul des raideurs de poutres dans le sens longitudinal .....	52
<b>Tableau 19</b> : Calcul des raideurs de poutres dans le sens transversal.....	52
<b>Tableau 20</b> : Sens longitudinal.....	54
<b>Tableau 21</b> : Sens transversal .....	54
<b>Tableau 22</b> : Etape 1 .....	64
<b>Tableau 23</b> : Etape 2 .....	70
<b>Tableau 24</b> : Etape 3 .....	72

# **Introduction générale**

### Introduction générale

En ingénierie, une structure fait référence à un agencement organisé et stable d'éléments conçus pour supporter des charges et résister aux forces externes tout en conservant son intégrité et sa stabilité.

Notre projet de fin d'étude consiste à analyser le comportement plastique d'une structure en béton armé R+4 par la méthode statique équivalente, afin de mieux prédire sa réponse sismique et de comprendre son comportement au-delà de la limite élastique c'est-à-dire en entamant la zone plastique.

Le code Sap 2000 a été choisi pour la modélisation élément finis de la structure objet du présent travail. Le règlement parasismique algérien RPA 99 version 2003 est utilisé pour le calcul dynamique du bâtiment et pour justifier les sections de ferrailage des éléments résistants.

L'objectif principal de la recherche sur la plasticité structurelle est d'assurer sa sécurité, sa durabilité et ses performances sous des charges extrêmes, tout en optimisant efficacement sa conception et sa maintenance ceci est obtenu en trouvant la courbe de capacité de l'ouvrage étudié.

Le travail est divisé en 3 chapitres :

Introduction Générale.

- Le premier chapitre est réservé pour les caractéristiques des matériaux, pré-dimensionnement et descente des charges.
- Le deuxième chapitre consacré pour l'étude sismique et des éléments structuraux
- Le troisième chapitre présente généralité sur le calcul plastique des structures.

Conclusion générale.

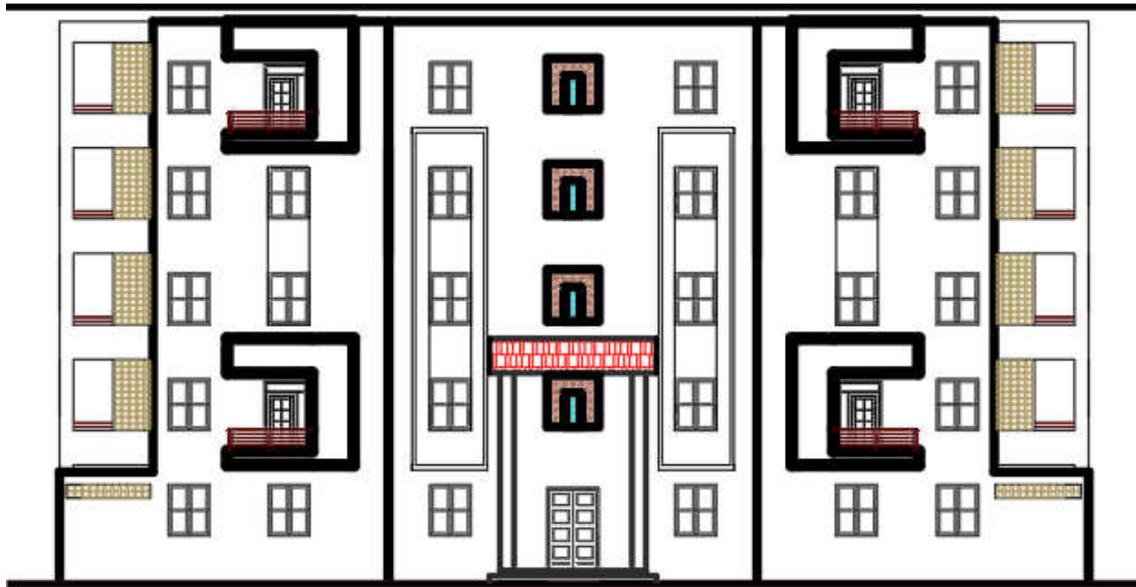
## **Chapitre 1**

# **Caractéristiques des matériaux, pré dimensionnement et descente des charges**

## **1.1 Présentation de l'ouvrage**

Le cas d'étude choisi pour le present travail est un bâtiment a usage d'habitation, composé d'un Rez de chaussée et quatre étages, implanté à Ain Témouchent, ouled boujamaa.

La configuration du bâtiment présente une régularité en plan et en élévation (figure 1).



**Figure 1 : la façade principale du batiment**

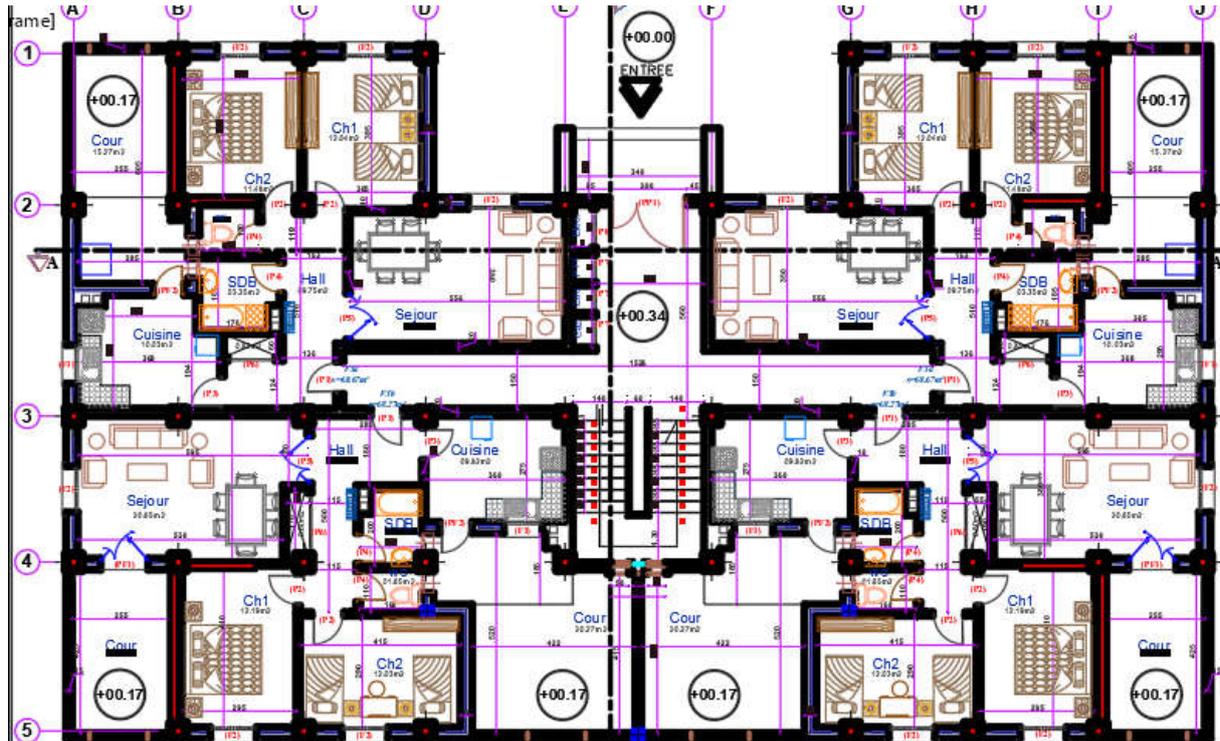


Figure 2 : Vue en plan du bâtiment

### 1.1.1 Caractéristiques géométriques

Longueur totale du bâtiment	L = 29.2m
Hauteur totale du bâtiment	H = 15.3m
Largeur totale du bâtiment	l=17,65m
Hauteur du sous-sols et RDC	h=3.06m
Hauteur des étages courants et RDC	h=3.06m

Tableau 1: caractéristiques géométriques

### 1.1.2 Données du site

- Le bâtiment est implanté dans une zone classée par le RPA 99/version 2003 comme zone de moyenne sismicité (zone IIa).
- L'ouvrage appartient au groupe d'usage 2.
- Le site est considéré comme meuble (S3).

### 1.1.3 Caractéristiques des matériaux

#### 1.1.3.1 Béton

Le béton est un mélange de matériaux inertes (granulats) avec un liant hydraulique (ciment), de l'eau de gâchage et éventuellement des adjuvants. Pour avoir une bonne résistance précise et une bonne qualité après durcissement, le dosage en ciment varie entre

300-400Kg /m<sup>3</sup> de béton mis en œuvre, au-dessous de 300Kg/m<sup>3</sup> les règles du BAEL 91 ne sont plus applicables.

Le rapport entre la masse d'eau (E) et de ciment (C) contenue dans le béton est l'une des valeurs caractéristique les plus importante du béton frais et du béton durci .Lorsque le rapport E/C augmente le béton frais devient plus maniable, par contre la qualité d'un béton après le durcissement est d'autant meilleur que le r--apport E/C est faible.

### **a) Le Dosage du Béton**

On a utilise un béton ordinaire, le dosage dans les conditions normales est :

- Ciment CPA 325: 350 kg/m<sup>3</sup>.
- Gravier 15/25 mm : 534 Kg/m<sup>3</sup>.
- Gravier 8/15 mm : 445 Kg/m<sup>3</sup>.
- Sable Dg < 5 mm : 400 kg/m<sup>3</sup>.
- L'eau de gâchage : 175 l/m<sup>3</sup>.
- La densité théorique de ce béton est : 2500 Kg/m<sup>3</sup>.

## **1.2 Hypothèses de calcul**

Dans notre étude, les hypothèses de calcul adoptées sont les suivant :

- **La résistance à la compression du béton à 28 jours :**

$$f_{c28} = 25 \text{ MPa.}$$

- **La résistance à la traction du béton :**

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$$

$f_{t28} = 2.1$
-----------------

## **1.3 Module de déformation longitudinale du béton**

- **Module d'élasticité longitudinal différé :**

Sous les contraintes d'application à long terme, on admet qu'au jour "j" le module de déformation longitudinale différée du béton  $E_{vj}$  est donné par :

$$E_{vj} = 3\,700 (f_{cj})^{1/3}$$

$$E_{vj} = 10818.865 \text{ MPa.}$$

- **Module d'élasticité longitudinal instantané :**

Dans les limites normales, la durée d'application est inférieure à 24 heures. Nous admettons que dans le module de déformation longitudinale instantané  $E_{ij}$  du béton à l'âge "j" est égal à avoir :

$$E_{ij} = 11000 (f_{cj})^{1/3}$$

$$E_{ij} = 321456.595 \text{ MPa.}$$

❖ **Résistance à la compression**

La résistance caractéristique à la compression du béton  $f_{cj}$  à  $j$  jours d'âge est déterminée à partir d'essais sur des éprouvettes normalisées de 16 cm de diamètre et de 32cm de hauteur.

On utilise le plus souvent la valeur à 28 jours de maturité :  $f_{c28}$ .

Pour des calculs en phase de réalisation, on adoptera les valeurs à  $j$  jours, définies à partir de  $f_{c28}$ , par:

- Pour des résistances  $f_{c28} \leq 40\text{MPa}$  : B.A.E.L 93

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{si } j < 60 \text{ jours.} \\ f_{cj} = 1,1 f_{c28} \end{array} \right.$$

- Pour des résistances  $f_{c28} > 40\text{MPa}$  :

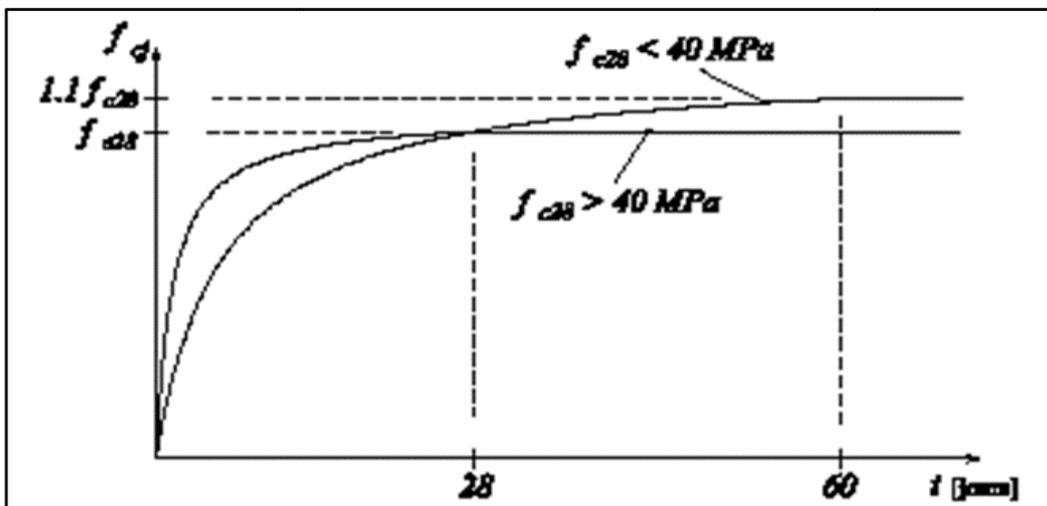
$$f_{cj} = \frac{j}{1.40+0.95j} f_{c28} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{si } j < 28 \text{ jours.} \\ f_{cj} = f_{c28} \end{array} \right.$$

Avec :

Pour l'évaluation de la déformation, pour des grandes valeurs de  $j$

On a :  $f_{cj}=1,1 \times f_{c28}$ .

Pour l'étude de notre projet, on prendra  $f_{c28} = 25\text{MPa}$ .



**Figure 3:** Evolution de la résistance du béton  $f_{cj}$  en fonction de son âge



Figure 4: Résistance à la compression

❖ Résistance à la traction :

La résistance à la traction se détermine par plusieurs essais : parmi ces essais on peut citer :

1. Traction directe sur les cylindres précédents en collant des têtes de traction.
2. Traction-flexion : à l'aide d'une éprouvette prismatique de côté « a » et de longueur « 4a » reposant sur deux appuis horizontaux et soumise à la flexion la résistance à la traction est notée par «  $f_{tj}$  », elle est définie par la relation :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{cj} \quad \text{si } f_{c28} \leq 60\text{Mpa.}$$

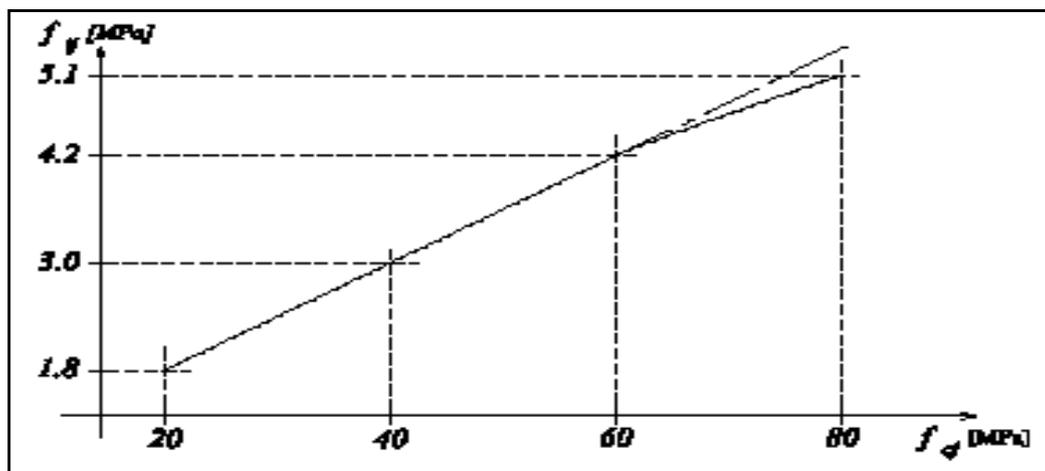


Figure 5: Evolution de la résistance du béton à la traction  $f_{tj}$  en fonction de celle à la compression  $f_{cj}$

### 1.2.1 Acier

L'acier est un alliage du Fer et du Carbone, en faible pourcentage, c'est un matériau caractérisé par une bonne résistance aussi bien en traction qu'en compression.

Il ne réagit pas chimiquement avec le béton, il a le même coefficient de dilatation thermique que celui du béton, et il présente une bonne qualité d'adhérence avec le béton.

Résistances mécaniques du béton

Les aciers utilisés pour la mise en œuvre des éléments en béton armé sont :

Type d'acier	Rond Lisse Fe E 235	Haute Adhérence Fe E 400	Treillis soudé Fe E 520
Symbole	RL	HA	TS
Limite élastique ( MPa )	235	400	520
Résistance à la rupture	410-490	480	550
Allongement relatif à la rupture ‰	22	14	8
Utilisation	Cadre et étriers des poutres et des poteaux...	Tous travaux en béton armé	Emploi courant pour : Planchers, dalle de compression

**Tableau 2** : types et caractéristique de l'acier

### 1.2.2 Briques

Les briques, depuis longtemps, sont considérées parmi les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des briques est passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite, enfin la brique stabilisée. La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations (Brique de verre, brique cellulaire, brique monobloc ...etc.)



**Figure 6:** Briques creuses de 6 et 12 trous.

### **1.2.3 Plâtre**

Le plâtre est un des plus vieux matériaux de construction utilisé par l'homme, les premiers signes d'emploi de plâtre remontent à environ 9000 ans, sous forme de support pour fresques murales (fouilles en Anatolie). La faible température nécessaire à la production de poudre de plâtre et l'abondance de gypse naturel dans la nature expliquent cette ancienneté d'utilisation.

Actuellement, le plâtre est utilisé soit directement en enduits, ou bien en éléments préfabriqués, carreaux ou plaques (couche de plâtre entre deux cartons). C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur, grâce à ses propriétés d'isolation thermique et acoustique et sa résistance au feu. La conductivité thermique d'un enduit de plâtre est de l'ordre de  $0,26 \text{ W.m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , contre 1,15 pour un enduit de ciment ou 50 pour l'acier

## **1.3 Caractéristique mécanique des matériaux**

### **1.3.1 Introduction**

Les propriétés des matériaux utilisés dans la construction seront conformes aux Règles Techniques de Conception et de Calcul des Structures en Béton Armé CBA 93, au Règlement sur le Béton Armé à l'État Limite, BAEL 91 Révision 99, et au Règlement Algérien sur la Résistance Sismique (RPA) 99 Édition. 2003).

### **1.3.2 Etat limite**

Un état limite est un état dans lequel une structure ne répond plus aux exigences de performance de conception et doit définir les limites de sécurité admissibles ainsi que l'apparence de la structure : une prédiction de la situation réelle est encore plus défavorable.

Les paramètres à considérer sont l'action, les propriétés et données géométriques du matériau et ses imperfections, on distingue deux critères pour déterminer les dimensions des éléments soumis à contrainte :

### 1.3.2.1 Etat Limite Ultime (ELU)

Permet de calculer tous les facteurs affectant la sécurité du personnel et/ou la sécurité structurelle. Ainsi, un facteur de sécurité est pris en compte, permettant d'augmenter la charge appliquée à la structure dans des situations dommageables et de réduire la résistance structurelle du matériau : elle est toujours associée à la destruction de la structure.

- **Hypothèses de calcul :**

- Conservation de la section plane (tracé linéaire déformé).
- Il n'y a pas de glissement relatif entre l'acier et le béton.
- Le béton tendu est ignoré dans les calculs.

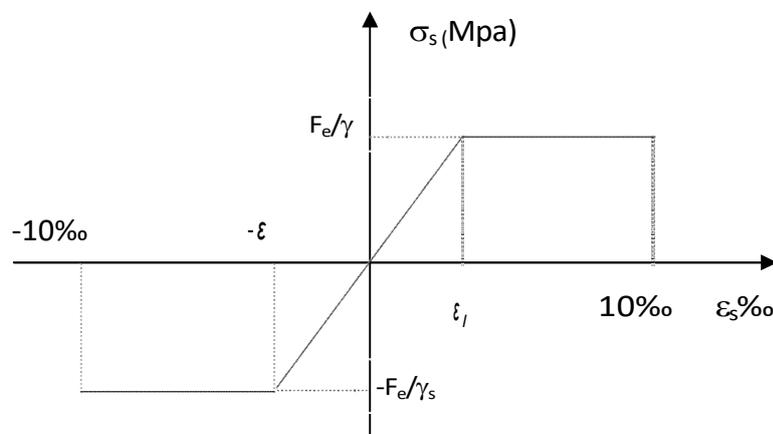


Figure 7: Diagramme contrainte-déformation de l'acier.

### 1.3.3 Statut de limitation de service (ELS)

C'est l'état dans lequel la structure répond à toutes les conditions, tend à être mieux utilisée, dépasse même les normes spécifiées et assure la stabilité.

- **Hypothèses de calcul :**

- Déformation et flèche qui affectent l'apparence ou le fonctionnement du bâtiment ou qui causent des dommages aux éléments non structurels.
- Les vibrations peuvent perturber les occupants et endommager le bâtiment ou son contenu.
- La partie droite reste plate.
- Il n'y a pas de glissement relatif entre les barres d'acier et le béton.

### 1.3.4 Notion d'action (charges)

- **Charge permanent G :**

En cas de charge constante, par rapport aux équipements de travail (revêtements, cloisons, etc.), qui seront associés en permanence à la structure (poids propre).

- **Charge d'exploitation Q:**

Ce sont les charges dites « à venir » issues des travaux : ou leur intensité évolue dans le temps, il peut s'agir de causes climatiques (neige, vent, etc.), de charges non permanentes imposées lors de l'exécution.

- **Charge accidentelle  $\Psi$  :**

Charges qui surviennent rarement dans un court laps de temps (séismes, explosions, etc.) et doivent fonctionner d'une manière spécifique (dynamique).

### **1.3.5 Conclusion**

Après avoir présenté l'ouvrage, les caractéristiques des matériaux ainsi que le dosage du béton on peut entamer le chapitre de pré- dimensionnement des éléments de la structure .

## **1.4 Pré dimensionnement des éléments de la structure**

### **1.4.1 Introduction**

A fin d'assurer une bonne résistance de l'ensemble de la construction, éléments de la structure doivent avoir une section minimale pour reprendre les efforts sollicitant.

Pour cela on procède au pré dimensionnement des éléments résistants (Les planchers, Les poutres, Les poteaux, Les voiles) est une étape régie par des lois empiriques. qui se fait conformément aux règles édictées par les règlements en vigueur :

RPA99 (version 2003), BAEL 91, CBA 93 et DTR BC 2.2...

### **1.4.2 Pré-dimensionnement des éléments secondaires**

#### **1.4.2.1 Les planchers**

##### **➤ Plancher en corps creux**

##### **a. Définition**

Le plancher est un élément horizontal il assure la transmission des d'exploitations ou autres charges permanentes (cloisons, chapes, revêtement ...), et a transmettre sur des éléments porteurs verticaux (poteaux, voiles), son rôle est de séparer entre les étage ainsi que d'assurer l'isolation phonique, acoustique et thermique idéales.

Dans ce projet, on va opter pour des planchers en corps creux pour les étages courants et endalle pleine pour les balcons.

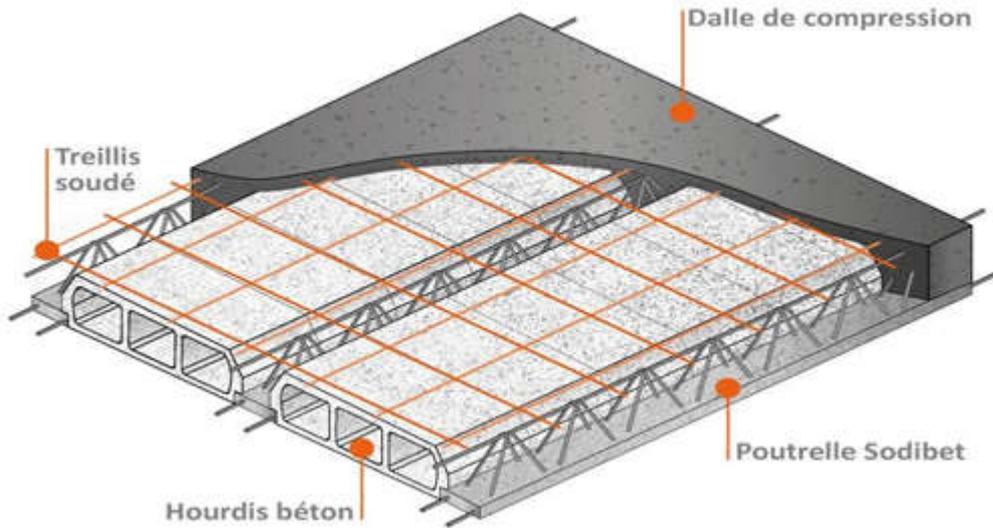


Figure 8: Plancher à corps creux

La condition de résistance à la flèche du plancher en corps creux est :

$$\frac{l}{20} \leq h \leq \frac{l}{25}$$

$l$  : plus grande portée dans le sens considéré.

$$\frac{3.80}{20} \leq h \leq \frac{3.80}{25}$$

$$0,19 \leq h \leq 0,15$$

on a choisie

$h = 21 \text{ cm}$
---------------------

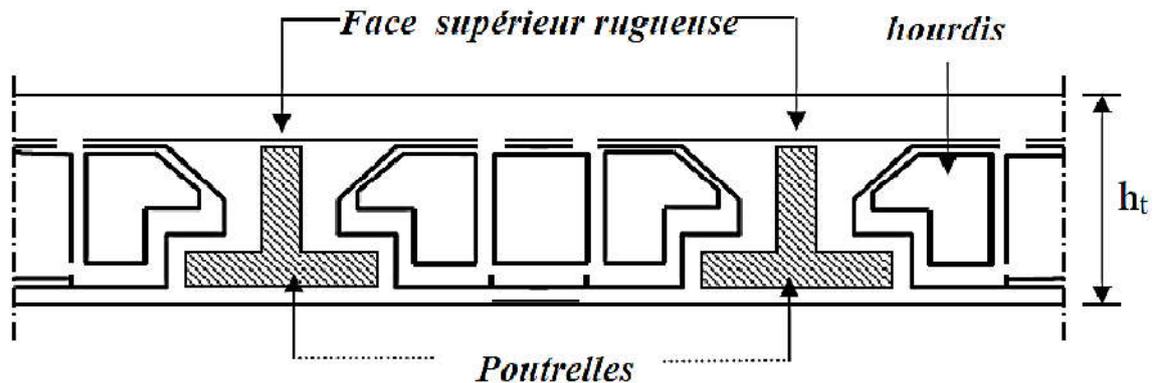


Figure 9: coupe verticale du plancher à corps creux.

Donc :

- 16 cm pour le corps creux.
- 5 cm pour la dalle de compression.

### 1.4.3 Prédimensionnement des éléments résistants (principaux)

#### 1.4.3.1 Prédimensionnement Des Poutres

##### A. Définition

Les poutres de notre bâtiment sont des éléments en béton armé de section rectangulaire elles sont susceptibles de transmettre aux poteaux les efforts dus aux chargements verticaux ramenés par les planchers.

Les poutres seront prés dimensionnés selon les formules empiriques données par **BAEL91** et vérifiées par la suite selon le **RPA99 (v2003)**

##### ➤ Les poutres principales :

Reçoivent les charges transmises par les solives (poutrelles) et les réparties aux poteaux sur lesquels ces poutres reposent.

On a **L=5.5m**

**L** : longueur maximale de la travée

**h** : hauteur de la poutre

$$\frac{L}{15} \leq h \leq \frac{L}{10}$$

$$\frac{550}{15} \leq h \leq \frac{550}{10}$$

$$36.66\text{cm} \leq h \leq 55\text{cm}$$

On prend **h=45cm**

$$0.3h \leq b \leq 0.7h$$

$$0.3 \times 50 \leq b \leq 0.7 \times 50$$

$$15 \leq b \leq 35$$

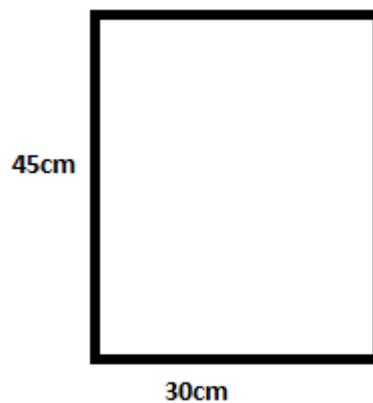
On prend  $b=30\text{cm}$

**Les dimensions des poutres doivent satisfaire à la condition du R.P.A 99 V2003**

$$b \geq 20\text{cm} = 30\text{cm} \geq 20\text{cm} \dots \dots \dots \text{c.v}$$

$$h \geq 30\text{cm} = 45\text{cm} \geq 30\text{cm} \dots \dots \dots \text{c.v}$$

$$\frac{h}{b} \leq 4 = \frac{45}{30} = 1.5 \leq 4 \dots \dots \dots \text{c.v} \leq 4 \dots \dots \dots \text{c.v}$$



➤ **Les poutres secondaires :**

Reliant les portiques entre eux pour ne pas basculées.

D'après les règles de CBA93 on a :

$$\frac{L}{15} \leq h \leq \frac{L}{10}$$

Avec :

- **L** : distance entre axe de poteaux et on choisie la plus grande portée.
- **h** : hauteur de la poutre.

$$L=3.80\text{m}$$

On a :

$$\frac{380}{15} \leq h \leq \frac{380}{10} = 25.3 \leq h \leq 38$$

On prend  $h = 35\text{cm}$

$$0.3h \leq b \leq 0.7h$$

$$0.3 \times 35 \leq b \leq 0.7 \times 35$$

$$10.5 \leq b \leq 24.5$$

On prend  $b=30\text{cm}$

$$b \geq 30\text{cm} = 30\text{cm} \geq 20\text{cm} \dots\dots\dots \text{c.v}$$

$$h \geq 30\text{cm} = 35\text{cm} \geq 30\text{cm} \dots\dots\dots \text{c.v}$$

$$\frac{h}{b} \leq 4 = \frac{35}{20} = 1.75 \leq 4 \dots\dots\dots \text{c.v}$$

Sens	Section (cm×cm)
<b>Poutre principales</b>	45×30
<b>Poutre secondaires</b>	35×30

**Tableau 3** : les sections des poutres sont résumées

### 1.4.3.2 Prédimensionnement Des Poteaux

L : longueur du plancher

l : largeur du plancher

N<sub>u</sub> : étant la charge verticale à l'ELU

**Largeur totale du plancher : 3,80**

**Longueur totale du plancher : 5,50**

On suppose une charge moyenne de 1 (t/m<sup>2</sup>) par étage.

Les sections transversales des poteaux doivent satisfaire aux conditions du RPA99V2003.

$$\min(a, b) \geq 25 \text{ (zone 1 et 2)}$$

$$\min(a, b) \geq \frac{h_e}{20}$$

$$\frac{1}{4} < \frac{a}{b} < 4$$

**Calcul de l'effort N<sub>u</sub> :**

$$N_u = p_u \times s \times n$$

**p<sub>u</sub>** : la charge du plancher

$$p_u = \frac{1t}{m^2}$$

$$N_u = p_u \times s \times n$$

$p_u$  : la charge du plancher

$$p_u = \frac{1t}{m^2}$$

$S$  : la surface supportée par le poteau le plus sollicité.

$$S = L \times l$$

$$S = 3,8 \times 5,5$$

$$S = 20,90 \text{ m}^2$$

$n$  : Le nombre étage

$$N_u = 1 \times 20,90 \times 5$$

$$N_u = 104,5t = 1,045MN$$

❖ **Section réduite**

$$B_r \geq \frac{\beta \times N_u}{\frac{f_{bc}}{0.9} + \frac{0.85 \times f_e}{100 \times \gamma_s}}$$

$\beta$  : Coefficient de correction dépendant de l'élanement mécanique  $\lambda$  des poteaux qui prend les valeurs :

$$\beta = 1 + 0,2(\lambda/35)^2 \quad \text{si } \lambda \leq 50.$$

$$\beta = \frac{0.85\lambda^2}{1500} \quad / \quad \text{si } 50 < \lambda < 70.$$

On se fixe un élanement mécanique  $\lambda=35$  pour rester toujours dans le domaine de la compression centrée d'ou :  $\beta = 1.2$

$$f_c = 400 \text{ MPA}$$

$$\gamma_s = 1.15 \text{ (cas générale)}$$

$$f_{bc} = \frac{0.85 \times f_{c28}}{\theta \times \gamma_b}$$

$$f_{c28} = 25 \text{ MPA}$$

$$\gamma_b = 1.5 \text{ MPA (cas générale)}$$

$$\theta = 1 \text{ (charge } > 24\text{h)}$$

$$f_{bc} = 14.17 \text{ MPA}$$

$$B_r \geq \frac{\beta \times N_u}{\frac{f_{bc}}{0.9} + \frac{0.85 \times f_e}{100 \times 1.15}}$$

$$B_r \geq \frac{1,2 \times 1,045}{\frac{14,17}{0.9} + \frac{0,85 \times 400}{100 \times 1,15}}$$

$$B_r \geq \frac{-1,254}{15,711 + 3,09}$$

$$B_r \geq 0,066m^2$$

On a:

$$B_r \geq (a - 0.02)^2$$

$$a \geq \sqrt{B_r} + 0.02$$

$$a \geq \sqrt{0,066} + 0.02$$

$$a \geq 0,278m$$

Alors on prend  $a=b=30cm$

Donc un poteau de  $(30 \times 30) cm^2$

▪ **Vérification des conditions de RPA 99 V 2003**

$$\min(a, b) \geq 25cm \quad \Rightarrow \quad a = 30 > 25 \quad \dots\dots\dots C. V$$

$$\min(a, b) \geq \frac{h_e}{20} \quad \Rightarrow \quad a = 30 > \left(\frac{323}{20} = 17cm\right) \quad \dots\dots\dots C.V$$

$$\frac{1}{4} < \frac{a}{b} < 4 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{4} < \left(\frac{40}{40} = 1\right) < 4 \quad \dots\dots\dots C.V$$

▪ **Calcul le moment d'inertie**

$$I_x = I_y = \frac{a \times b^3}{12} = \frac{30 \times 30^3}{12}$$

$$I_x = I_y = 67500 cm^2$$

○ **Rayon de giration  $i_x; i_y$**

$$i_x = i_y = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

$$A = 30 \times 30 = 900 cm^2 :$$

$$i_x = i_y = \sqrt{\frac{67500}{900}}$$

$$i_x = i_y = 8,66 cm$$

**Calcul l'élancement :**

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{l_f}{i_x}$$

$$l_0 = 3.06m$$

$$L_f = 0,7l_0$$

$$L_f = 0,7 \times 3,06 = 2,142m$$

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{214.2}{8.66} = \mathbf{24,73\text{cm}} < 50 \quad \text{donc le flambement est vérifié.}$$

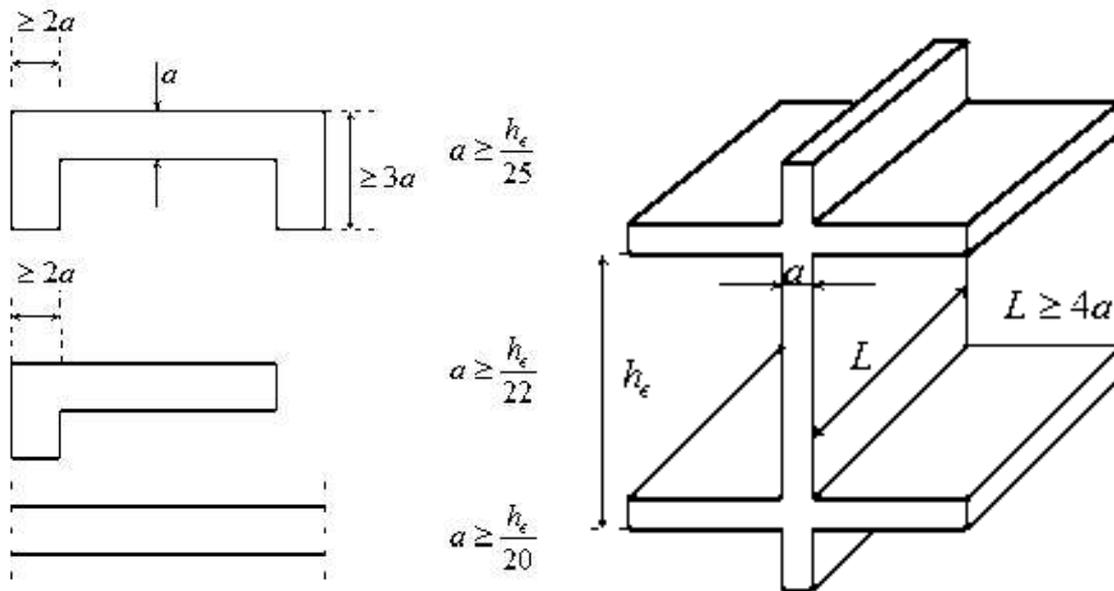
**Les voiles :**

Les voiles sont des murs en béton arme, pleins ou comportant des ouvertures, liées entre eux Par des planchers.

L'épaisseur du voile doit être déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage  $h_e$  et des conditions de rigidité aux extrémités : (RPA 99/Version 2003), de plus l'épaisseur minimale du voile ( $e_{\min}$ ) est de 15cm.

D'après le RPA99 V 2003 , les voiles doivent satisfaire ces conditions :

- $e \geq \frac{h_e}{25}$ ..... pour les voiles simples.
- $e \geq \frac{h_e}{22}$ ..... pour les voiles a une extrémité rigide.
- $e \geq \frac{h_e}{20}$ ..... pour les voiles a deux extrémités rigide.



**Figure 10:** Section réduite du voile

**L :** La longueur du voile.

**a :** L'épaisseur du voile.

**Coupe de voile en élévation**

On a :

$$h_e = 3.06\text{m} \quad \rightarrow \quad a \geq \frac{3.06}{20} = 0.153\text{m} \quad \text{pour les étages.}$$

On prend a=20cm pour tous les étage.

### 1.4.3.2 Pré dimensionnement des escaliers

Dans une construction, la circulation entre les étages se fait par l'intermédiaire des escaliers ou par l'ascenseur. Les escaliers sont constitués par des volées préfabriquées en béton armé reposant sur des paliers coulés en place.

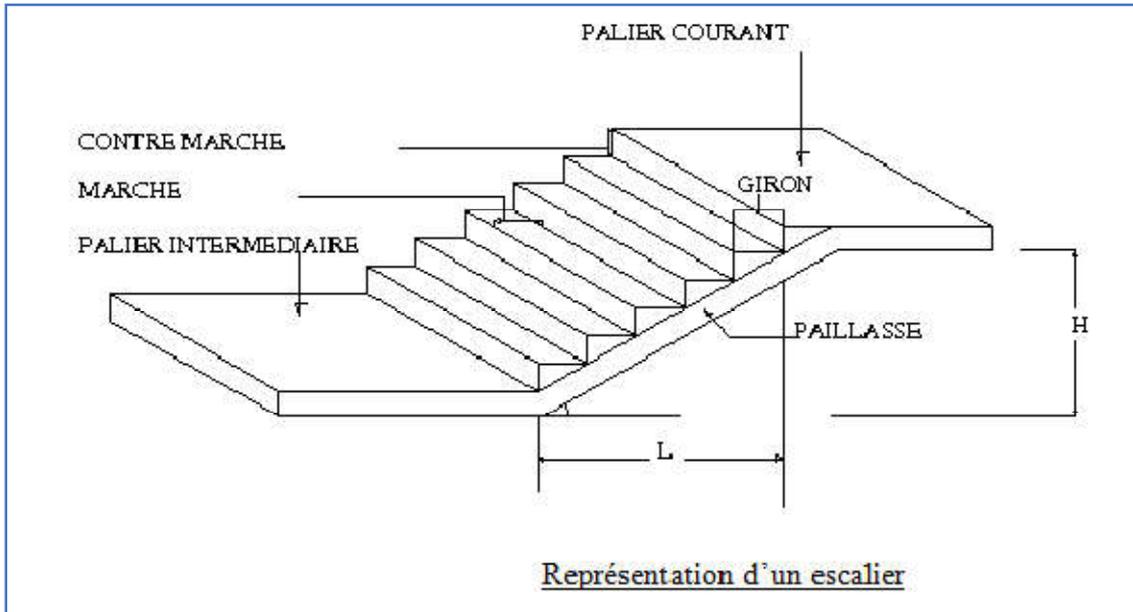


Figure 11 : Schéma d'escaliers.

➤ **Caractéristiques techniques :**

- Hauteur :  $H = 3,06$  m (RDC).
- Hauteur :  $H = 3,06$  m (Etages).

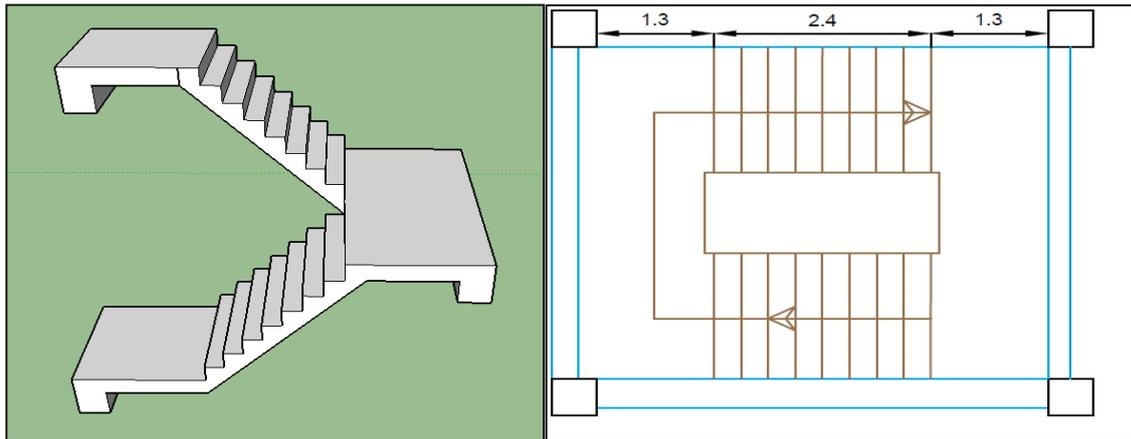


Figure 12 : schéma et dimensions de l'escalier à deux volées

Pour déterminer le giron, appliquons la formule de **Blondel** :

$$59 \text{ cm} < 2h + g < 66 \text{ cm.}$$

h : la hauteur de contre marche.

g : giron la largeur de la marche.

❖ Dans notre cas d'après le plan d'architecture on prend  $g=30\text{cm}$

$$59 \text{ cm} < 2h + 30 < 66 \text{ cm.}$$

$$29 \text{ cm} < 2h < 36 \text{ cm.}$$

$$h=17\text{cm}$$

❖ Nombre de marches et contre marches

• Le nombre de contre marches est :

$$n = \frac{H}{h}$$

n : nombre de contre marche

H : hauteur d'étage 3.06

h : la hauteur de contre marche

$$n = \frac{306}{17}$$

$n=18$  (pour les deux volées)

Donc il y'aura : 9 contre marches d'une hauteur 17 cm, et 8 marches de 30 cm de largeur pour Chaque volé.

➤ **Longueur de la ligne de volée :**

$$L = \left(\frac{n}{2} - 1\right) \times g$$

$$L = (9 - 1) \times 30$$

$$L = 240 \text{ cm.}$$

➤ **Epaisseur de palier :**

$$L = 2,4\text{m} = 240\text{cm}$$

$$\frac{L}{20} \leq e \leq \frac{L}{15}$$

$$\frac{240}{20} \leq e \leq \frac{240}{15}$$

$$12 \leq e \leq 16$$

$$e = 12\text{cm}$$

➤ **Epaisseur de la paille :**

$$\frac{L}{30} \leq e \leq \frac{L}{20}$$

$$\frac{240}{30} \leq e \leq \frac{240}{20}$$

$$8 \leq e \leq 12$$

$$e = 12\text{cm}$$

➤ **Calcul de l'inclinaison de la paille :**

$$\text{Tan}\alpha = \frac{17}{30}$$

$$\alpha = \arctan(0.57)$$

$$\alpha = 29.53^\circ$$

**La longueur de la paille (L) est :**

$$L = \left(\frac{h}{\sin\alpha}\right) = \left(\frac{17}{\sin 29.53^\circ}\right) \Rightarrow L = 3.44 \text{ m.}$$

### 1.5 Evaluation des charges et surcharges

La descente de charges a pour but de déterminer les charges et les surcharges revenant à chaque élément porteur au niveau de chaque plancher.

❖ **Plancher** : Plancher terrasse inaccessible.

Désignation	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	e (m)	G (kg/m <sup>2</sup> )
Protection gravillon	1700	0.05	85
Etanchéité multicouche	600	0.02	12
Forme de pente	2200	0.1	220
Isolation thermique	400	0.04	16
Dalle en corps creux (16+5)			320
Enduit en plâtre	1000	0.02	20
<b>G</b>			<b>673kg/m<sup>2</sup></b>
<b>Q</b>			<b>100kg/m<sup>2</sup></b>

Tableau 4 : Charge à la terrasse due aux plancher à corps creu

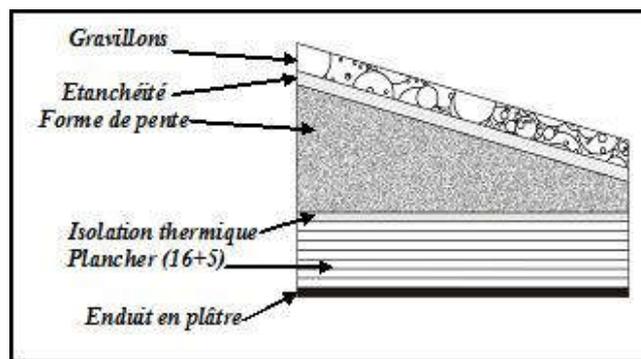


Figure 13 : Plancher type terrasse

❖ **Plancher étage courant** : (Usage d'habitation)

Désignation	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	e (m)	G (kg/m <sup>2</sup> )
Carrelage	2200	0.02	44
Mortier de pose	2000	0.02	40
Lit de sable	1800	0.02	36
Plancher en corps creux (16+5)			320
Enduit en plâtre	1000	0.02	20
Cloisons intérieures	1000	0.1	100
<b>G</b>			<b>560kg/m<sup>2</sup></b>
<b>Q</b>			<b>150kg/m<sup>2</sup></b>

Tableau 5: Charge due aux planchers à corps creux de niveau courant

❖ **Murs**

**a. Murs extérieurs**

Désignation	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	e (m)	G (kg/m <sup>2</sup> )
Enduit extérieur	1200	0.02	24
Brique creuse	900	0.15	135
Brique creuse	900	0.1	90
Enduit intérieur	1200	0.02	24
<b>G</b>	<b>273kg/m<sup>2</sup></b>		

**Tableau 6 : Charge permanente du mur extérieur**

**b. Murs intérieurs (simple parois)**

Désignation	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	e (m)	G (kg/m <sup>2</sup> )
Enduit extérieur	1200	0.02	24
Brique creuse	900	0.1	90
Enduit intérieur	1200	0.02	24
<b>G</b>	<b>138kg/m<sup>2</sup></b>		

**Tableau 7 : Charge permanente mur intérieur**

**Remarque :**

Les murs peuvent être avec ou sans ouvertures donc il est nécessaire d'opter des coefficients selon le pourcentage d'ouvertures :

- Murs avec portes (90%G).
- Murs avec fenêtres (80%G).
- Murs avec portes et fenêtres (70%G).

❖ **Acrotère**

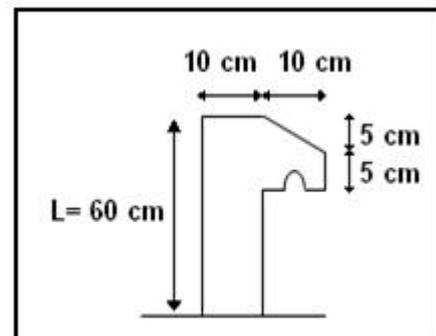
$$S = \frac{(0.05 \times 0.1)}{2} + (0.05 \times 0.1) + (0.1 \times 0.6)$$

**S=0.0675 m<sup>2</sup>/l**

G=0.0675x2500

**G=168, 75 kg/ml.**

**Q= 100 kg/ml**



**Figure 14 : Dimension de l'acrotère**

❖ Escaliers

a. Palier de repos :

Désignation	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	e (m)	G (kg/m <sup>2</sup> )
Carrelage	2200	0.02	44
Mortier de pose	2200	0.02	44
Poids propre de palier	2500	0.1	250
Enduit en plâtre	1200	0.02	24
G	362kg/m <sup>2</sup>		
Q	250kg/m <sup>2</sup>		

**Tableau 8:** Charge du palier

b. Volée (paillasse) :

Désignation	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	e (m)	G (kg/m <sup>2</sup> )
Carrelage	2200	0.02	44
Mortier horizontal	2000	0.02	40
Carrelage contre marche	$2000 \times \frac{0.17}{0.3}$	0.02	22.66
Mortier vertical	$2000 \times 0.17 / 0.03$	0.02	22.67
Paillasse en B. A	2500	0.18	450
Enduit en plâtre	1000	0.02	20
Contre marche en B. A	2500	0.17/2	212.5
G	811.83kg/m <sup>2</sup>		
Q	250kg/m <sup>2</sup>		

**Tableau 9 :** Charge du Volée

**Chapitre 2 :**  
**Étude sismique et des Eléments Structuraux**

### 2.1 Introduction

Un tremblement de terre est la libération soudaine de l'énergie potentielle accumulée dans les roches suite au mouvement relatif de différentes parties de la croûte terrestre. Lorsque la contrainte dépasse un certain seuil, l'équilibre est rompu et des ondes sismiques sont générées qui se propagent dans toutes les directions et atteignent le sol. Ces mouvements du sol excitent la structure par les déplacements de ses supports et sont plus ou moins amplifiés dans la structure. Le degré d'amplification dépend de l'étape la plus critique de l'analyse structurelle : la création d'un modèle qui englobe essentiellement la période structurelle et les propriétés du sol.

Il s'agit de mener une étude holistique pour tenter de mettre en évidence le comportement dynamique de la structure.

### 2.2 Présentation du programme sap2000

SAP2000 est un logiciel de calcul pour les ouvrages d'art (bâtiments, châteaux d'eau, etc.) et les travaux publics (ponts, tunnels, etc.).

Il offre de nombreuses possibilités d'analyse des effets statiques et dynamiques grâce à des compléments de conception. Il peut également vérifier des structures en béton armé ou à ossature métallique.

L'interface graphique disponible facilite grandement la modélisation et l'utilisation des résultats.



**Figure 15:** Le logiciel de calcul utilisé : SAP2000 Version14

### 2.3 Choix de la Méthode de calcul

Selon le RPA 99 le calcul des forces sismiques peut être mener suivant trois méthodes :

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

Le choix de la méthode de calcul dépend des conditions d'application de chacune d'elle.

Dans notre cas, d'après le RPA 99 / version 2003.

{ Une zone I Ia de moyenne sismicité.  
{ Le groupe d'usage 2.

Le calcul se fait par la méthode statique équivalente

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 avec une hauteur au plus égale 65m en zone I et II et a 30m en zone III.
- b. Le bâtiment ou bloc étudié présente une configuration irrégulière tout en respectant (autre les conditions de hauteur énoncées en a , les conditions complémentaires suivantes :

#### b.1 Classification des zones sismiques

La zone	La sismicité
0	Négligeable
I	Faible
II a	Moyenne
II b	
III	Élevée

Tableau 10: Classification des zones sismiques

#### b.2 classification des ouvrages selon leur importance

##### ➤ Zone I : Tous groupes

##### ➤ Zone II a :

- Groupe d'usage 3.
- Groupes d'usage 2, si la hauteur est inférieure ou égale à 7 niveaux ou 23 m.
- Groupe d'usage 1B, si la hauteur est inférieure ou égale à 5 niveaux ou 17m.
- Groupe d'usage 1A, si la hauteur est inférieure ou égale à 3 niveaux ou 10m.

➤ **Zone II b et III :**

- Groupes d’usage 3 et 2, si hauteur est inférieure ou égale à 5 niveaux ou 17m.
- Groupe d’usage 1b, si la hauteur est inférieure ou égale à 3 niveaux ou 10m.
- Groupe d’usage 1a, si la hauteur est inférieure ou égale à 2 niveaux ou 08m.

Pour le présent travail les conditions d’application de la méthode statique équivalente sont vérifiées.

**2.4 Type de contreventement**

Le système contreventement mixte est constitué par un ensemble de poteaux-poutres formant des portiques étagés, et des voiles sur les deux sens.

**2.5 Classification du site**

D’après l’article 3.3 (RPA99version2003), les sites sont classés en quatre (04) catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent :

- Catégorie S1 (site rocheux).
- Catégorie S2 (site ferme).
- Catégorie S3 (site meuble).
- Catégorie S4 (site très meuble).

Catégorie	Description	$Q_c$ (mpa)	N	$P_1$ (mpa)	$E_p$ (mpa)	$Q_u$ (mpa)	$V_s$ (m/s)
S <sub>1</sub>	Rocheux	-	-	> 5	> 100	> 10	≥ 800
S <sub>2</sub>	Ferme	> 15	>50	> 2	> 20	> 0.4	≥ 400 < 800
S <sub>3</sub>	Meuble	1.5 ~15	10~50	1 ~ 2	5 ~20	0.1 ~0.4	≥ 200 < 400
S <sub>4</sub>	Très meuble ou présence de 3m au moins d’argile	< 1.5	< 10	< 1	< 5	< 0.1	≥ 100 < 200

**Tableau 11 : Classification du site (rpa99 version 2003)**

➤ La structure à étudier est implantée dans un site de **catégorie S3** (site meuble ).

**2.6 Méthode statique équivalente**

**2.6.1 Principe**

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

Le mouvement du sol peut se faire dans une direction quelconque dans le plan horizontal. Les forces sismiques horizontales équivalentes seront considérées appliquées successivement suivant deux directions orthogonales caractéristiques choisies par le projeteur. Dans le cas général, ces deux directions sont les axes principaux du plan horizontal de la structure.

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

C'est pourquoi l'utilisation de cette méthode ne peut être dissociée de l'application rigoureuse des dispositions constructives garantissant à la structure:

- Une ductilité suffisante.
- La capacité de dissiper l'énergie vibratoire transmise à la structure par des secousses sismiques majeures. (RPA99 VERSION2003)

### 2.6.2 Modélisation

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

### 2.7 Calcul de la force sismique totale (VOIR MODIFICATIFS ET COMPLEMENTS AUX rpa 99)

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

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

Avec :

- A** : coefficient d'accélération de zone.
- D** : facteur d'amplification dynamique moyen.
- Q** : facteur de qualité.

**R** : coefficient de comportement.

**WT** : poids total de la structure

**Coefficient d'accélération de zone (A) :**

$$\begin{cases} \text{Grouped usage(2)} \\ \text{Zone IIa} \end{cases} \Rightarrow A = 0.15 \quad (\text{Tableau (4-1) RPA99})$$

➤ **Coefficient de comportement (R) :**

Système de contreventement mixte assuré par voiles et portiques avec justification d'interaction.

R=3,5 (Tableau (4-3) RPA99)

➤ **Facteur d'amplification dynamique moyen (D) :**

$$\begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta \left(T_2/T\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0 S \\ 2.5\eta \left(T_2/3\right)^{2/3} \left(3/T\right)^{5/3} & T \geq 3.0 S \end{cases}$$

Site 3(site meuble)  $T_2 = 0.5 S$

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} = \sqrt{\frac{7}{2+7}} = 0.88 > 0.7$$

➤ **Facteur qualité (Q) :**

$$Q = 1 + \sum_1^6 p_q ,$$

$P_q$  : valeur de pénalité

	<b>q</b>	
	<b>SENS X</b>	<b>SENS Y</b>
<b>Condition minimale des files porteuses</b>	0	0
<b>Redondance en plan</b>	0	0
<b>Régularité en plan</b>	0.05	0.05
<b>Régularité en élévation</b>	0	0
<b>Contrôle de la qualité des matériaux</b>	0.05	0.05
<b>Contrôle de la qualité d'exécution</b>	0	0

**Tableau 12 : Pénalité correspondante au critère**

$$Q_x = Q_y = 1 + 0.10 = \mathbf{1.10}$$

### ➤ Estimation empirique de la période fondamentale

$$T = \min (C_T \cdot h_N^{3/4}; T_2; 0,09 \cdot \frac{h_N}{\sqrt{D}})$$

**T** : période fondamentale de la structure donnée par la formule suivante :

Avec :

$h_N$  : Hauteur mesurée en mètres à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau

$C_T$  : Coefficient fonction du système de contreventement, du type de remplissage est donné par le tableau 4-6 du RPA99/version2003.

$$h_N = 3.06 \times 5 = 15.3m$$

$$C_T = 0,05$$

### Calcul de la période T1 et T2 :

Selon le rapport géotechnique relatif a notre ouvrage, la catégorie du site est « Sol rocheux » Notée « S1 », Et en ce référant au tableau 4.7 du RPA99v2003, la période caractéristique associée à la catégorie de site est :

$$T_2 = 0,50s$$

$$T_1 = C_T \cdot h_N^{3/4}$$

$$T_1 = (0.05) \cdot (15.3)^{3/4}$$

$$T_1 = \mathbf{0.386 S}$$

$$T_2 = \frac{0.09 \times h_N}{\sqrt{L_X}} = \frac{0.09 \times (15.3)}{\sqrt{29.2}}$$

$$T_2 = \mathbf{0.254 S}$$

$$T_3 = \frac{0.09 \times h_N}{\sqrt{L_Y}} = \frac{0.09 \times (15.3)}{\sqrt{17.65}}$$

$$T_3 = \mathbf{0.327 S}$$

$$T = \min (T_1, T_2, T_3)$$

$$T = \mathbf{0.254 S}$$

### Remarque :

D'après le RPA 99/ V2003, les valeurs de la periode de calcul a partir des formules numeriques ne doivent pas

dépasser celles estimées à partir des formules empiriques appropriées de plus de 30%.

- La période donnée par SAP 2000 .V14 est :

$$T_{Sap} = 0.33s$$

- La période de la méthode statique équivalente est :

$$T_{MSE} = 0.25 s$$

Donc :

$$T = 1,3 * T_{MSE}$$

$$T = 1,3 * 0,25$$

$$T = 0,325 < T_{Sap} = 0.33s$$

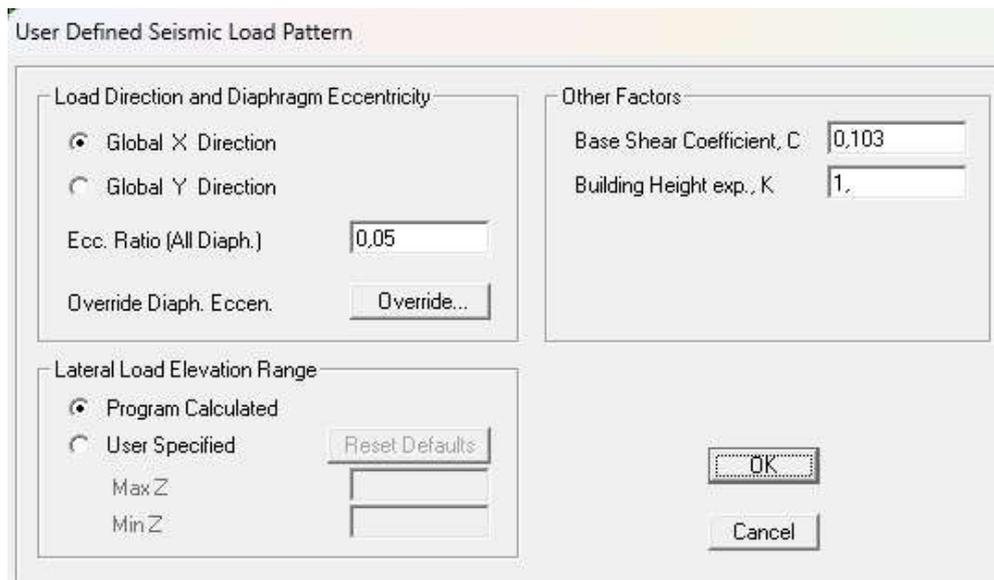
➤ **Calcul facteur d'amplification dynamique moyen :**

$$D = 2,5 \eta$$

**Donc : D = 2,2**

On a :

$$C = \frac{A.D.Q}{R} = 0,103$$



**Figure 16 : Module de masse source**

### **2.8 Détermination du coefficient de comportement global**

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

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

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

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

$W_{Qi}$  : charges d'exploitation

$\beta$  : Coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation et donné par le tableau

**Bâtiments d'habitation, bureaux ou assimilés ;  $\beta=0.2$**

$$W_{terr} = 1151,903 \text{ KN}$$

$$W_{et4,3,2} = 1563,1335 \text{ KN}$$

$$W_{RDC} = 1563,1335 \text{ KN}$$

$$W_{totale} = W_{terr} + 4 * W_{étage} + W_{RDC} = 8415 \text{ KN}$$

Donc la valeur V vaut :

$$V = \frac{0,15 \times 2,2 \times 1,10}{3,5} \times 8415$$

<b>V=866,745KN</b>
--------------------

## 2.9 Etude Des Eléments Structuraux

### 2.9.1 Les poteaux

#### 2.9.1.1 Définition

Le poteau est soumis à une force normale (N) et à deux moments fléchissants.

Les calculs de flambement composé seront effectués conformément à la norme B.A.E.L 91.

Nous ferons également référence à la réglementation Protection parasismique en Algérie (R.P.A 99).

Les barres d'acier seront soumises aux contraintes les plus défavorables et les situations suivantes :

Situation	Béton			Acier (FE 400)		
	$\gamma_b$	Fc 28 (MPa)	fbu (MPa)	$\gamma_s$	Fe (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)
<b>Ultime</b>	1,5	25	14,167	1,15	400	348
<b>Accidentelle</b>	1,15	25	18,478	1	400	400

**Tableau 13 : Caractéristiques mécaniques des matériaux**

### 2.9.2 Calcul du ferrailage longitudinal

#### ❖ Calcul de ferrailage des poteaux

On va prendre un seul type de poteau et on le calcul en flexion composé et les autres sont calculés avec **SAP2000**.

• Soit le poteau (30×30) :

➤ ELU:

$$\begin{cases} N = 474,75 \text{KN} \\ M = 5,3611 \text{KN.m} \\ b = 0,3 \\ h = 0,3 \end{cases}$$

$$d = 0,9 \cdot h = 0,9 \cdot 0,3 = 0,27$$

$$d' = 0,1 \cdot h = 0,1 \cdot 0,3 = 0,03$$

➤ L'excentricité :

$$e = \frac{Mu}{Nu} = \frac{5,3611}{474,75} = 0,01129 \text{m}$$

$$e_a = e + \frac{h}{2} - d' = 0,01129 + \frac{0,3}{2} - 0,03$$

$$e_a = 0,13129 \text{m}$$

$$M_A = N_u \times e_a = 474,75 \times 0,13129$$

$$M_A = 0,0623 \text{KN.m}$$

$$\mu_u = \frac{M_A}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \frac{0,0623}{0,3 \times (0,27)^2 \times 14,17} = 0,201 < 0,392$$

$$\Rightarrow \mu_u = 0,201$$

$$\alpha = 1,25 \times (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1,25 \times (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,201})$$

$$\Rightarrow \alpha = 0,2833$$

$$Z = d \times (1 - 0,4 \times \alpha) = 0,27 \times (1 - 0,4 \times 0,2833)$$

$$\Rightarrow Z = 0,239 \text{m}$$

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z \times \sigma_{st}} = \frac{5,3611 \times 10^{-3}}{0,239 \times 347,83} = 0,00006448$$

$$\Rightarrow A_{st} = 0,6448 \text{ Cm}^2$$

Alors on va ferrailer avec  $A_{min}$

- **Armatures minimales :**

$$A_{min} = 0,8\%B \dots\dots\dots \text{RPA99 V2003.}$$

$$A_{minRPA} = 0.008 \times (30 \times 30) = 7.2 \text{ cm}^2.$$

Donc d'après le tableau de ferrailage on trouve : **4T16=8.04cm<sup>2</sup>**

**Espacement :** selon RPA 99 version 2003, art 7.4.2.2

**Dans la zone nodale :**

$$T \leq \min (10\phi_1 ; 15\text{cm}) \implies \text{zone lia}$$

$$T \leq \min (10.1,6 ; 15\text{cm}) = 15\text{cm}$$

On adopte un espacement de 10cm en zone nodale sur une distance  $h'$

D'après RPA99.V2003 :

$$h' = \max\left(\frac{he}{6}; b; h; 60\text{cm}\right)$$

$$h' = \max\left(\frac{306}{6} = 51\text{cm}; 30\text{cm}; 30\text{cm}; 60\text{cm}\right)$$

Donc :  $h' = 60\text{cm}$

**Dans la zone courante :**

$$S_t' \leq 15\phi_1 \implies S_t' \leq 15.1,6 \implies S_t' \leq 24\text{cm}$$

On adopte un espacement de 15cm en zone courante

Poteau	Section (cm <sup>2</sup> )	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>adopte</sub>	On adopte
1	30×30	0,644	7.2	4T16

**Tableau 14:** Ferrailage de Poteau

## 2.10 Les poutres

### 2.10.1 Définition

Les poutres sont des éléments structuraux, qui permettent de transmettre les charges du plancher aux poteaux. Les poutres principales sont plus sollicitées par rapport aux poutres secondaires.

### 2.10.2 Calcul des armatures longitudinales

a) **Ferrailage en travée**

- **ELU :**

$$M_t = 75,8025 \text{ KN.m}$$

$$\begin{cases} h = 0,45\text{m} \\ b = 0,30\text{m} \end{cases}$$

$$\begin{cases} d = 0.9h = 0,9 \times 0,45 = 0.405\text{m} \end{cases}$$

$$d'=0.1h=0.1 \times 0.45=0.045\text{m}$$

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \frac{75,8025 \times 10^{-3}}{0,3 \times (0,405)^2 \times 14,17}$$

$$\Rightarrow \boxed{\mu_u = 0.1087}$$

$\Rightarrow \mu_u < 0,187 \Rightarrow$  donc les armatures de compression ne sont pas nécessaires.

$$\alpha = 1,25 \times (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1,25 \times (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,1087})$$

$$\Rightarrow \boxed{\alpha = 0,144}$$

$$Z = d \times (1 - 0,4 \times \alpha) = 0,405 \times (1 - 0,4 \times 0,144)$$

$$\Rightarrow \boxed{Z = 0,3816}$$

$$A_{st} = \frac{M_u}{z \times \sigma_{st}} = \frac{75,8025 \times 10^{-3}}{0,3816 \times 347.83} = 0.000571$$

Donc :  $\boxed{A_{st}=5,7109\text{cm}^2}$

• **Condition de non fragilité**

$$A_{st} \geq \max\left(\frac{b \times h}{1000}; 0.23 \times b \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e}\right) \text{cm}^2 \Rightarrow A_{st} \geq \max(1,35\text{cm}^2; 5,7109\text{cm}^2)$$

Donc  $5,7109 > 1.467\text{cm}^2$  ..... **C. V**

• **Armatures maximales :**

Selon **RPA99 V2003**, page 73 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet A_{\max} = 4\% (b \times h) \dots\dots\dots (\text{zone courante}) \\ \bullet A_{\max} = 6\% (b \times h) \dots\dots\dots (\text{zone de recouvrement}) \end{array} \right\}$$

♦  $A_{\max} = 0,004 (0,45 \times 0,30) = 5,4 \text{ cm}^2$  (Zone courante).

♦  $A_{\max} = 0,006 (0,45 \times 0,30) = 8,1 \text{ cm}^2$  (Zone de recouvrement).

♦ **Choix des Armatures :**

Le choix des armatures en travée : «  $A_{st} \Rightarrow 4\text{T14}$  » de section 6,16 cm.

**b) Ferrailage en appui :**

-ELU :

-Le moment maximum en appui :  $M_A = 108.892\text{KN.m}$

$$h=0,45\text{m} \quad b=0,30\text{m}$$

$$\Rightarrow d=0,9 \cdot h=0,405\text{m}$$

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times d^2 \times f_{bc}} = \frac{108,892 \times 10^{-3}}{0,3 \times (0,405)^2 \times 14,17}$$

$$\Rightarrow \boxed{\mu_u = 0,104}$$

$$\alpha = 1,25 \times (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1,25 \times (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,104})$$

$$\Rightarrow \boxed{\alpha = 0,1377}$$

$$Z = d \times (1 - 0,4 \times \alpha) = 0,405 \times (1 - 0,4 \times 0,1377)$$

$$\Rightarrow \boxed{Z = 0,382\text{m}}$$

Les poutres sont des éléments sollicités par des flexion simple.

	<b>Ferraillage calculé (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Ferraillage choisi (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Travée</b>	<b>5,7109cm<sup>2</sup></b>	<b>4T16=6,16cm<sup>2</sup></b>
<b>Appuis</b>	<b>8,182cm<sup>2</sup></b>	<b>6T14=9,24cm<sup>2</sup></b>

**Tableau 15:** Ferraillage des poutres principales (35X30)

**Chapitre 3 :**  
**Généralités sur le calcul plastique**  
**Des structures**

### 3.1 Introduction

Le calcul des déformations et distorsion sont été faits dans la limite de proportionnalité de la matière d'une structure. Les conceptions sont faites en supposant que les éléments de structure se comportent de façon élastique. Des facteurs de sécurité ont été mis en disposition en se basant sur la limite d'élasticité. Mais strictement fournir un facteur de sécurité sur la base de la contrainte limite élastique n'est pas une indication cohérente du facteur de sécurité par rapport à la capacité maximale de l'élément. En d'autres termes, si la limite élastique est atteinte en un point cela n'implique pas forcément la rupture totale de l'élément. En raison de déformations plastiques et écrouissage de la matière, des particules subissant moins de contraintes seront mis en action, de sorte que la structure est en fait capable de résister à des charges plus importantes. Dans la conception moderne, le principe expliqué ci-dessus est introduit et la méthode de calcul est dite conception plastique.

Le matériau acier a une propriété importante, à savoir sa capacité de résister à des déformations importantes sans rupture. Une grande partie de la déformation se produit durant la phase élastique (yieding). Une partie relativement importante de la déformation se produit pendant l'écrouissage (strain hardening).

Bien que l'analyse et la conception plastique s'appliquent normalement pour les structures en acier, mais l'idée peut également être appliquée aux structures en béton armé qui sont conçus pour se comporter de manière élastique dans un mode ductile à charges ultimes près de la plastification du renforcement.

### 3.2 Diagramme contrainte-déformation pour un acier doux

La figure 17 montre le diagramme contrainte-déformation pour l'acier doux. La partie de O à A est une ligne droite. La contrainte qui correspond au point A est appelée la limite de proportionnalité. Si l'éprouvette est sollicitée au-delà de la limite de proportionnalité à l'état représenté en B, le matériau reste encore élastique. Mais, dans la gamme de A à B la relation entre la contrainte et la déformation est non linéaire. La contrainte à B est appelée la limite élastique.

Si l'éprouvette est sollicitée au-delà de la limite élastique, la déformation plastique aura lieu. Au niveau du point C, une extension considérable se produit qui correspond à la diminution de la charge. La contrainte au point C est appelée *la limite d'élasticité supérieure*.

Au moment où le matériau est soumis à une déformation supplémentaire, la contrainte correspondante diminue et à l'état représenté à D, le matériau offre une grande résistance à une déformation plus grande. La contrainte au point Dest appelé *la limite d'élasticité inferieure*. Comme la déformation est augmentée, la contrainte augmente et à l'état indiqué en E, un *cou* est développé. La contrainte correspondant à E est appelée *la résistance ultime à la traction*. Comme

la déformation est encore accrue la contrainte diminue et l'éprouvette se casse à l'état représenté en F. La contrainte et F est appelée la *contrainte à la rupture*.

A des fins de l'analyse plastique des structures, le diagramme contrainte-déformation est pris sous une forme modifiée. Nous supposons qu'il existe une plage définie élastique et au-delà de cette plage, le matériau est supposé avoir évolué au cours de l'état plastique. La figure 18 montre le diagramme contrainte-déformation élasto-plastique idéal modifié. Dans ce schéma OC représente le domaine élastique et CD représente le domaine plastique.

À toutes fins pratiques, après avoir atteint la *limite d'élasticité inférieure* le matériau se déforme plastiquement jusqu'à une déformation de 1% à 1,5%, sans augmentation de contrainte. Après le domaine plastique, le phénomène d'écrouissage commence et à nouveau une augmentation de la contrainte est nécessaire pour produire une augmentation de la déformation. La *limite élastique inférieure* est généralement considérée comme la limite d'élasticité utilisée dans la conception des structures.

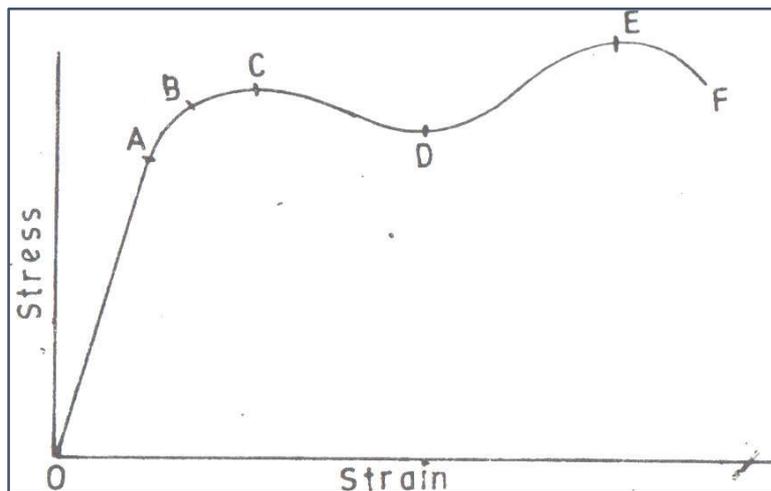


Figure 17 : Diagramme contrainte-déformation pour un acier doux

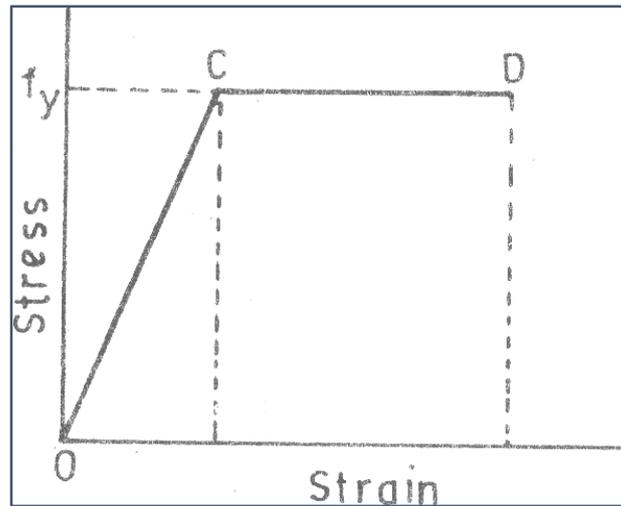


Figure 18 : Diagramme contrainte-déformation élasto-plastique idéal

### 3.3 Hypothèses de la théorie de plasticité

La théorie de plasticité est développée sur la base des hypothèses suivantes :

- i. L'acier possède la propriété de ductilité et de sorte qu'il peut être soumis à une déformation plastique sans fracture.
- ii. La distribution des déformations dans une section est linéaire, c à d dans le cas des poutres les sections planes avant flexion restent planes après flexion.
- iii. Le diagramme contrainte-déformation est modifié c à d que l'acier est supposé être un idéal élasto-plastique matériau.
- iv. La relation entre la contrainte de traction et la déformation de traction est la même que celle entre la contrainte de compression et la déformation de compression.
- v. Durant le chargement, les différentes charges sont appliquées sur la structure avec un pas constant.
- vi. Toutes les connexions assurent une continuité satisfaisante de façon à transmettre le moment plastique.
- vii. La déformation élastique n'est pas prise en compte.

### 3.4 Flexion plastique

Lorsque la section d'un membre est devenu entièrement en plastique sous l'effet d'un moment de flexion, toute tentative d'augmenter le moment amène l'élément d'agir comme une rotule. C'est, à la section où la limite élastique est atteinte, des grandes rotations sont possibles sans des changements importants dans le moment résistant. Ce phénomène est décrit comme une "rotule plastique", mais contrairement à une rotule, la rotation est résistée par un moment constant.

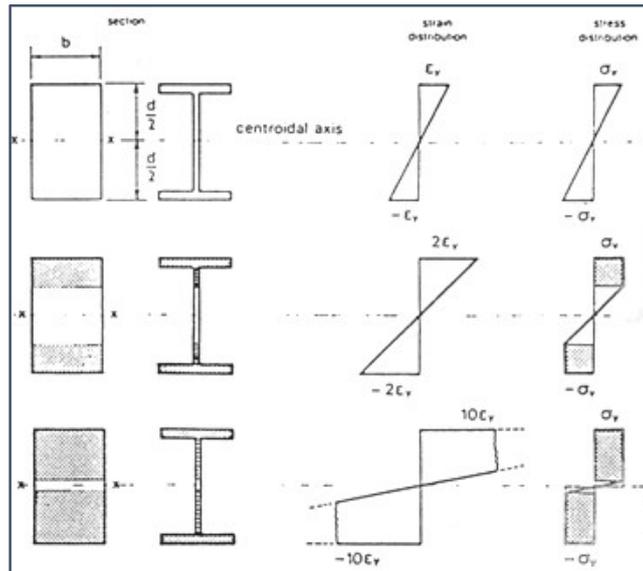


Figure 19 : développement de la plasticité dans une section

Aux fins de la théorie simple de plasticité, la diffusion de la plasticité le long de l'élément est négligée. La déformation plastique est supposée être limitée à la section transversale de moment maximal  $M_{max}$ , donnant le moment au niveau de la rotule plastique.

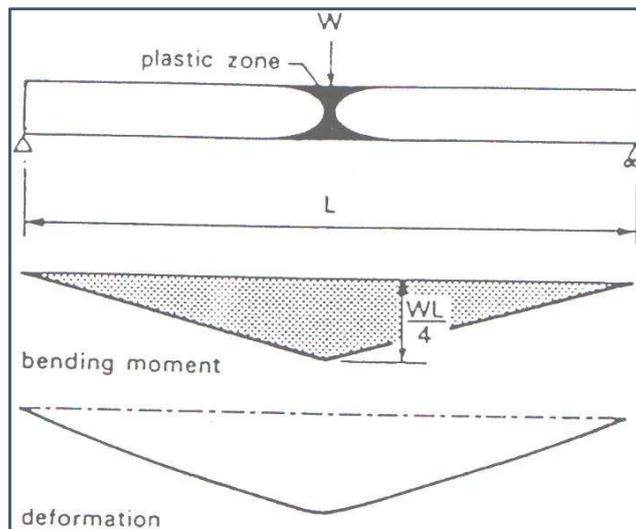


Figure 20 : Diffusion de la plasticité au niveau de la rotule plastique

### 3.5 Moment plastique de résistance

Le moment de flexion (en l'absence de toute force axiale, force de cisaillement ou detorsion) qui produit une rotule plastique dans un élément est le moment plastique noté,  $M_p$  :

$$M_p = \text{Module plastique} \times \text{contrainte limite élastique} = Z_p \times \sigma_y$$

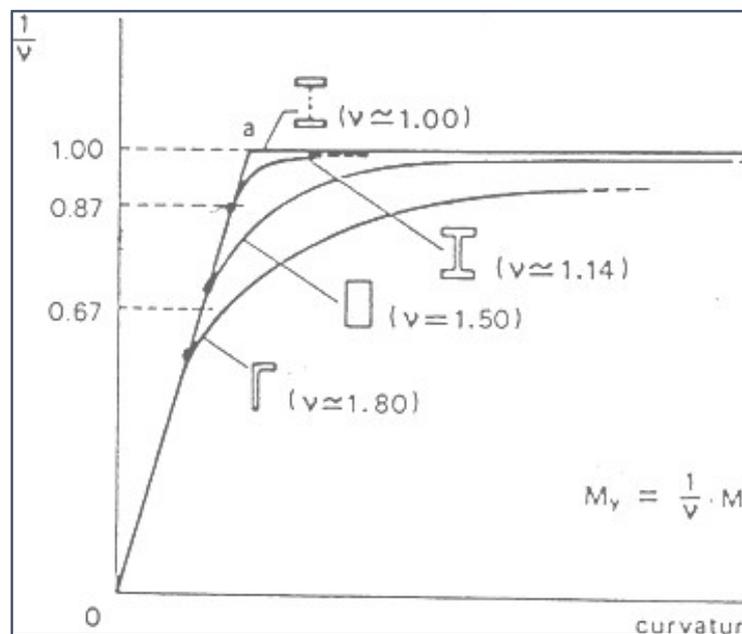
$$\text{Pour une section rectangulaire : } M_p = \frac{bh^2}{4} \cdot \sigma_y \text{ d'où } Z_p = \frac{bh^2}{4}$$

Le module plastique est la somme des moments de toutes surfaces composant une section par rapport à l'axe d'égalité de surfaces (axe des aires égales).

Le rapport entre le module plastique et le module élastique est connu sous le nom de « Facteur de forme »

$$v = \frac{Z_p}{Z_e}$$

Dans un essai de flexion simple sur une forme quelconque de section, la plasticité ne démarre pas avant que le moment de flexion atteigne une valeur de  $\frac{M_p}{v}$ . Pour une section en I, il est d'environ  $0,87M_p$ .



**Figure 21:** Caractéristiques du diagramme moment-courbure pour différentes formes de sections transversales

### 3.6 Plasticité des éléments poutres, portiques

#### 3.6.1 Introduction

Il est possible d'analyser la propagation de la plasticité à travers une section à partir de la courbe contrainte-déformation du matériau. Pour les membres en flexion cela doit être fait en trouvant la relation entre le moment et la courbure de la section.

Supposant une longueur  $\delta x$  d'une poutre initialement rectiligne, après déformation, elle prend la forme d'un arc de cercle.

$\epsilon_c$  et  $\epsilon_t$  sont les déformations de compression et de traction respectivement.

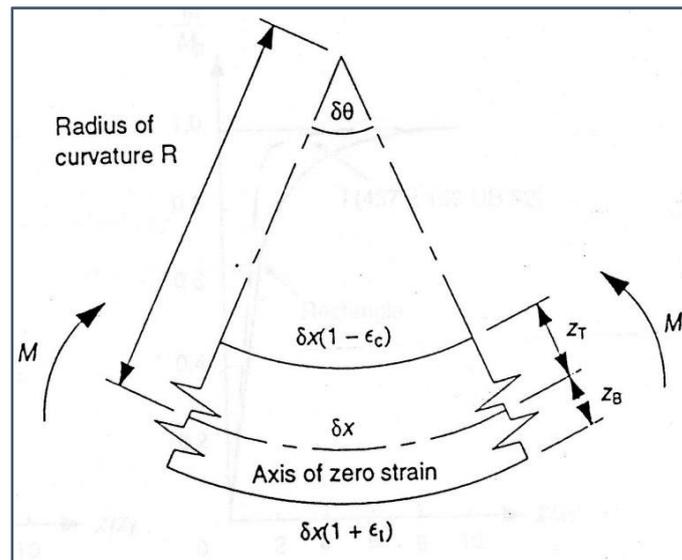


Figure 22 : propagation de la plasticité à travers une section

$$R \cdot \delta\theta = \delta x$$

$$(R + Z_B) \cdot \delta\theta = \delta x \cdot (1 + \epsilon_t)$$

$$(R - Z_T) \cdot \delta\theta = \delta x \cdot (1 - \epsilon_c)$$

A partir duquel:

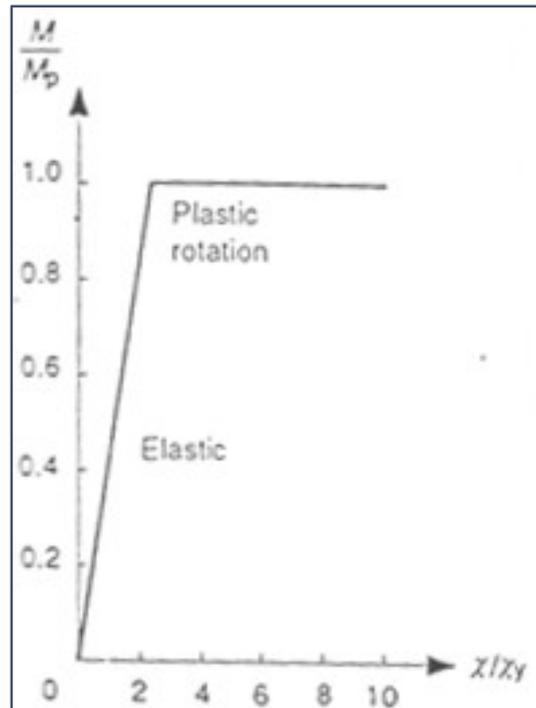
$$R + Z_B = R(1 + \epsilon_t)$$

$$R - Z_T = R(1 - \epsilon_c) \text{ Après}$$

$$\text{Soustraction : } Z_T + Z_B = R(\epsilon_t + \epsilon_c)$$

$$\text{Donc la courbure est de : } \chi = \frac{\epsilon_t + \epsilon_c}{z_x + Z_B} = \frac{\text{Taux de deformations}}{\text{Profondeur de la section}}$$

Un diagramme idéal de la relation moment courbure est présenté dans la figure 23. Dès que le moment plastique est atteint, la rotule plastique se forme et la courbure croît sans aucun changement de moment ceci est connu sous le nom de « rotation plastique de la rotule ».



**Figure 23 :** Diagramme idéal de la relation moment courbure

Pratiquement, il ya toujours une petite région d'élasticité sandwich au milieu de la section. L'hypothèse d'un comportement idéal introduit une très petite erreur pour les sections ayant un facteur de forme proche à l'unité. Les sections de facteur de forme important sont loin de la perfection.

### 3.6.2 Rupture d'un portique simple

Dans l'analyse élastique d'une poutre hyperstatique sous un chargement statique, trois conditions doivent être considérer :

- Condition de continuité : La déformé doit être continue.
- Condition d'équilibre: somme des moments et somme des forces sont nulle.
- Limitation du moment : le moment élastique est le moment limite (à ne pas dépassé).

Dans l'analyse plastique trois conditions similaires doivent être considéré :

- Condition de mécanisme : les rotules plastique interrompe la continuité de la déformé de la pente ce qui exige la formation des rotules plastique pour permettre a la structure (ou une partie de la structure) à se déformer comme un mécanisme compatible avec les conditions au limite restantes ( mécanisme : capacité du système à se déformer sans augmentation de chargement).
- Condition d'équilibre : similaire à celle dans le cas élastique
- Condition du moment plastique : les moments au delà du moment plastique ne peuvent pas être résistés.

### 3.6.3 Comportement d'un portique sous un chargement croissant

Le comportement du portique de la figure 23 quand  $\lambda$  augmente est donné sur le tableau 13

Supposant au début que :  $V=H=1$

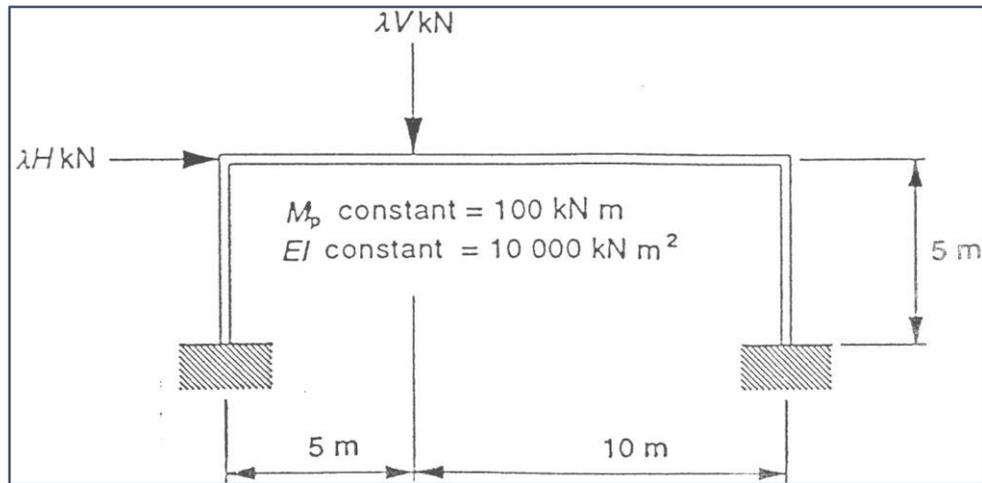


Figure 24 : Comportement d'un portique sous un chargement croissant

	Portique sous charges Unitaires (kN)	DMF sous charges Unitaires (kN.m)	DMT (kN.m)
Etape N°1			
Etape N°2			
Etape N°3			
Etape N°4			

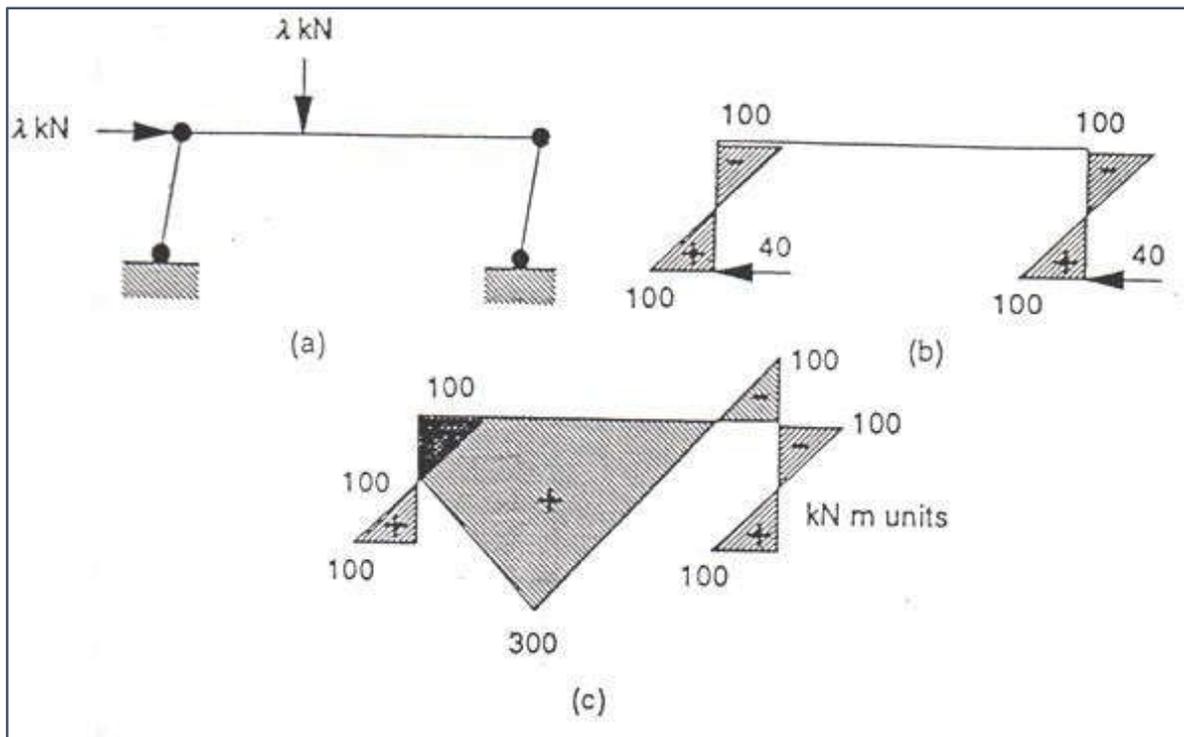
Tableau 15 : Figure détermination du mécanisme de ruine d'un portique simple

- ❖ Quand  $\lambda = 39$  le moment en E atteint la valeur du moment plastique et la rotuleplastique se forme.
- ❖ Pour l'étape 2, la structure peut être analysée comme dans l'étape 1 par la même méthode élastique mais tenir en compte la rotule plastique formée en E.
- ❖ Pour avoir un moment de :

- ❖  $M_c = 82.7 + 2.47 \lambda'$  avec  $\lambda'$  est le changement de  $\lambda = 46 - 39 = 7$ .
- ❖ Dès que  $\lambda$  atteint la valeur de 50, la quatrième rotule plastique se forme et la structure deviens un Mécanisme. La structure est sur le point de rupture.
- ❖ Dans ce cas-là, il y'a suffisamment de rotule plastique pour avoir un mécanisme, cette condition est dite « *Condition de Mécanisme* »
- ❖ Le coefficient de changement pour lequel la structure se change en un Mécanisme est nommé : « *Facteur de chargement à la rupture noté  $\lambda_c$*  »

Le mécanisme de l'étape 4 est le mécanisme actuel pour ce portique. Il est possible de tenter d'autres mécanismes et refaire les mêmes calculs précédents pour trouver la valeur de  $\lambda_c$  (le coefficient de changement pour lequel la structure se change en un mécanisme).

Considérons le mécanisme du même portique discuté auparavant (voir la figure), même nombre de rotule plastique mais à des positions différentes. Le diagramme du moment fléchissant est donné par la figure 25.



**Figure 25 :**Diagramme du moment fléchissant

La réaction horizontale est  $H=40$  donc on aura  $\lambda = 80$ , ce qui veut dire que le mécanisme prends place dès que  $\lambda$  atteint la valeur de 80 qui est une valeur supérieure de la vrai valeur du *facteur de chargement à la rupture*. Complétons le diagramme du moment fléchissant (voir figure 2.4 c) on trouve que le moment en « C » est supérieur à la valeur de  $M_p=100$ . La tentation du mécanisme est

fausse mais son diagramme du moment satisfait les équations d'équilibre et les conditions de mécanisme. Dans ce cas-là,  $\lambda$  est dite : une bande supérieur par rapport à  $\lambda_c$ .

#### 3.7 Principe de la méthode pas à pas :

L'approche par étapes consiste à analyser la structure par étapes tout au long de la croissance.

Augmentez progressivement le facteur de charge.

Chaque étape est un calcul d'élasticité classique.

Lorsque le moment de flexion atteint le moment de flexion élastique au niveau de la section critique  $M_{pl}$ , La rotule en plastique naît du côté droit de ce nœud, qui correspond à la fin de l'étape.

La prochaine étape sera d'analyser la structure en introduisant une charnière sur le côté droit

La pièce qui forme une rotule en plastique. Ce processus sera répété jusqu'à la structure est devenue un mécanisme. Le facteur de charge  $\lambda$  est déterminé pour chaque

Étapes de calcul. La charge finale à la rupture aura les valeurs suivantes :

$$P_U = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times P$$

n étant le nombre de pas.

L'avantage majeur de cette approche est qu'en plus de la charge, elle fournit

Finale (destruction) :

- La séquence de formation des charnières en plastique.
- Déformations lors des différentes étapes et rotations plastiques.
- Réactions hyperstatiques et forces internes lors des différentes étapes.

Dans le cas où les ruines sont des pièces, le champ de réaction et donc le champ de réaction les moments ne sont pas uniques, nous pouvons partir de Différents états initiaux.

Il existe de nombreuses méthodes de calcul de l'élasticité, dont certaines pour les calculs manuels, d'autres sont programmables.

• **Distribution de la résultante des forces sismiques**

$V = F_t + \sum F_i$  ; avec  $F_t$  : force concentré au sommet de la structure

$T = 0.325 < 0.7 \rightarrow F_t = 0$

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

$F_i$  : effort horizontale revenant au niveau  $i$

$h_i$  : Niveau du plancher où s'exerce la force  $F_i$

$h_j$  : Niveau du plancher quelconque

$W_i \times W_j$  : Poids revenant au plancher  $i, j$

Niveau	Wi (kn)	hi	wi*hi	V(kn)	Fi (kn)
<b>4</b>	1362,728	15,3	20849,7384	866,74	263,116993
<b>3</b>	1563,1335	12,24	19132,754	866,74	241,449203
<b>2</b>	1563,1335	9,18	14349,5655	866,74	181,086902
<b>1</b>	1563,1335	6,12	9566,37702	866,74	120,724601
<b>RDC</b>	1563,1335	3,06	4783,18851	866,74	60,3623007
<b>somme</b>			68681,6235		866,74

**Tableau 16** : Distribution horizontale de la force sismique

### 3.8 Méthode de Muto

#### 3.8.1 Principe de la méthode

La méthode de K.Muto a été proposée dans la réglementation japonaise sur les tremblements de terre. Il est approximé et utilisé pour calculer les portiques sous charges horizontales. Elle se base sur la raideur horizontale relative du portique, K.Muto préconise de multiplier sa valeur de raideur parfaitement encastree dans le poteau par le facteur de correction « a », en tenant compte de la flexibilité des poutres atteignant les nœuds.

n'importe qui :

$R_j \alpha$  : Rigidité relative de niveau d'un portique avec poteaux parfaitement encastres (ou bien poutres infiniment rigides).

$R_j$  : Rigidité relative de niveau d'un portique corrigé au sens de « K.Muto ».

$a_j$  : coefficient correcteur tenant compte de la flexibilité des poutres formant le nœud.

On a :

$$R_j = R_j \alpha \cdot a_j$$

La méthode de K.Muto permet la modélisation de la structure, c'est à dire la détermination du centre de masse (point d'action des forces sismiques) et du centre de torsion (centre de rotation) de chaque couche.

La modélisation détermine également la rigidité relative de chaque couche dans tous les cadres dans les deux directions, ce qui permettra à la répartition des forces sismiques renvoyées à chaque couche d'être proportionnelle à la rigidité relative de la même couche dans chaque cadre.

En dernier lieu, elle permet de déterminer l'effort sismique revenant à chaque poteau de la structure et d'en déduire les moments dans les nœuds.

### 3.8.2 Calcul des raideurs des poteaux et des poutres

$$K_{\text{poteau}} = \frac{I}{h}$$
$$K_{\text{poutre}} = \frac{I}{L}$$

Avec :

I : Inertie de l'élément considéré.

H<sub>cal</sub> : Hauteur de calcul du poteau considéré (elle est calculé suivant la figure ci-dessous).

L<sub>cal</sub> : Portée de la poutre considérée.

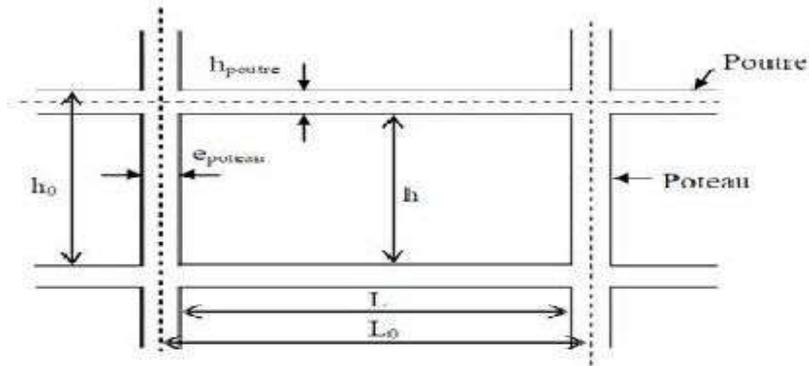


Figure 26 : Détermination des paramètres de calcul

### 3.8.3 Calcul des raideurs de poteau

Niveau	b (m)	h (m)	I	h <sub>o</sub>	h <sub>cal</sub>	k pot
RDC	0,3	0,3	0,000675	3,06	3,06	0,000220588
1,2,3,4	0,3	0,3	0,000675	3,06	3,06	0,000220588

**Tableau 17:** Calcul des raideurs de poteau

### 3.8.4 Calcul des raideurs des poutres

➤ **Etude des portiques longitudinaux**

$$L_{cal} = L + \frac{1}{2} h_{poutre} < L_0$$

Travée	Section		Inertie (m <sup>4</sup> )	L <sub>o</sub> (m)	L (m)	K poutre (m <sup>3</sup> )
	b (m)	h(m)				
A-B /I-J	0,3	0,35	0,00107188	2,7	2,7	0,000396991
B-C/J-H	0,3	0,35	0,00107188	3,25	3,25	0,000329808
C-D /H-G	0,3	0,35	0,00107188	3,15	3,15	0,000340278
D-E/G-F	0,3	0,35	0,00107188	3,6	3,6	0,000297743
E-F	0,3	0,35	0,00107188	3,8	3,8	0,000282072

**Tableau 18 :** Calcul des raideurs de poutres dans le sens longitudinal

➤ **Etude des portiques transversaux**

$$L_{cal} = L + \frac{1}{2} h_{poutre} < L_0$$

Travée	section		Inertie	L <sub>o</sub>	K poutre (m <sup>3</sup> )
	b (m)	h(m)			
1-2	0,3	0,45	0,00227813	4,4	0,000517756
2-3	0,3	0,45	0,00227813	3,8	0,000599507
3-4	0,3	0,45	0,00227813	5,5	0,000414205
4-5	0,3	0,45	0,00227813	3,95	0,000576741

**Tableau 19 :** Calcul des raideurs de poutres dans le sens transversal

### 3.8.5 Calcul des coefficients $\bar{K}$ relatif aux portiques :

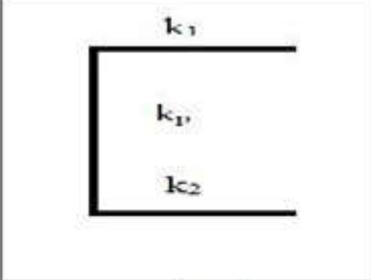
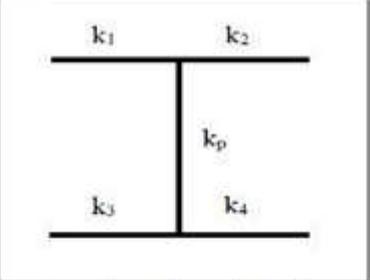
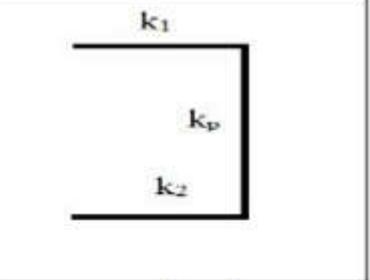
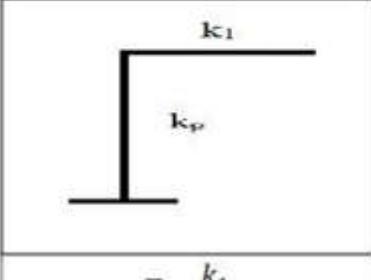
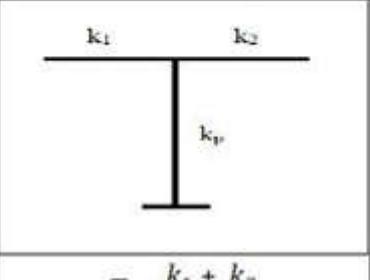
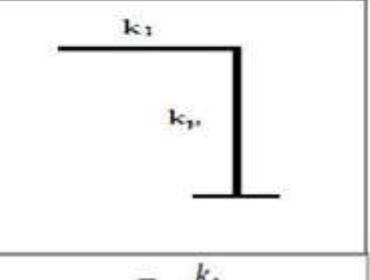
		
$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{2 k_p}$	$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}{2 k_p}$	$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{2 k_p}$
		
$\bar{k} = \frac{k_1}{k_p}$	$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{k_p}$	$\bar{k} = \frac{k_1}{k_p}$

Figure 27 : Coefficients  $\bar{K}$

### 3.8.6 Calcul des coefficients correcteurs ( $a_i$ )

- Pour les cas d'un étage courant :

$$a_i = \frac{\bar{K}}{2 + \bar{K}}$$

- pour le cas d'un RDC:

$$a_i = \frac{0,5 + \bar{K}}{2 + \bar{K}}$$

### 3.8.7 Calcul de la rigidité des poteaux suivant les deux sens :

La rigidité  $r$  est définie par la relation suivante :

$$r = a \times \frac{12 EI}{h^3}$$

$E$  : Le module de Young

$I$  : Inertie de la section du poteau suivant le sens considéré.

$h$  : hauteur libre du poteau.

### 3.8.8 Calcul des rigidités relatives de niveau des portiques $R_j$

$$R_j = \sum a_j \times \frac{12 EI}{h_j^3}$$

#### 3.8.8.1 Sens longitudinal

Niveaux	Files	k pot	Kpoutre	K	aj	hc(m)	Ec(kn*m)	I ( m <sup>4</sup> ) pot	Rj (i)	Σ Rj (i)
<b>RDC</b>	<b>A</b>	0,00022059	0,00039699	1,799691358	0,60523109	3,06	29858,594	0,000675	5,10871088	
	<b>B</b>	0,00022059	0,00039699	3,294819563	0,71670423	3,06	29858,594	0,000675	6,04964735	34,1719346
	<b>C</b>	0,00022059	0,00032981	2,99025641	0,69941424	3,06	29858,594	0,000675	5,90370387	
	<b>D</b>	0,00022059	0,00032981	3,037720798	0,7022463	3,06	29858,594	0,000675	5,92760906	
	<b>E</b>	0,00022059	0,00034028	3,342283951	0,71922121	3,06	29858,594	0,000675	6,07089305	
<b>Etage</b>	<b>A</b>	0,00022059	0,00039699	1,799691358	0,47364146	3,06	29858,594	0,000675	3,99797251	
	<b>B</b>	0,00022059	0,00039699	1,799691358	0,47364146	3,06	29858,594	0,000675	3,99797251	
<b>1,2,3,4</b>	<b>C</b>	0,00022059	0,00039699	3,294819563	0,6222723	3,06	29858,594	0,000675	5,25255446	25,7226869
	<b>D</b>	0,00022059	0,00032981	2,99025641	0,59921899	3,06	29858,594	0,000675	5,05796316	
	<b>E</b>	0,00022059	0,00032981	1,495128205	0,42777492	3,06	29858,594	0,000675	3,61081649	

**Tableau 20 : Sens longitudinal**

#### 3.8.8.2 Sens transversal

Niveaux	Files	k pot	Kpoutre	K	aj	hc(m)	Ec(m)	I ( m <sup>4</sup> )pot	Rj (i)	Σ Rj (i)
<b>RDC</b>	1	0,00022059	0,00051776	2,347159091	0,65494707	3,06	29858,594	0,000675	5,52835972	
	2	0,00022059	0,00051776	2,347159091	0,65494707	3,06	29858,594	0,000675	5,52835972	18,9152398
	3	0,00022059	0,00059951	5,064922249	0,78768344	3,06	29858,594	0,000675	6,64877762	
	4	0,00022059	0,00059951	5,435526316	0,79826579	3,06	29858,594	0,000675	6,73810249	
	5	0,00022059	0,0004142	1,877727273	0,61317548	3,06	29858,594	0,000675	5,17576883	
	6	0,00022059	0,00057674	2,614556962	0,67494171	3,06	29858,594	0,000675	5,69713302	
<b>1,2,3,4</b>	1	0,00022059	0,00051776	2,347159091	0,53992942	3,06	29858,594	0,000675	4,55750429	
	2	0,00022059	0,00051776	2,347159091	0,53992942	3,06	29858,594	0,000675	4,55750429	
	3	0,00022059	0,00051776	5,064922249	0,71691125	3,06	29858,594	0,000675	6,05139482	
	4	0,00022059	0,00059951	5,435526316	0,73102106	3,06	29858,594	0,000675	6,17049466	15,1217533
	5	0,00022059	0,00059951	2,297745215	0,5346397	3,06	29858,594	0,000675	4,51285415	
	6	0,00022059	0,0004142	0,938863636	0,31946485	3,06	29858,594	0,000675	2,69657917	

**Tableau 21 : Sens transversal**

### 3.8.9 Calcul du centre de torsion $C_j$ à l'étage « j »

C'est le centre de gravité de tous les cadres qui constituent le support structurel. Par conséquent, il représente le point par lequel passent les réactions  $R_x$  et  $R_y$  de tous les portails.

Le centre de torsion peut également être défini comme suit :

- Si le centre de torsion coïncide avec le centre de masse de la structure, le résultat est

Les forces horizontales provoquent uniquement une translation du cadre.

- Si le centre de torsion est excentrique par rapport au centre de masse, les forces horizontales qui en résultent provoquent une translation et une rotation du cadre en raison de l'excentricité, c'est-à-dire que cela peut être pris en compte dans les calculs, car des forces de cisaillement supplémentaires se produisent dans le cadre en raison de la torsion.

$$X_{C_j} = \frac{\sum_{i=1}^k R_{jt} \cdot X_t}{\sum_{i=1}^k R_{jt}}; Y_{C_j} = \frac{\sum_{i=1}^m R_{jl} \cdot Y_l}{\sum_{i=1}^m R_{jl}}$$

Les coordonnées  $x_{c_j}$  et  $y_{c_j}$  du centre de torsion  $C_j$  par rapport au système d'axe  $oxy$  sont données par :

$R_{jt}$  et  $R_{jl}$  sont les rigidités des portiques transversaux et longitudinaux.

#### ➤ Application :

$$X_{rdc} = (\sum R_{jt} \cdot X_t) / \sum R_{jt} = 29,1340m.$$

$$X_{etage1,2,3,4} = (\sum R_{jt} \cdot X_t) / \sum R_{jt} = 27,2811m.$$

$$Y_{rdc} = (\sum R_{jl} \cdot y_l) / \sum R_{jl} = 7,7077m.$$

$$Y_{etage1,2,3,4} = (\sum R_{jl} \cdot Y_t) / \sum R_{jl} = 7,5298m.$$

### 3.9 Définition du logiciel SOCOTEC

Le logiciel "Mr" (Moment Release) de la société Socotec est utilisé pour le calcul et l'analyse des moments dans les structures en génie civil. Ce type de logiciel permet aux ingénieurs de modéliser et d'analyser les forces internes et les moments dans divers types de structures, ce qui est crucial pour assurer leur stabilité et sécurité.

#### ➤ Fonctionnalités du Logiciel Mr

##### -Modélisation Précise :

- Création de Modèles 3D : Permet la création de modèles tridimensionnels des structures pour une analyse plus précise.

- Définition des Propriétés des Matériaux : Intègre les caractéristiques des matériaux utilisés, comme l'acier, le béton, etc.

### **-Calcul des Moments :**

- Moments Fléchissants : Calcule les moments fléchissants dans les poutres et autres éléments structurels.
- Efforts Tranchants et Normaux : Analyse les efforts tranchants et normaux agissant sur les structures.

### **-Simulation de Charges :**

- Charges Statistiques et Dynamiques : Permet la simulation de diverses conditions de charge, incluant les charges statiques (comme le poids propre de la structure) et dynamiques (comme les vents et les séismes).
- Analyse de Scénarios Multiples : Capacité à analyser différents scénarios de charge pour déterminer les conditions les plus critiques.

### **-Conformité aux Normes :**

- Normes Internationales : Compatible avec des normes internationales comme l'Eurocode, l'ACI, et autres réglementations locales.
- Vérification de la Conformité : Vérifie que les structures respectent les normes en vigueur.

### **-Rapports et Documentation :**

- Génération Automatique de Rapports : Crée des rapports détaillés des analyses effectuées, avec des graphiques et des tableaux.
- Documentation Complète : Fournit une documentation exhaustive des résultats et des méthodes utilisées pour l'analyse.

### **➤ Utilisation en Pratique**

Les ingénieurs utilisent Mr pour :

- Concevoir et analyser des bâtiments, des ponts et d'autres infrastructures.
- Vérifier les plans de construction pour s'assurer de leur solidité et de leur conformité réglementaire.

- Optimiser les conceptions pour réduire les coûts tout en maintenant la sécurité.

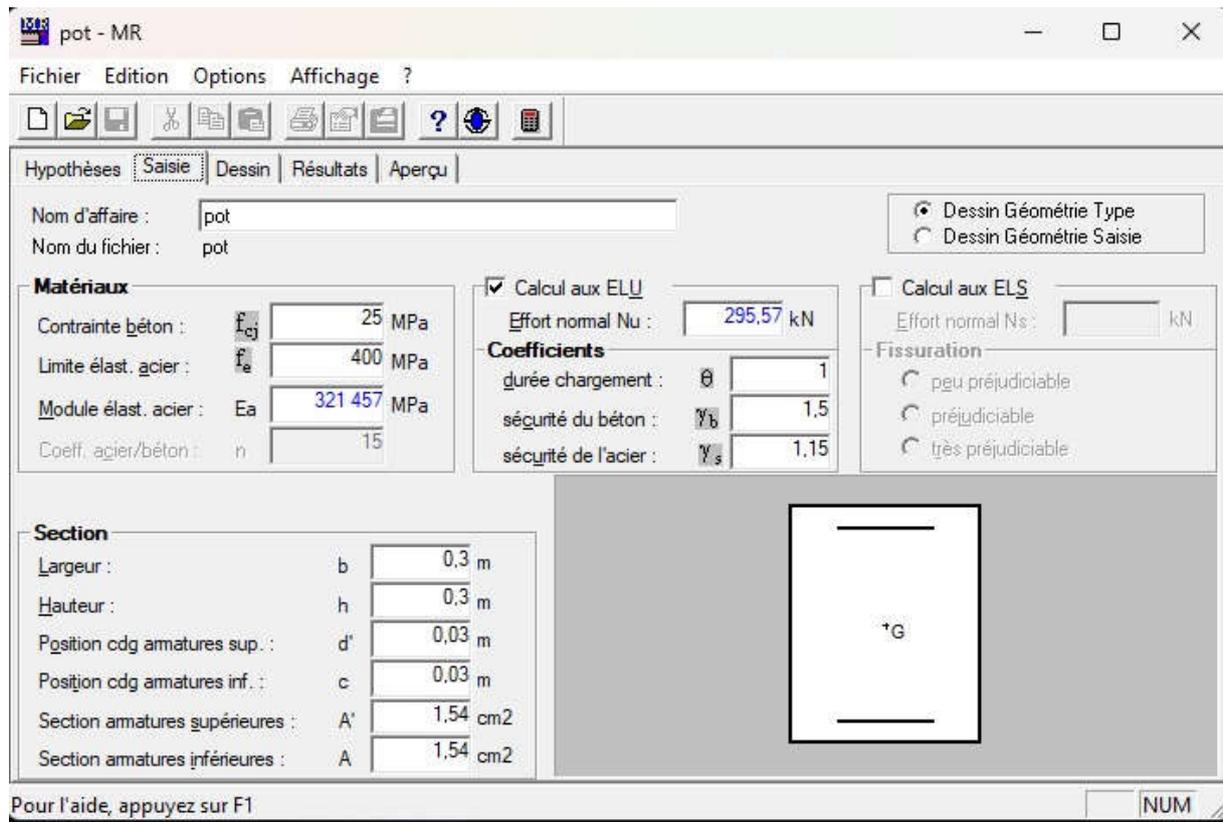


Figure 28 : Interface du socotec

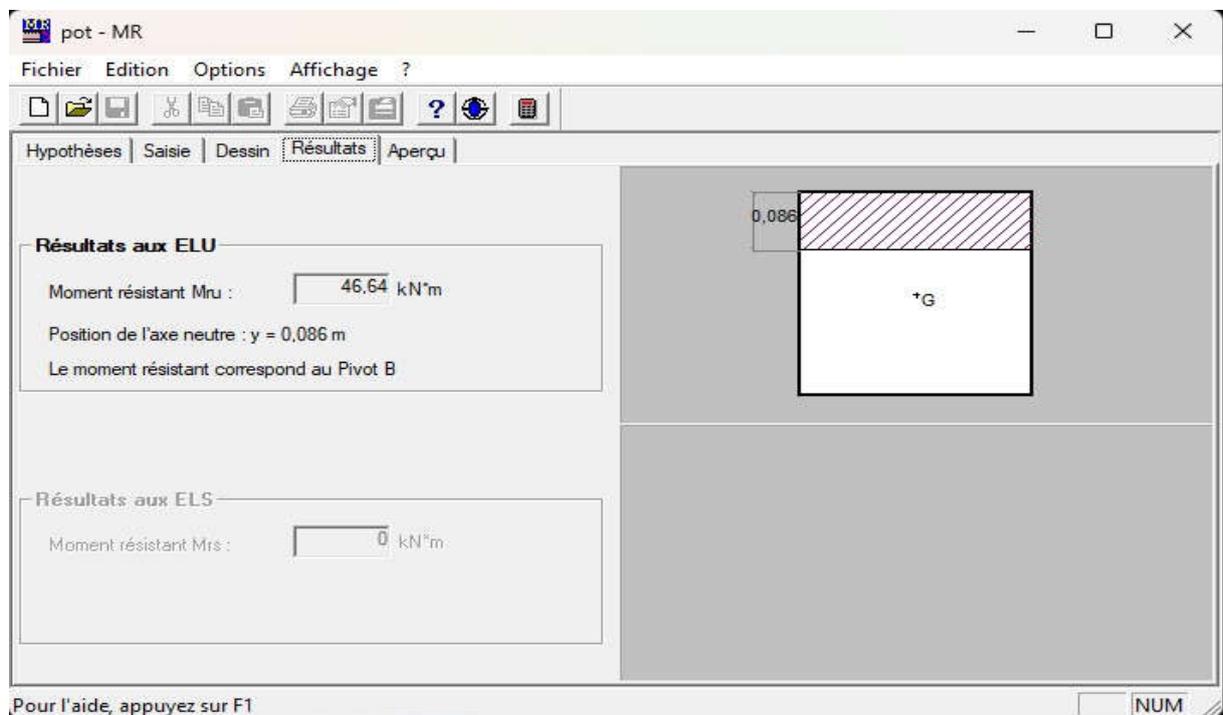


Figure 29 : Exemple des résultats

La figure schématise la distribution verticale de l'effort sismique pour le portique le plus sollicité choisi pour le calcul plastique.

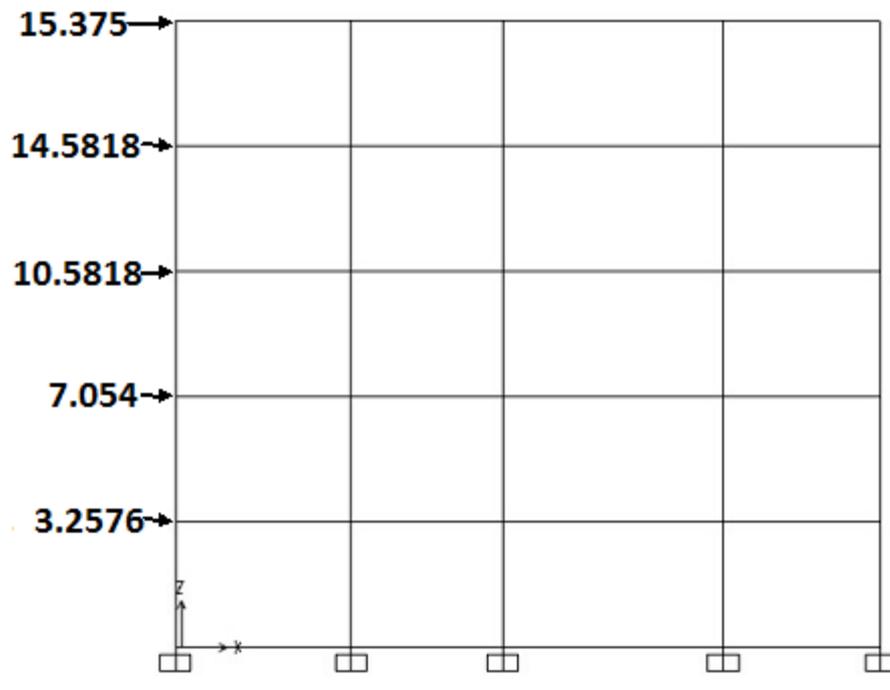


Figure 30 : L'effort tranchant qui revient à chaque niveau du portique

### 3.10 Analyse plastique des portiques de la structure

➤ Caractéristique du portique analysé :

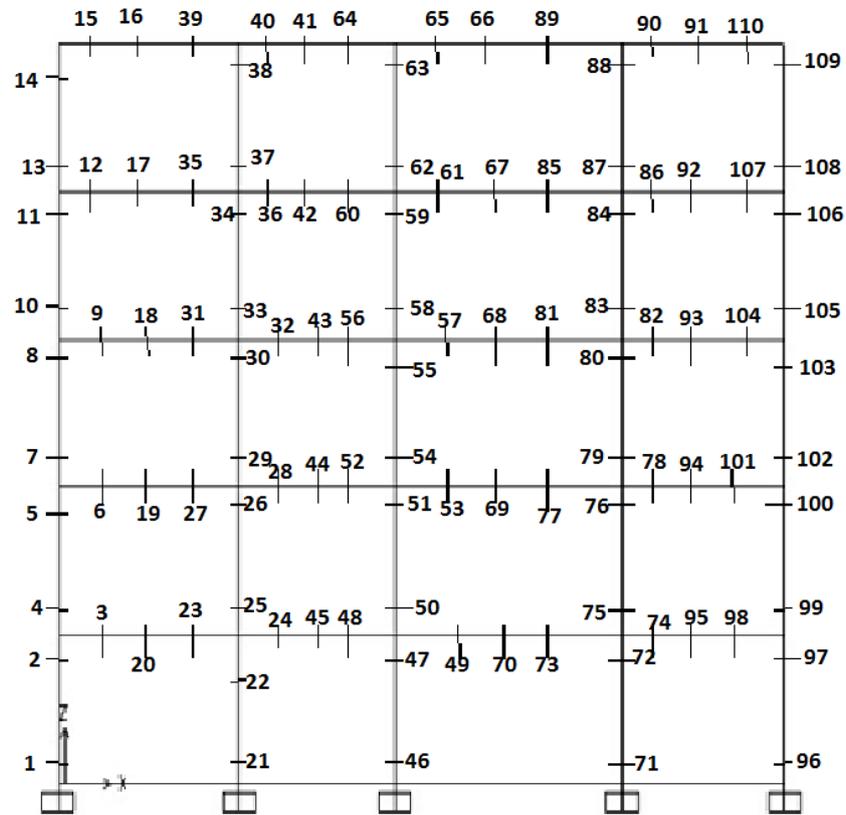


Figure 31: Positions des sections critiques

3.11 Analyse plastique du portique

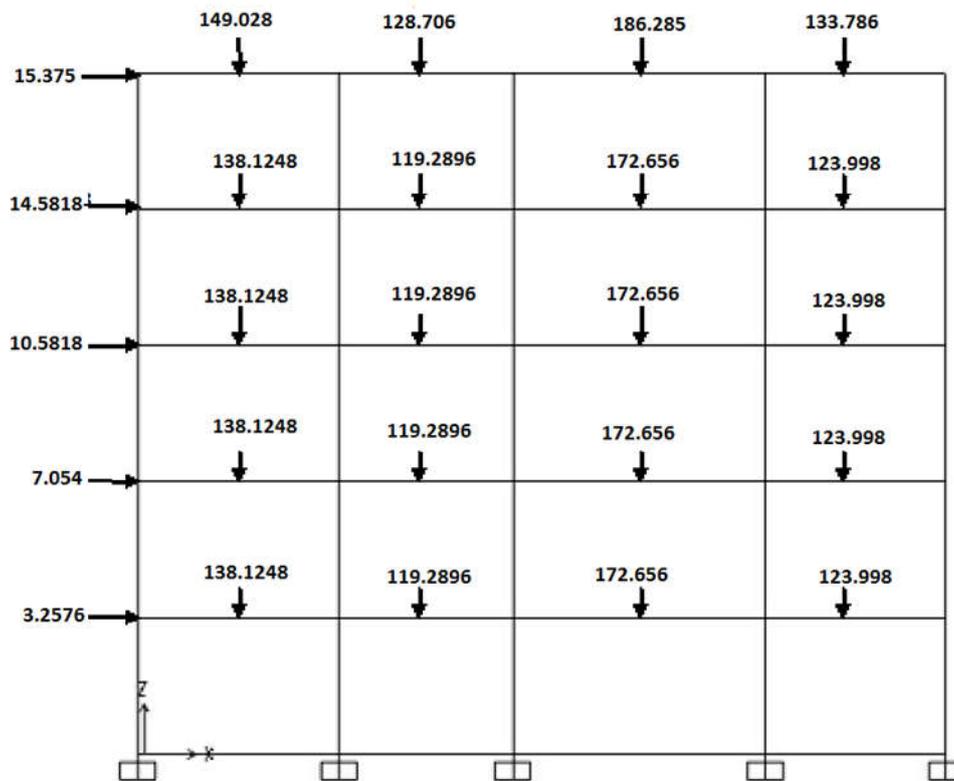


Figure 32 : Chargement du portique (kN).

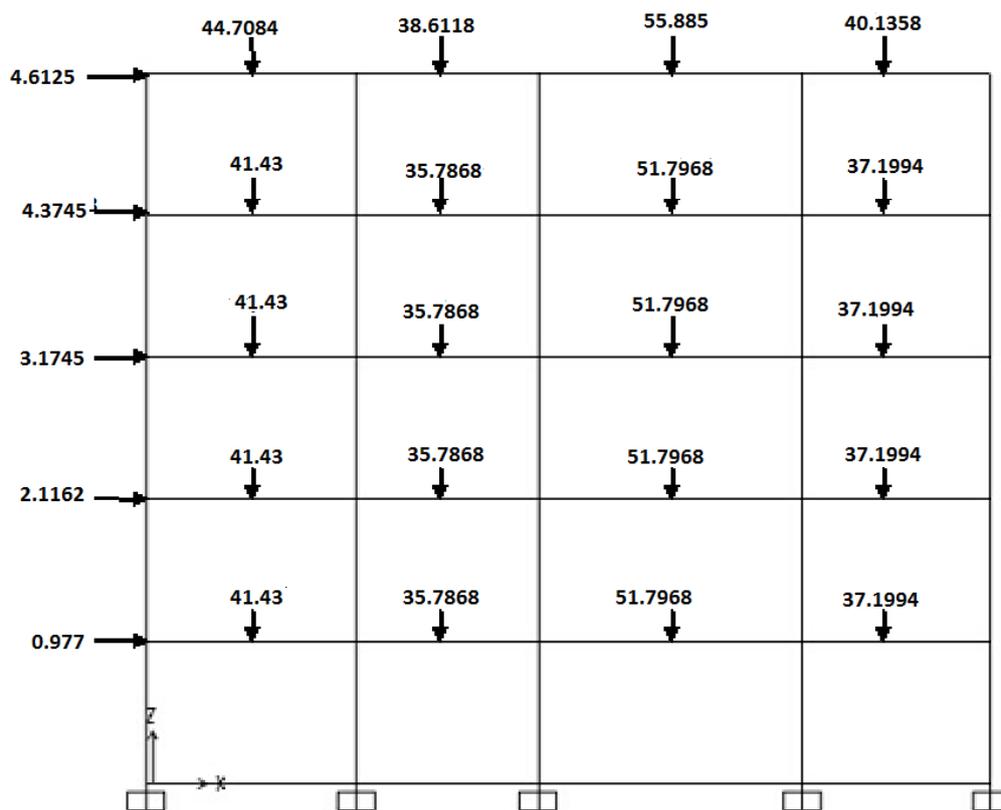


Figure 33 : Portique sous nouveaux charge V et H concentrées.

L'application du chargement horizontal dû aux séisme et le chargement vertical dû aux charges permanentes et charges d'exploitations ont provoqué un diagramme de moment fléchissant ou il a été constaté des déplacements de moment de flexion par rapport au moment résistant au niveaux des sections critiques N (26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45). Ces déplacements ne sont pas des rotules plastiques car on n'a pas pris en considérations les caractéristiques des sections critiques (moment résistant) et la redistribution des efforts internes (moments de flexion) dès l'application de la première rotule. A cet effet il a opté pour une réduction de cette combinaison de charge verticale et horizontale avec un taux de **30,29%** afin d'éviter ses déplacements.

L'analyse du portique a été entamé par la méthode pas-à-pas avec le nouveau chargement réduit ( les étapes suivantes ).

## Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

### Etape 1 :

Frame	Station	P	Mr (KN.m)	Axe neutre(m)	Mf (KN.m)	Observation	$\Delta$	$\Delta 1$
40	2,75	0	43,63	0,044	101,0471	Rotule	0,431778844	0,431778844
38	2,75	0	43,63	0,044	90,9615	Rotule	0,47965348	0,431778844
39	2,75	0	43,63	0,044	90,8757	Rotule	0,480106343	0,431778844
36	2,75	0	43,63	0,044	90,6045	Rotule	0,481543411	0,431778844
37	2,75	0	43,63	0,044	90,4864	Rotule	0,482171906	0,431778844
36	5,5	0	43,63	0,044	-86,9325	Rotule	0,501883645	0,431778844
37	5,5	0	43,63	0,044	-85,0876	Rotule	0,512765667	0,431778844
38	5,5	0	43,63	0,044	-82,208	Rotule	0,530726937	0,431778844
40	5,5	0	43,63	0,044	-80,5757	Rotule	0,541478386	0,431778844
39	5,5	0	43,63	0,044	-79,1184	Rotule	0,551452001	0,431778844
40	0	0	43,63	0,044	-75,9287	Rotule	0,57461803	0,431778844
30	2,2	0	43,63	0,044	74,1016	Rotule	0,588786207	0,431778844
39	0	0	43,63	0,044	-71,493	Rotule	0,610269537	0,431778844
38	0	0	43,63	0,044	-68,2317	Rotule	0,639438853	0,431778844
37	0	0	43,63	0,044	-66,3024	Rotule	0,658045561	0,431778844
26	2,2	0	43,63	0,044	65,7673	Rotule	0,663399592	0,431778844
31	3,8	0	43,63	0,044	-65,285	Rotule	0,668300528	0,431778844
26	4,4	0	43,63	0,044	-64,7856	Rotule	0,673452125	0,431778844
36	0	0	43,63	0,044	-64,2212	Rotule	0,679370675	0,431778844
35	3,8	0	43,63	0,044	-64,0147	Rotule	0,681562204	0,431778844
28	2,2	0	43,63	0,044	64,0145	Rotule	0,681564333	0,431778844
27	2,2	0	43,63	0,044	63,9866	Rotule	0,681861515	0,431778844
32	3,8	0	43,63	0,044	-62,9908	Rotule	0,69264083	0,431778844
29	2,2	0	43,63	0,044	62,5068	Rotule	0,698004057	0,431778844
27	4,4	0	43,63	0,044	-61,9035	Rotule	0,704806675	0,431778844
45	0	0	43,63	0,044	-60,8108	Rotule	0,717471239	0,431778844
33	3,8	0	43,63	0,044	-60,3131	Rotule	0,723391767	0,431778844
28	4,4	0	43,63	0,044	-57,8552	Rotule	0,754124089	0,431778844
34	3,8	0	43,63	0,044	-56,397	Rotule	0,77362271	0,431778844
30	4,4	0	43,63	0,044	-56,2987	Rotule	0,77497349	0,431778844
29	4,4	0	43,63	0,044	-53,4309	Rotule	0,81656869	0,431778844
45	1,975	0	43,63	0,044	47,1295	Rotule	0,925747144	0,431778844
41	0	0	43,63	0,044	-47,022	Rotule	0,927863553	0,431778844
35	0	0	43,63	0,044	-45,8166	Rotule	0,95227494	0,431778844
44	1,975	0	43,63	0,044	43,7485	Rotule	0,997291336	0,431778844
42	3,95	0	43,63	0,044	-43,6449	Rotule	0,999658608	0,431778844
43	1,975	0	43,63	0,044	43,4166	Ok	1,004915171	0,431778844
42	1,975	0	43,63	0,044	42,9378	Ok	1,016120994	0,431778844
43	3,95	0	43,63	0,044	-42,7322	Ok	1,021009918	0,431778844

### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

41	1,975	0	43,63	0,044	42,601	Ok	1,024154363	0,431778844
44	0	0	43,63	0,044	-42,1443	Ok	1,035252691	0,431778844
42	0	0	43,63	0,044	-41,9071	Ok	1,041112365	0,431778844
43	0	0	43,63	0,044	-41,8623	Ok	1,042226538	0,431778844
44	3,95	0	43,63	0,044	-41,7864	Ok	1,044119618	0,431778844
41	3,95	0	43,63	0,044	-39,2037	Ok	1,112905	0,431779
29	0	0	43,63	0,044	-34,2677	Ok	1,273211	0,431779
34	0	0	43,63	0,044	-34,1369	Ok	1,278089	0,431779
33	0	0	43,63	0,044	-32,1454	Ok	1,35727	0,431779
34	1,9	0	43,63	0,044	31,2106	Ok	1,397923	0,431779
35	1,9	0	43,63	0,044	30,6738	Ok	1,422387	0,431779
31	0	0	43,63	0,044	-30,3978	Ok	1,435301	0,431779
33	1,9	0	43,63	0,044	30,2483	Ok	1,442395	0,431779
32	1,9	0	43,63	0,044	30,1748	Ok	1,445909	0,431779
32	0	0	43,63	0,044	-29,6149	Ok	1,473245	0,431779
31	1,9	0	43,63	0,044	28,6362	Ok	1,523596	0,431779
28	0	0	43,63	0,044	-26,828	Ok	1,626286	0,431779
30	0	0	43,63	0,044	-25,0012	Ok	1,745116	0,431779
45	3,95	0	43,63	0,044	-23,965	Ok	1,820572	0,431779
27	0	0	43,63	0,044	-22,8355	Ok	1,910622	0,431779
5	3,06	-64,447	51,25	0,052	25,0012	Ok	2,049902	0,431779
25	3,06	-53,34	49,97	0,051	-23,965	Ok	2,085124	0,431779
25	0	-53,34	49,97	0,051	20,6575	Ok	2,418976	0,431779
5	0	-64,447	51,25	0,052	-20,7742	Ok	2,467002	0,431779
26	0	0	43,63	0,044	-16,3919	Ok	2,66168	0,431779
24	3,06	-115,275	57,08	0,058	-21,1288	Ok	2,701526	0,431779
24	0	-115,275	57,08	0,058	20,3634	Ok	2,803068	0,431779
23	3,06	-177,609	64,04	0,065	-22,3688	Ok	2,862916	0,431779
23	0	-177,609	64,04	0,065	21,3336	Ok	3,001837	0,431779
22	3,06	-240,257	70,71	0,073	-22,3113	Ok	3,169246	0,431779
20	3,06	-175,081	63,76	0,064	-19,7649	Ok	3,225921	0,431779
22	0	-240,257	70,71	0,073	21,7826	Ok	3,246169	0,431779
20	0	-175,081	63,76	0,064	17,5889	Ok	3,625014	0,431779
17	3,06	-629,277	85,54	0,176	-22,3774	Ok	3,822607	0,431779
17	0	-629,277	85,54	0,176	22,1064	Ok	3,869468	0,431779
4	0	-127,208	58,42	0,059	-14,673	Ok	3,981463	0,431779
18	3,06	-476,829	85,98	0,139	-21,4721	Ok	4,004266	0,431779
19	3,06	-325,305	77,96	0,095	-19,3852	Ok	4,021625	0,431779
19	0	-325,305	77,96	0,095	18,8736	Ok	4,130638	0,431779
18	0	-476,829	85,98	0,139	20,8031	Ok	4,133038	0,431779
4	3,06	-127,208	58,42	0,059	13,4934	Ok	4,329524	0,431779
16	3,06	-786,167	77,59	0,204	-17,8041	Ok	4,357985	0,431779

### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

21	3,06	-299,455	76,02	0,087	-17,4211	Ok	4,363674	0,431779
7	0	-525,962	87,4	0,153	18,416	Ok	4,745873	0,431779
21	0	-299,455	76,02	0,087	15,7066	Ok	4,840004	0,431779
16	0	-786,167	77,59	0,204	15,8938	Ok	4,881778	0,431779
7	3,06	-525,962	87,4	0,153	-17,6806	Ok	4,943271	0,431779
15	3,06	-162,796	62,41	0,063	11,9139	Ok	5,238419	0,431779
6	3,06	-657,429	84,19	0,181	-15,9718	Ok	5,271165	0,431779
3	0	-186,105	64,98	0,066	-12,2399	Ok	5,308867	0,431779
3	3,06	-186,105	64,98	0,066	12,1549	Ok	5,345992	0,431779
8	3,06	-397,015	82,44	0,115	-14,7168	Ok	5,601761	0,431779
6	0	-657,429	84,19	0,181	14,9981	Ok	5,613378	0,431779
8	0	-397,015	82,44	0,115	14,6081	Ok	5,643444	0,431779
10	3,06	-142,142	60,1	0,061	-10,4822	Ok	5,733529	0,431779
15	0	-162,796	62,41	0,063	-10,2422	Ok	6,093417	0,431779
2	0	-242,372	70,93	0,073	-11,3777	Ok	6,234125	0,431779
9	0	-268,748	73,48	0,078	10,9929	Ok	6,684314	0,431779
2	3,06	-242,372	70,93	0,073	10,5957	Ok	6,694225	0,431779
9	3,06	-268,748	73,48	0,078	-10,8878	Ok	6,748838	0,431779
10	0	-142,142	60,1	0,061	8,4062	Ok	7,149485	0,431779
11	0	-775,465	78,17	0,202	8,2402	Ok	9,48642	0,431779
14	0	-315,337	77,22	0,092	-5,4568	Ok	14,15115	0,431779
1	3,06	-295,565	75,73	0,086	5,0142	Ok	15,10311	0,431779
14	3,06	-315,337	77,22	0,092	4,8537	Ok	15,90951	0,431779
1	0	-295,565	75,73	0,086	4,7393	Ok	15,97915	0,431779
13	0	-468,385	85,69	0,136	-2,6248	Ok	32,6463	0,431779
13	3,06	-468,385	85,96	0,136	2,4619	Ok	34,91612	0,431779
11	3,06	-775,465	78,17	0,202	-2,1474	Ok	36,40216	0,431779
12	0	-622,143	85,89	0,175	-1,0836	Ok	79,26357	0,431779
12	3,06	-622,143	87,89	0,175	0,6868	Ok	127,9703	0,431779

**Tableau 22 : Etape 1**

#### Etape 2 :

Frame	Station	P	Mr	Mf	Observation	Λ	Λ 1	DMT	Déplacement	
Text	M	KN		KN-m					M	
1	0	-88,669	75,73	0,086	2,0482	Ok	36,97393	0,562379	1,151864	0,0019
1	3,06	-88,669	75,73	0,086	2,0983	Ok	36,09112	0,562379	1,180039	
2	0	-72,712	70,93	0,073	-4,8	Ok	14,77708	0,562379	2,699417	
2	3,06	-72,712	70,93	0,073	4,4423	Ok	15,96695	0,562379	2,498254	
3	0	-55,832	64,98	0,066	-5,1359	Ok	12,65212	0,562379	2,88832	
3	3,06	-55,832	64,98	0,066	5,0929	Ok	12,75894	0,562379	2,864138	
4	0	-38,162	58,42	0,059	-6,1027	Ok	9,572812	0,562379	3,432027	
4	3,06	-38,162	58,42	0,059	5,4464	Ok	10,72635	0,562379	3,062938	
5	0	-19,334	51,25	0,052	-8,6908	Ok	5,897041	0,562379	4,887519	

### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

5	3,06	-19,334	51,25	0,052	11,1316	Ok	4,60401	0,562379	6,260173
6	0	-197,229	84,19	0,181	6,3453	Ok	13,26809	0,562379	3,56846
6	3,06	-197,229	84,19	0,181	-6,6922	Ok	12,58032	0,562379	3,763549
7	0	-157,789	87,4	0,153	7,6276	Ok	11,45839	0,562379	4,289598
7	3,06	-157,789	87,4	0,153	-7,2952	Ok	11,98048	0,562379	4,102664
8	0	-119,104	82,44	0,115	5,9682	Ok	13,81321	0,562379	3,356387
8	3,06	-119,104	82,44	0,115	-6,039	Ok	13,65127	0,562379	3,396204
9	0	-80,624	73,48	0,078	4,0745	Ok	18,03411	0,562379	2,291411
9	3,06	-80,624	73,48	0,078	-3,7048	Ok	19,83373	0,562379	2,0835
10	0	-42,643	60,1	0,061	4,434	Ok	13,55435	0,562379	2,493586
10	3,06	-42,643	60,1	0,061	-7,1745	Ok	8,37689	0,562379	4,034785
11	0	-232,639	78,17	0,202	3,5437	Ok	22,05887	0,562379	1,992901
11	3,06	-232,639	78,17	0,202	-0,9609	Ok	81,35082	0,562379	0,54039
12	0	-186,643	85,89	0,175	-0,4499	Ok	190,9091	0,562379	0,253014
12	3,06	-186,643	85,89	0,175	0,3062	Ok	280,5029	0,562379	0,1722
13	0	-140,515	85,69	0,136	-1,2758	Ok	67,1657	0,562379	0,717483
13	3,06	-140,515	85,69	0,136	1,3075	Ok	65,53728	0,562379	0,73531
14	0	-94,601	77,22	0,092	-2,1121	Ok	36,56077	0,562379	1,1878
14	3,06	-94,601	77,22	0,092	1,1664	Ok	66,2037	0,562379	0,655958
15	0	-48,839	62,41	0,063	-9,7655	Ok	6,390866	0,562379	5,491907
15	3,06	-48,839	62,41	0,063	18,0948	Ok	3,449057	0,562379	10,17613
16	0	-235,85	77,59	0,204	6,8202	Ok	11,3765	0,562379	3,835534
16	3,06	-235,85	77,59	0,204	-7,6636	Ok	10,12448	0,562379	4,309844
17	0	-188,783	85,54	0,176	9,5239	Ok	8,981615	0,562379	5,356037
17	3,06	-188,783	85,54	0,176	-9,6621	Ok	8,853148	0,562379	5,433757
18	0	-143,049	85,98	0,139	9,1078	Ok	9,44026	0,562379	5,122031
18	3,06	-143,049	85,98	0,139	-9,516	Ok	9,035309	0,562379	5,351594
19	0	-97,592	77,96	0,095	7,6884	Ok	10,13995	0,562379	4,323791
19	3,06	-97,592	77,96	0,095	-7,1245	Ok	10,94252	0,562379	4,006666
20	0	-52,524	63,76	0,064	13,3805	Ok	4,765143	0,562379	7,524906
20	3,06	-52,524	63,76	0,064	-22,0943	Ok	2,885812	0,562379	12,42536
21	0	-89,837	76,02	0,087	6,7502	Ok	11,26189	0,562379	3,796167
21	3,06	-89,837	76,02	0,087	-7,5205	Ok	10,10837	0,562379	4,229368
22	0	-72,077	70,71	0,073	9,4375	Ok	7,49245	0,562379	5,307447
22	3,06	-72,077	70,71	0,073	-9,7082	Ok	7,283534	0,562379	5,459683
23	0	-53,283	64,04	0,065	9,278	Ok	6,90235	0,562379	5,217748
23	3,06	-53,283	64,04	0,065	-9,6836	Ok	6,613243	0,562379	5,445849
24	0	-34,583	57,08	0,058	9,2189	Ok	6,191628	0,562379	5,184511
24	3,06	-34,583	57,08	0,058	-10,0829	Ok	5,66107	0,562379	5,670406
25	0	-16,002	49,97	0,051	8,0484	Ok	6,208687	0,562379	4,526247
25	3,06	-16,002	49,97	0,051	-6,6652	Ok	7,497149	0,562379	3,748365
26	0	0	43,63	0,044	-6,8984	Ok	6,324655	0,562379	3,879512
26	2,2	0	43,63	0,044	28,0639	Ok	1,554666	0,562379	15,78253

### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

26	4,4	0	43,63	0,044	-28,1362	Ok	1,550671	0,562379	15,82319
27	0	0	43,63	0,044	-9,5782	Ok	4,555136	0,562379	5,386574
27	2,2	0	43,63	0,044	27,254	Ok	1,600866	0,562379	15,32706
27	4,4	0	43,63	0,044	-27,0762	Ok	1,611378	0,562379	15,22707
28	0	0	43,63	0,044	-11,1957	Ok	3,897032	0,562379	6,296221
28	2,2	0	43,63	0,044	27,2866	Ok	1,598953	0,562379	15,3454
28	4,4	0	43,63	0,044	-25,3935	Ok	1,718156	0,562379	14,28076
29	0	0	43,63	0,044	-14,1371	Ok	3,086206	0,562379	7,950401
29	2,2	0	43,63	0,044	26,0824	Ok	1,672776	0,562379	14,66818
29	4,4	0	43,63	0,044	-24,8604	Ok	1,755	0,562379	13,98095
30	0	0	43,63	0,044	-11,1316	Ok	3,919472	0,562379	6,260173
30	2,2	0	43,63	0,044	33,962	Ok	1,284671	0,562379	19,0995
30	4,4	0	43,63	0,044	-19,3029	Ok	2,260282	0,562379	10,85554
31	0	0	43,63	0,044	-13,8165	Ok	3,157819	0,562379	7,770103
31	1,9	0	43,63	0,044	13,0178	Ok	3,351565	0,562379	7,320931
31	3,8	0	43,63	0,044	-28,1429	Ok	1,550302	0,562379	15,82696
32	0	0	43,63	0,044	-13,8127	Ok	3,158687	0,562379	7,767966
32	1,9	0	43,63	0,044	13,6648	Ok	3,192875	0,562379	7,68479
32	3,8	0	43,63	0,044	-26,8528	Ok	1,624784	0,562379	15,10144
33	0	0	43,63	0,044	-15,2801	Ok	2,855348	0,562379	8,5932
33	1,9	0	43,63	0,044	13,5256	Ok	3,225735	0,562379	7,606507
33	3,8	0	43,63	0,044	-25,6637	Ok	1,700067	0,562379	14,43271
34	0	0	43,63	0,044	-16,7215	Ok	2,609216	0,562379	9,403812
34	1,9	0	43,63	0,044	15,313	Ok	2,849213	0,562379	8,611702
34	3,8	0	43,63	0,044	-20,6476	Ok	2,113079	0,562379	11,61177
35	0	0	43,63	0,044	-12,1284	Ok	3,597342	0,562379	6,820752
35	1,9	0	43,63	0,044	1,6124	Ok	27,05904	0,562379	0,906779
35	3,8	0	43,63	0,044	-58,0091	Rotule	0,752123	0,562379	32,62307
36	0	0	43,63	0,044	-27,6319	Ok	1,578972	0,562379	15,53959
36	2,75	0	43,63	0,044	38,827	Ok	1,123703	0,562379	21,83547
36	5,5	0	43,63	0,044	-37,1553	Ok	1,17426	0,562379	20,89534
37	0	0	43,63	0,044	-28,4347	Ok	1,534393	0,562379	15,99106
37	2,75	0	43,63	0,044	38,8217	Ok	1,123856	0,562379	21,83249
37	5,5	0	43,63	0,044	-36,363	Ok	1,199846	0,562379	20,44977
38	0	0	43,63	0,044	-29,0833	Ok	1,500174	0,562379	16,35582
38	2,75	0	43,63	0,044	39,2347	Ok	1,112026	0,562379	22,06475
38	5,5	0	43,63	0,044	-34,8884	Ok	1,250559	0,562379	19,62049
39	0	0	43,63	0,044	-31,5796	Ok	1,381588	0,562379	17,75969
39	2,75	0	43,63	0,044	37,8174	Ok	1,153702	0,562379	21,26769
39	5,5	0	43,63	0,044	-35,2268	Ok	1,238546	0,562379	19,8108
41	0	0	43,63	0,044	-17,5932	Ok	2,479935	0,562379	9,894038
41	1,975	0	43,63	0,044	18,4448	Ok	2,365436	0,562379	10,37296
41	3,95	0	43,63	0,044	-18,9862	Ok	2,297985	0,562379	10,67743

### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

42	0	0	43,63	0,044	-17,684	Ok	2,467202	0,562379	9,945102
42	1,975	0	43,63	0,044	18,4413	Ok	2,365885	0,562379	10,37099
42	3,95	0	43,63	0,044	-18,9025	Ok	2,30816	0,562379	10,63036
43	0	0	43,63	0,044	-14,7218	Ok	2,963632	0,562379	8,279224
43	1,975	0	43,63	0,044	20,308	Ok	2,148414	0,562379	11,42078
43	3,95	0	43,63	0,044	-18,1313	Ok	2,406336	0,562379	10,19665
44	0	0	43,63	0,044	-55,4869	Rotule	0,786312	0,562379	31,20464
44	1,975	0	43,63	0,044	8,5582	Ok	5,098035	0,562379	4,812948
44	3,95	0	43,63	0,044	-6,6652	Ok	6,54594	0,562379	3,748365
45	0	0	43,63	0,044	-76,1039	Rotule	0,573295	0,562379	42,7992
45	1,975	0	43,63	0,044	0	Ok	1,568921	0,562379	0
45	3,95	0	43,63	0,044	0	Ok	2,259874	0,562379	0
46	0	0	43,63	0,044	-77,5812	Rotule	0,562379	0,562379	43,63
46	2,75	0	43,63	0,044	0	Ok	2,569824	0,562379	0
47	0	0	43,63	0,044	0	Ok	3,254879	0,562379	0
47	2,75	0	43,63	0,044	0	Ok	4,256982	0,562379	0

Frame	Station	P	Mr		Mf	Observation	Λ	Λ 1	DMT	Déplacement
Text	M	KN			KN-m					M
1	0	-88,669	75,73	0,086	2,0482	Ok	36,97393	0,562379	1,151864	0,0019
1	3,06	-88,669	75,73	0,086	2,0983	Ok	36,09112	0,562379	1,180039	
2	0	-72,712	70,93	0,073	-4,8	Ok	14,77708	0,562379	2,699417	0,0019
2	3,06	-72,712	70,93	0,073	4,4423	Ok	15,96695	0,562379	2,498254	
3	0	-55,832	64,98	0,066	-5,1359	Ok	12,65212	0,562379	2,88832	0,0019
3	3,06	-55,832	64,98	0,066	5,0929	Ok	12,75894	0,562379	2,864138	
4	0	-38,162	58,42	0,059	-6,1027	Ok	9,572812	0,562379	3,432027	0,0019
4	3,06	-38,162	58,42	0,059	5,4464	Ok	10,72635	0,562379	3,062938	
5	0	-19,334	51,25	0,052	-8,6908	Ok	5,897041	0,562379	4,887519	0,0019
5	3,06	-19,334	51,25	0,052	11,1316	Ok	4,60401	0,562379	6,260173	
6	0	-197,229	84,19	0,181	6,3453	Ok	13,26809	0,562379	3,56846	0,0019
6	3,06	-197,229	84,19	0,181	-6,6922	Ok	12,58032	0,562379	3,763549	
7	0	-157,789	87,4	0,153	7,6276	Ok	11,45839	0,562379	4,289598	0,0019
7	3,06	-157,789	87,4	0,153	-7,2952	Ok	11,98048	0,562379	4,102664	
8	0	-119,104	82,44	0,115	5,9682	Ok	13,81321	0,562379	3,356387	0,0019
8	3,06	-119,104	82,44	0,115	-6,039	Ok	13,65127	0,562379	3,396204	
9	0	-80,624	73,48	0,078	4,0745	Ok	18,03411	0,562379	2,291411	0,0019
9	3,06	-80,624	73,48	0,078	-3,7048	Ok	19,83373	0,562379	2,0835	
10	0	-42,643	60,1	0,061	4,434	Ok	13,55435	0,562379	2,493586	0,0019
10	3,06	-42,643	60,1	0,061	-7,1745	Ok	8,37689	0,562379	4,034785	
11	0	-232,639	78,17	0,202	3,5437	Ok	22,05887	0,562379	1,992901	0,0019
11	3,06	-232,639	78,17	0,202	-0,9609	Ok	81,35082	0,562379	0,54039	
12	0	-186,643	85,89	0,175	-0,4499	Ok	190,9091	0,562379	0,253014	0,0019
12	3,06	-186,643	85,89	0,175	0,3062	Ok	280,5029	0,562379	0,1722	

### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

13	0	-140,515	85,69	0,136	-1,2758	Ok	67,1657	0,562379	0,717483
13	3,06	-140,515	85,69	0,136	1,3075	Ok	65,53728	0,562379	0,73531
14	0	-94,601	77,22	0,092	-2,1121	Ok	36,56077	0,562379	1,1878
14	3,06	-94,601	77,22	0,092	1,1664	Ok	66,2037	0,562379	0,655958
15	0	-48,839	62,41	0,063	-9,7655	Ok	6,390866	0,562379	5,491907
15	3,06	-48,839	62,41	0,063	18,0948	Ok	3,449057	0,562379	10,17613
16	0	-235,85	77,59	0,204	6,8202	Ok	11,3765	0,562379	3,835534
16	3,06	-235,85	77,59	0,204	-7,6636	Ok	10,12448	0,562379	4,309844
17	0	-188,783	85,54	0,176	9,5239	Ok	8,981615	0,562379	5,356037
17	3,06	-188,783	85,54	0,176	-9,6621	Ok	8,853148	0,562379	5,433757
18	0	-143,049	85,98	0,139	9,1078	Ok	9,44026	0,562379	5,122031
18	3,06	-143,049	85,98	0,139	-9,516	Ok	9,035309	0,562379	5,351594
19	0	-97,592	77,96	0,095	7,6884	Ok	10,13995	0,562379	4,323791
19	3,06	-97,592	77,96	0,095	-7,1245	Ok	10,94252	0,562379	4,006666
20	0	-52,524	63,76	0,064	13,3805	Ok	4,765143	0,562379	7,524906
20	3,06	-52,524	63,76	0,064	-22,0943	Ok	2,885812	0,562379	12,42536
21	0	-89,837	76,02	0,087	6,7502	Ok	11,26189	0,562379	3,796167
21	3,06	-89,837	76,02	0,087	-7,5205	Ok	10,10837	0,562379	4,229368
22	0	-72,077	70,71	0,073	9,4375	Ok	7,49245	0,562379	5,307447
22	3,06	-72,077	70,71	0,073	-9,7082	Ok	7,283534	0,562379	5,459683
23	0	-53,283	64,04	0,065	9,278	Ok	6,90235	0,562379	5,217748
23	3,06	-53,283	64,04	0,065	-9,6836	Ok	6,613243	0,562379	5,445849
24	0	-34,583	57,08	0,058	9,2189	Ok	6,191628	0,562379	5,184511
24	3,06	-34,583	57,08	0,058	-10,0829	Ok	5,66107	0,562379	5,670406
25	0	-16,002	49,97	0,051	8,0484	Ok	6,208687	0,562379	4,526247
25	3,06	-16,002	49,97	0,051	-6,6652	Ok	7,497149	0,562379	3,748365
26	0	0	43,63	0,044	-6,8984	Ok	6,324655	0,562379	3,879512
26	2,2	0	43,63	0,044	28,0639	Ok	1,554666	0,562379	15,78253
26	4,4	0	43,63	0,044	-28,1362	Ok	1,550671	0,562379	15,82319
27	0	0	43,63	0,044	-9,5782	Ok	4,555136	0,562379	5,386574
27	2,2	0	43,63	0,044	27,254	Ok	1,600866	0,562379	15,32706
27	4,4	0	43,63	0,044	-27,0762	Ok	1,611378	0,562379	15,22707
28	0	0	43,63	0,044	-11,1957	Ok	3,897032	0,562379	6,296221
28	2,2	0	43,63	0,044	27,2866	Ok	1,598953	0,562379	15,3454
28	4,4	0	43,63	0,044	-25,3935	Ok	1,718156	0,562379	14,28076
29	0	0	43,63	0,044	-14,1371	Ok	3,086206	0,562379	7,950401
29	2,2	0	43,63	0,044	26,0824	Ok	1,672776	0,562379	14,66818
29	4,4	0	43,63	0,044	-24,8604	Ok	1,755	0,562379	13,98095
30	0	0	43,63	0,044	-11,1316	Ok	3,919472	0,562379	6,260173
30	2,2	0	43,63	0,044	33,962	Ok	1,284671	0,562379	19,0995
30	4,4	0	43,63	0,044	-19,3029	Ok	2,260282	0,562379	10,85554
31	0	0	43,63	0,044	-13,8165	Ok	3,157819	0,562379	7,770103
31	1,9	0	43,63	0,044	13,0178	Ok	3,351565	0,562379	7,320931

### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

31	3,8	0	43,63	0,044	-28,1429	Ok	1,550302	0,562379	15,82696
32	0	0	43,63	0,044	-13,8127	Ok	3,158687	0,562379	7,767966
32	1,9	0	43,63	0,044	13,6648	Ok	3,192875	0,562379	7,68479
32	3,8	0	43,63	0,044	-26,8528	Ok	1,624784	0,562379	15,10144
33	0	0	43,63	0,044	-15,2801	Ok	2,855348	0,562379	8,5932
33	1,9	0	43,63	0,044	13,5256	Ok	3,225735	0,562379	7,606507
33	3,8	0	43,63	0,044	-25,6637	Ok	1,700067	0,562379	14,43271
34	0	0	43,63	0,044	-16,7215	Ok	2,609216	0,562379	9,403812
34	1,9	0	43,63	0,044	15,313	Ok	2,849213	0,562379	8,611702
34	3,8	0	43,63	0,044	-20,6476	Ok	2,113079	0,562379	11,61177
35	0	0	43,63	0,044	-12,1284	Ok	3,597342	0,562379	6,820752
35	1,9	0	43,63	0,044	1,6124	Ok	27,05904	0,562379	0,906779
35	3,8	0	43,63	0,044	-58,0091	Rotule	0,752123	0,562379	32,62307
36	0	0	43,63	0,044	-27,6319	Ok	1,578972	0,562379	15,53959
36	2,75	0	43,63	0,044	38,827	Ok	1,123703	0,562379	21,83547
36	5,5	0	43,63	0,044	-37,1553	Ok	1,17426	0,562379	20,89534
37	0	0	43,63	0,044	-28,4347	Ok	1,534393	0,562379	15,99106
37	2,75	0	43,63	0,044	38,8217	Ok	1,123856	0,562379	21,83249
37	5,5	0	43,63	0,044	-36,363	Ok	1,199846	0,562379	20,44977
38	0	0	43,63	0,044	-29,0833	Ok	1,500174	0,562379	16,35582
38	2,75	0	43,63	0,044	39,2347	Ok	1,112026	0,562379	22,06475
38	5,5	0	43,63	0,044	-34,8884	Ok	1,250559	0,562379	19,62049
39	0	0	43,63	0,044	-31,5796	Ok	1,381588	0,562379	17,75969
39	2,75	0	43,63	0,044	37,8174	Ok	1,153702	0,562379	21,26769
39	5,5	0	43,63	0,044	-35,2268	Ok	1,238546	0,562379	19,8108
41	0	0	43,63	0,044	-17,5932	Ok	2,479935	0,562379	9,894038
41	1,975	0	43,63	0,044	18,4448	Ok	2,365436	0,562379	10,37296
41	3,95	0	43,63	0,044	-18,9862	Ok	2,297985	0,562379	10,67743
42	0	0	43,63	0,044	-17,684	Ok	2,467202	0,562379	9,945102
42	1,975	0	43,63	0,044	18,4413	Ok	2,365885	0,562379	10,37099
42	3,95	0	43,63	0,044	-18,9025	Ok	2,30816	0,562379	10,63036
43	0	0	43,63	0,044	-14,7218	Ok	2,963632	0,562379	8,279224
43	1,975	0	43,63	0,044	20,308	Ok	2,148414	0,562379	11,42078
43	3,95	0	43,63	0,044	-18,1313	Ok	2,406336	0,562379	10,19665
44	0	0	43,63	0,044	-55,4869	Rotule	0,786312	0,562379	31,20464
44	1,975	0	43,63	0,044	8,5582	Ok	5,098035	0,562379	4,812948
44	3,95	0	43,63	0,044	-6,6652	Ok	6,54594	0,562379	3,748365
45	0	0	43,63	0,044	-76,1039	Rotule	0,573295	0,562379	42,7992
45	1,975	0	43,63	0,044	0	Ok	1,568921	0,562379	0
45	3,95	0	43,63	0,044	0	Ok	2,259874	0,562379	0
46	0	0	43,63	0,044	-77,5812	Rotule	0,562379	0,562379	43,63
46	2,75	0	43,63	0,044	0	Ok	2,569824	0,562379	0
47	0	0	43,63	0,044	0	Ok	3,254879	0,562379	0

## Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

47	2,75	0	43,63	0,044	0	Ok	4,256982	0,562379	0
----	------	---	-------	-------	---	----	----------	----------	---

**Tableau 23 : Etape 2**

### Etape 3 :

Frame	Station	P	Mr		Mf	Observation	Λ	Λ 1	DMT	Déplacement
Text	M	KN			KN-m	M				
1	0	-88,669	75,73	0,086	2,0371	Ok	37,1753964	1,00969193	2,05684343	0,0019
1	3,06	-88,669	75,73	0,086	2,1354	Ok	35,4640817	1,00969193	2,15609615	
2	0	-72,712	70,93	0,073	-4,8614	Ok	14,5904472	1,00969193	4,90851636	
2	3,06	-72,712	70,93	0,073	4,5334	Ok	15,6460934	1,00969193	4,5773374	
3	0	-55,832	64,98	0,066	-5,2448	Ok	12,3894143	1,00969193	5,29563224	
3	3,06	-55,832	64,98	0,066	5,2118	Ok	12,4678614	1,00969193	5,26231241	
4	0	-38,162	58,42	0,059	-6,2885	Ok	9,28997376	1,00969193	6,34944771	
4	3,06	-38,162	58,42	0,059	5,7797	Ok	10,1077911	1,00969193	5,83571646	
5	0	-19,334	51,25	0,052	-8,9273	Ok	5,74081749	1,00969193	9,01382278	
5	3,06	-19,334	51,25	0,052	10,7603	Ok	4,76287836	1,00969193	10,8645881	
6	0	-197,229	84,19	0,181	6,3719	Ok	13,2126995	1,00969193	6,43365602	
6	3,06	-197,229	84,19	0,181	-6,7322	Ok	12,5055702	1,00969193	6,79744802	
7	0	-157,789	87,4	0,153	7,7282	Ok	11,3092311	1,00969193	7,80310119	
7	3,06	-157,789	87,4	0,153	-7,4154	Ok	11,7862826	1,00969193	7,48726955	
8	0	-119,104	82,44	0,115	6,1021	Ok	13,5101031	1,00969193	6,16124114	
8	3,06	-119,104	82,44	0,115	-6,1467	Ok	13,4120748	1,00969193	6,2062734	
9	0	-80,624	73,48	0,078	4,5463	Ok	16,1625938	1,00969193	4,59036243	
9	3,06	-80,624	73,48	0,078	-4,4959	Ok	16,3437799	1,00969193	4,53947396	
10	0	-42,643	60,1	0,061	3,4703	Ok	17,3183875	1,00969193	3,50393391	
10	3,06	-42,643	60,1	0,061	-4,4154	Ok	13,6114508	1,00969193	4,45819376	
11	0	-232,639	78,17	0,202	3,5858	Ok	21,7998773	1,00969193	3,62055333	
11	3,06	-232,639	78,17	0,202	-1,0327	Ok	75,6947807	1,00969193	1,04270886	
12	0	-186,643	85,89	0,175	-0,2993	Ok	286,969596	1,00969193	0,3022008	
12	3,06	-186,643	85,89	0,175	0,1332	Ok	644,81982	1,00969193	0,13449097	
13	0	-140,515	85,69	0,136	-0,9635	Ok	88,9361702	1,00969193	0,97283818	
13	3,06	-140,515	85,69	0,136	0,8927	Ok	95,9896942	1,00969193	0,90135199	
14	0	-94,601	77,22	0,092	-2,1699	Ok	35,5868934	1,00969193	2,19093052	
14	3,06	-94,601	77,22	0,092	1,9082	Ok	40,4674562	1,00969193	1,92669414	
15	0	-48,839	62,41	0,063	-4,2652	Ok	14,6323736	1,00969193	4,30653803	
15	3,06	-48,839	62,41	0,063	5,0242	Ok	12,4218781	1,00969193	5,0728942	
16	0	-235,85	77,59	0,204	6,8047	Ok	11,402413	1,00969193	6,87065069	
16	3,06	-235,85	77,59	0,204	-7,6175	Ok	10,1857565	1,00969193	7,69132829	
17	0	-188,783	85,54	0,176	9,4591	Ok	9,04314364	1,00969193	9,55077695	
17	3,06	-188,783	85,54	0,176	-9,5779	Ok	8,93097652	1,00969193	9,67072835	
18	0	-143,049	85,98	0,139	8,908	Ok	9,6519982	1,00969193	8,99433573	
18	3,06	-143,049	85,98	0,139	-9,1937	Ok	9,3520563	1,00969193	9,28280471	
19	0	-97,592	77,96	0,095	8,0916	Ok	9,63468288	1,00969193	8,17002323	

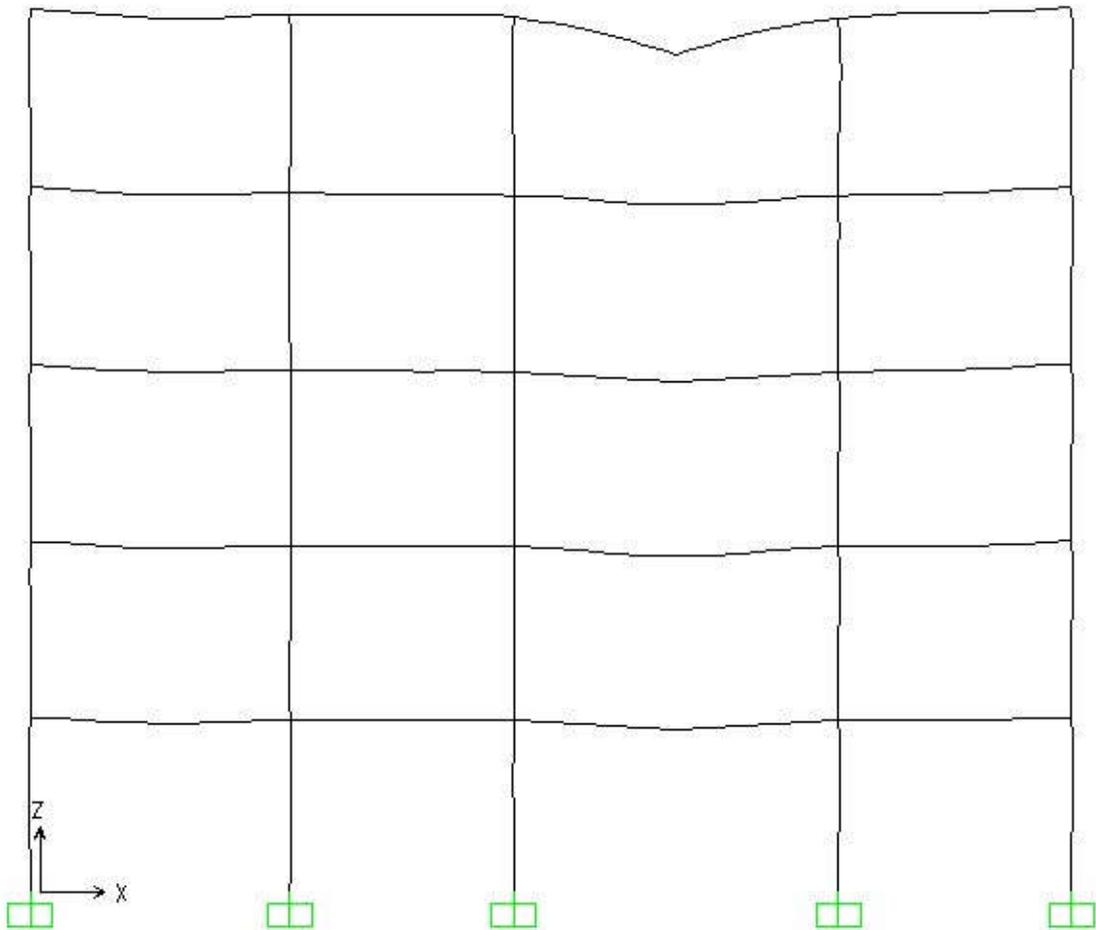
### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

19	3,06	-97,592	77,96	0,095	-8,3213	Ok	9,36872844	1,00969193	8,40194947
20	0	-52,524	63,76	0,064	7,4641	Ok	8,5422221	1,00969193	7,53644155
20	3,06	-52,524	63,76	0,064	-8,3053	Ok	7,67702551	1,00969193	8,3857944
21	0	-89,837	76,02	0,087	6,7318	Ok	11,2926706	1,00969193	6,79704415
21	3,06	-89,837	76,02	0,087	-7,4683	Ok	10,1790233	1,00969193	7,54068225
22	0	-72,077	70,71	0,073	9,3387	Ok	7,57171769	1,00969193	9,42921004
22	3,06	-72,077	70,71	0,073	-9,5639	Ok	7,39342737	1,00969193	9,65659267
23	0	-53,283	64,04	0,065	9,1486	Ok	6,99997814	1,00969193	9,23726761
23	3,06	-53,283	64,04	0,065	-9,5941	Ok	6,67493564	1,00969193	9,68708536
24	0	-34,583	57,08	0,058	8,723	Ok	6,54362031	1,00969193	8,80754272
24	3,06	-34,583	57,08	0,058	-9,0345	Ok	6,31800321	1,00969193	9,12206176
25	0	-16,002	49,97	0,051	8,9397	Ok	5,58967303	1,00969193	9,02634296
25	3,06	-16,002	49,97	0,051	-10,4964	Ok	4,76067985	1,00969193	10,5981304
26	0	0	43,63	0,044	-6,9968	Ok	6,23570775	1,00969193	7,06461251
26	2,2	0	43,63	0,044	28,1102	Ok	1,55210564	1,00969193	28,3826421
26	4,4	0	43,63	0,044	-27,9452	Ok	1,56126991	1,00969193	28,216043
27	0	0	43,63	0,044	-9,7782	Ok	4,46196642	1,00969193	9,87296965
27	2,2	0	43,63	0,044	27,3581	Ok	1,59477449	1,00969193	27,6232528
27	4,4	0	43,63	0,044	-26,668	Ok	1,6360432	1,00969193	26,9264644
28	0	0	43,63	0,044	-11,5003	Ok	3,79381407	1,00969193	11,6117601
28	2,2	0	43,63	0,044	27,3717	Ok	1,59398211	1,00969193	27,6369846
28	4,4	0	43,63	0,044	-24,9187	Ok	1,75089391	1,00969193	25,1602103
29	0	0	43,63	0,044	-14,707	Ok	2,96661454	1,00969193	14,8495392
29	2,2	0	43,63	0,044	26,7154	Ok	1,63314044	1,00969193	26,9743238
29	4,4	0	43,63	0,044	-23,0245	Ok	1,894938	1,00969193	23,2476519
30	0	0	43,63	0,044	-10,7603	Ok	4,05471966	1,00969193	10,8645881
30	2,2	0	43,63	0,044	31,7747	Ok	1,37310502	1,00969193	32,0826582
30	4,4	0	43,63	0,044	-24,0488	Ok	1,81422774	1,00969193	24,2818793
31	0	0	43,63	0,044	-13,4849	Ok	3,23547079	1,00969193	13,6155947
31	1,9	0	43,63	0,044	13,0399	Ok	3,34588455	1,00969193	13,1662818
31	3,8	0	43,63	0,044	-28,4305	Ok	1,53461951	1,00969193	28,7060465
32	0	0	43,63	0,044	-13,1505	Ok	3,31774457	1,00969193	13,2779537
32	1,9	0	43,63	0,044	13,6907	Ok	3,18683486	1,00969193	13,8233893
32	3,8	0	43,63	0,044	-27,4631	Ok	1,58867717	1,00969193	27,7292705
33	0	0	43,63	0,044	-14,2258	Ok	3,06696284	1,00969193	14,3636755
33	1,9	0	43,63	0,044	13,7262	Ok	3,17859276	1,00969193	13,8592334
33	3,8	0	43,63	0,044	-26,3168	Ok	1,65787634	1,00969193	26,5718606
34	0	0	43,63	0,044	-15,0582	Ok	2,89742466	1,00969193	15,204143
34	1,9	0	43,63	0,044	14,1501	Ok	3,08337044	1,00969193	14,2872418
34	3,8	0	43,63	0,044	-24,6366	Ok	1,77094242	1,00969193	24,8753762
35	0	0	43,63	0,044	-19,6334	Ok	2,22223354	1,00969193	19,8236856
35	1,9	0	43,63	0,044	13,1763	Ok	3,31124823	1,00969193	13,3040038
35	3,8	0	43,63	0,044	-27,3765	Ok	1,59370263	1,00969193	27,6418312

### Chapitre 3 : Généralités sur le calcul plastique des structures

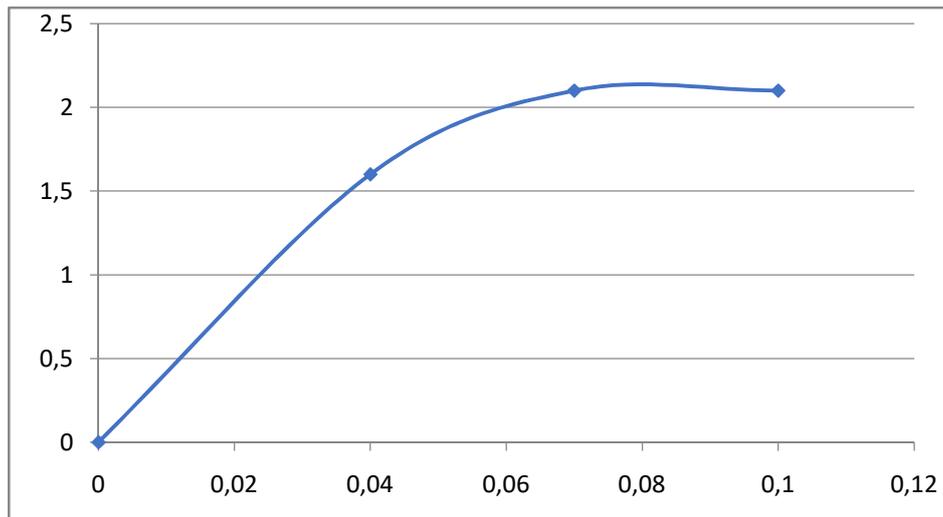
36	0	0	43,63	0,044	-27,6971	Ok	1,57525517	1,00969193	27,9655384
36	2,75	0	43,63	0,044	38,7704	Ok	1,12534305	1,00969193	39,1461601
36	5,5	0	43,63	0,044	-37,2033	Ok	1,17274543	1,00969193	37,5638718
37	0	0	43,63	0,044	-28,5598	Ok	1,52767176	1,00969193	28,8365996
37	2,75	0	43,63	0,044	38,726	Ok	1,12663327	1,00969193	39,1013297
37	5,5	0	43,63	0,044	-36,4294	Ok	1,19765903	1,00969193	36,7824713
38	0	0	43,63	0,044	-29,3794	Ok	1,48505415	1,00969193	29,6641431
38	2,75	0	43,63	0,044	38,9278	Ok	1,12079285	1,00969193	39,3050856
38	5,5	0	43,63	0,044	-35,2061	Ok	1,23927388	1,00969193	35,5473151
39	0	0	43,63	0,044	-30,81	Ok	1,41609867	1,00969193	31,1086084
39	2,75	0	43,63	0,044	38,8979	Ok	1,12165438	1,00969193	39,2748958
39	5,5	0	43,63	0,044	-33,8355	Ok	1,28947407	1,00969193	34,1634314
40	0	0	43,63	0,044	-32,4007	Ok	1,34657585	1,00969193	32,7147254
40	2,75	0	43,63	0,044	43,2112	Ok	1,00969193	1,00969193	43,63
40	5,5	0	43,63	0,044	-34,8621	Ok	1,25150235	1,00969193	35,1999811
41	0	0	43,63	0,044	-20,1268	Ok	2,16775642	1,00969193	20,3218676
41	1,975	0	43,63	0,044	18,2676	Ok	2,38838162	1,00969193	18,4446483
41	3,95	0	43,63	0,044	-16,8071	Ok	2,59592672	1,00969193	16,9699933
42	0	0	43,63	0,044	-17,9434	Ok	2,43153471	1,00969193	18,1173062
42	1,975	0	43,63	0,044	18,4066	Ok	2,37034542	1,00969193	18,5849955
42	3,95	0	43,63	0,044	-18,7125	Ok	2,33159653	1,00969193	18,8938603
43	0	0	43,63	0,044	-17,9208	Ok	2,43460113	1,00969193	18,0944872
43	1,975	0	43,63	0,044	18,6156	Ok	2,34373321	1,00969193	18,7960211
43	3,95	0	43,63	0,044	-18,3171	Ok	2,38192727	1,00969193	18,4946281
44	0	0	43,63	0,044	-18,05	Ok	2,41717452	1,00969193	18,2249394
44	1,975	0	43,63	0,044	18,7224	Ok	2,33036363	1,00969193	18,9038562
44	3,95	0	43,63	0,044	-17,9742	Ok	2,42736812	1,00969193	18,1484047
45	0	0	43,63	0,044	-26,5568	Ok	1,64289372	1,00969193	26,8141867
45	1,975	0	43,63	0,044	21,1077	Ok	2,0670182	1,00969193	21,3122744
45	3,95	0	43,63	0,044	-10,4964	Ok	4,15666324	1,00969193	10,5981304

**Tableau 24 : Etape 3**



**Figure 34 :** l'ordre de l'apparition des rotules au portique

- Le facteur de charge  $\lambda_1 = 0,56235781$  provoque la naissance de la 1er rotule au niveau de la section critique N°35,44,45,46.



**Figure 35** : courbe de capacité

## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Ce projet nous a permis d'un coté d'assimiler les différentes techniques et logiciels de calcul ainsi que la réglementation régissant les principes de conception et de calcul des ouvrages dans le domaine du bâtiment.

Le logiciel SAP2000 a été utilisé pour la modélisation éléments finis du bâtiment R+4 implanté à ouled boudjamaa ain témouchnet choisi comme un cas d'étude .

Il est crucial de réaliser une analyse plastique des bâtiments existants avant d'appliquer n'importe quel type de contreventement, qui permet d'agir aujourd'hui et demain contre les vulnérabilités de ces ouvrages Circonstances de force majeure.

Suite à l'analyse du bâtiment objet de cette étude on a conclu ce qui suit :

- La vérification de la sécurité du bâtiment et ces éléments structuraux conformément à l'RPA99 version 2003 est satisfaite.

D'après l'analyse plastique du bâtiment réalisé, l'effort sismique à la base calculé à partir de la méthode statique équivalente selon l'RPA99/2003 engendre quatre rotule au niveau du poteau(35,44,45,46) du portique étudié, par contre l'augmentation de l'effort sismique d'un taux de 43% provoque la ruine partielle du portique suite à un mécanisme de poteau, à cet effet on peut qualifier cette structure de bonne conception.

## **Références**

### Références

➤ **Les règlements :**

- RPA99 Version 2003 : Règlement parasismique algérienne.
- CBA93 : Règle de conception et de calcul des structures en béton armé.
- BAEL91 : Béton armé aux états limites
- Le DTR.B.C.2.2 : Charge permanente et charge d'exploitation.

➤ **Cours :**

- Béton armé
- Plasticité

➤ **Les logiciels :**

- SAP 2000 version 2003
- SOCOTEC
- AUTOCAD 2014 Dessin.
- WORD 2019
- EXEL 2019

➤ **Les mémoires :**

- Fortas mohamed/ MLILI CHIEKH
- LAGAGUINE MAROUA

## Références

---

---